



TEKNIikka JA LIIKENNE

Rakennustekniikka

Ympäristörakentaminen

INSINÖÖRITYÖ

TUHKIEN KÄYTTÖ STABILOINTITYÖMAALLA KORVAAVANA SIDEAINEENA

**Työn tekijä: Mikko Suikki
Työn ohjaajat: Anu Ilander, Tapio
Strandberg**

Työ hyväksytty: __. __. 2010



ALKULAUSE

Tämä insinööriyö tehtiin YIT:n Helsingin yksikölle. Haluan kiittää projektissa mukana olleita henkilöitä: Reijo Pirhonen YIT, Tapio Strandberg YIT, Anu Ilander Ramboll Oy, Harri Jyrävä Ramboll Oy.

Helsingissä 26.4.2010

Mikko Suikki

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Mikko Suikki	
Työn nimi: Tuhkien käyttö stabilointi työmaalla korvaavana sideaineena	
Päivämäärä: 26.4.2010	Sivumäärä: 41
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Ympäristörakentaminen
Työn ohjaaja: lehtori Anu Ilander	
Työn ohjaaja: Tapio Strandberg	
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää stabiloinnissa perinteisesti käytettävien, sementin ja poltetun kalkin, korvaamista edullisemmilla vaihtoehtoisilla sideaineilla. Tässä insinööriyössä käsitellyt vaihtoehtoisia sideaineita ovat eri teollisuudenalojen sivutuotteina saadut tuhkat.</p> <p>Tuhkia saadaan metsä- ja energiateollisuudesta ylijäämätuotteina. Vaihtoehtoisista sideaineista on tutkittu teollisuuden sivutuotteiden lujittumisominaisuuksia.</p> <p>Laboratorio olosuhteissa lujuusominaisuuksia on testattu 1-akselisella puristustesteillä. Runkomateriaalinäytteistä määriteltiin vesipitoisuus, märkätiheys, rakeisuus ja hehikutushäviö.</p> <p>Korvaamalla osaa sementistä ja poltetusta kalkista teollisuuden sivutuotteilla tarvittavan lujuuden saavuttamiseksi voidaan sideainekustannuksissa säästää huomattavasti.</p> <p>Tutkimustyö tehtiin Rambollin laboratoriossa. Laboratoriossa testattiin kolmea eri sideainevaihtoehtoa ja kolmea eri annostusta.</p> <p>Lisäksi työssä on esitelty stabilointimenetelmiä sekä ympäristölainsäädäntöä, joka tulee ottaa huomioon hyödynnettäessä tuhkia maarakentamisessa.</p>	
Avainsanat: Stabilointi, Sideaine, Tuhka	

ABSTRACT

Name: Mikko Suikki	
Title: The use of ashes in stabilization site as an alternative binder	
Date: 26.4.2010	Number of pages: 41
Department: Construction engineering	Study Programme: Environmental constructing
Instructor: Anu Ilander	
Supervisor: Tapio Strandberg	
<p>The main purpose of this graduate study was to research cheaper alternative options for cement and lime-cement binders used in the deep stabilization. Research for the work was done in the Ramboll laboratories.</p> <p>In this study the alternative binders considered were byproducts from forestry- and energyindustry. Three different kinds of binders and three different dosages were tested in this work. Alternative binders have been researched for their strenghtening properties.</p> <p>The study showed that by replacing some of the cement and lime-cement binders with industry byproducts it is possible to lower the binder costs remarkably.</p> <p>Research for the work was done in the Ramboll laboratories. Three different kinds of binders and three different dosages were tested in this work.</p> <p>Also include in the study are stabilization methods and environmental law regarding the use of ashes in environmental construction.</p>	
Keywords: Stabilization, Binder, Ash	

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	MAAPERÄ	2
2.1	Geotekninen maalajiluokitus	3
2.2	Stabilointi	6
2.3	Massastabilointi	6
2.4	Pilaristabilointi	7
2.5	Stabiloinnissa käytettävät sideaineet	10
2.5.1	<i>Kalkkisementti</i>	11
2.5.2	<i>Sivutuotteet</i>	13
2.6	Stabilointitutkimukset	14
3	TUHKAT	15
3.1	Energiateollisuuden tuhkat	16
3.1.1	<i>Kivihiihen polton lentotuhka, LT</i>	16
3.1.2	<i>Kivihiihen polton pohjatuhka, PT</i>	17
4.1.3	<i>Kivihiihen polton rikinpoiston lopputuote, RPT</i>	17
3.2	Metsäteollisuuden tuhkat	19
3.3	Ympäristöominaisuudet	20
3.3.1	<i>Näytteenotosta</i>	21
3.3.2	<i>Tuhkan teknisen laadun testaus</i>	21
3.3.3	<i>Tuhkien sisältämät haitalliset aineet</i>	22
3.3.4	<i>Tuhkan laatu ja sen varmentaminen</i>	22
3.4	Tuhkien hyötykäyttöä rakenteissa	23
3.4.1	<i>Tie- ja katurakenteet</i>	23
3.4.2	<i>Täytöt ja pengerrakenteet</i>	24
3.4.3	<i>Yhdyskunta ja ympäristörakentaminen</i>	24
4	YMPÄRISTÖSUOJELULAINSÄÄDÄNTÖ	25
4.1	Jätelaki	25
4.2	Ympäristösuojelulaki	26
4.3	Maaperän pilaamiskielto	27
4.4	Ympäristökelpoisuus	28
5	LABORATORIOTULOKSET	29
5.1	Lähtökohdat	29
5.2	Tutkimusmenetelmät	29
5.3	Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	32
5.4	Stabiloituvuustutkimukset	33
5.5	Johtopäätökset	33

6 YHTEENVETO

38

VIITELUETTELO

40

1 JOHDANTO

Rakennusteollisuudessa hyvänlaatuisen kiviaineksen saatavuus on vaikeutunut ja kiviaineksen hinta on nousussa jatkuvasti pidentyvien kuljetusmatkojen johdosta. Kiviainesten louhintaa rajoittavat pohjavesialueet ja sen aiheuttamat ympäristölliset haittavaikutukset, kuten pöly, melu ja vaikutukset maisemaan. Tämän vuoksi tulisi suosia kiviaineksia korvaavaa teollisuuden sivutuotteita hyödyntävää toimintaa, eli uusiomaarakentamista. Tässä työssä keskitytään tuhkien hyötykäyttöön maarakentamisessa ja erityisesti stabilointi työmailla. Stabiloinnissa tuhkalla voidaan korvata yleisesti käytettyjä sideaineita, kuten kalkki- sementtiseosta. Kokemukset tuhkien hyötykäytöstä maarakentamisessa on osoittanut, että niiden avulla voidaan saavuttaa myös merkittäviä taloudellisia säästöjä. [1, s. 1.]

Vuositasolla Suomessa syntyy energiantuotannosta ja metsäteollisuudesta noin 500- 900 tuhatta tonnia tuhkaa. Näistä tuhkista lentotuhkan osuus on noin 580 000 tonnia ja pohjatuhkia ja -kuonia 120 000 tonnia, joista pohjakuonaa noin 10 %. Savukaasujen puhdistettaessa syntyy lisäksi vielä vuosittain noin 200 000 tonnia rikinpoistonlopputuotteita. [1, s. 1.]

Osa näistä sivutuotteina syntyvistä tuhkista voidaan hyödyntää rakennusteollisuudessa mm. sementin valmistuksessa tai kipsilevyjen valmistuksessa. Myös maarakentamisen osalta näiden sivutuotteiden hyötykäytön edellytykset ovat hyvät. [1, s. 1.]

2 MAAPERÄ

Maaperällä tarkoitetaan kallioperää peittävää irtomaakerrosta. Suomessa maaperän paksuus on keskimäärin 10 metriä. Maaperä vaihtelee täysin paljaasta kalliosta jopa 100 metrin syvyyteen. [12.]

Maaperä koostuu pääosin erirakeisista kivennäis- ja eloperäisistä maalajeista. Maaperä sisältää vaihtelevasti kivennäismaalajeja ja välillä yksinomaan kasvien jäänteistä peräisin olevaa eloperäistä maata. Useimmissa tapauksissa maaperä on kuitenkin sekä kivennäis- että eloperäisten aineiden sekoitus. Maaperään voidaan katsoa kuuluvaksi myös siinä oleva ilma ja vesi. Pääosa Suomen maalajeista on syntynyt jääkauden loppuvaiheessa tai sen jälkeen. Maalajit jaetaan syntytapansa perusteella kivennäismaalajeihin ja eloperäisiin maalajeihin. [12.]

Maalajit ryhmitellään syntyvän mukaan eri maalajiryhmiin. Ryhmät eritellään niiden sisältämän eloperäisen eli orgaanisen aineksen ja kivennäisaineksen eli raekoostumuksen perusteella. [12.]

Maalajiluokitus tarkoittaa maa-aineksen luokittelemista eri maalajeiksi, eri maalajien määrittelyä ja luokittelua eri maalajiryhmiin. Eri aloilla käytetään erilaisia maalajiluokituksia. Rakennusteknisiä tarpeita varten on luotu geotekninen maalajiluokitus. Geoteknisen maalajiluokituksen tulee korvaamaan lähitulevaisuudessa uusi eurokoodin mukainen luokitus. [3, s. 56.]

2.1 Geotekninen maalajiluokitus

Rakennustekniikan tarpeita varten on Suomessa käytetty 1970-luvulta lähtien geoteknistä maalajiluokitusta. Geoteknisen maalajiluokituksen (Geoluokitus) perusteina ovat maalajin geologinen syntytyapa, humuspitoisuus ja rakeisuus. Maalajit jaetaan rakeisuuden sekä humuspitoisuuden perusteella maalajiryhmiin. [3, s. 56.]

Taulukko 1. Geoteknisen maalajiluokituksen maalajiryhmät. [3, s. 57]

Maalajiryhmä	Lyhenne	Koostumus
Eloperäiset maalajit	E	Koostuvat olennaisesti eloperäisestä maa-aineksesta (humusta >20% pelkän kiviaineksen massasta)
Hienorakenteiset kivennäismaalajit	H	Koostuvat lajittuneesta hienorakeisesta maa-aineksesta. Hienorakeisuus <0,06mm >50%. Humusta <20% pelkän kiviaineksen massasta.
Karkearakenteiset kivennäismaalajit	K	Koostuvat lajittuneesta karkearakeisesta maa-aineksesta. Hienoainespitoisuus <50%. Humusta <20% pelkän kiviaineksen massasta.
Moreenimaalajit	M	Koostuvat lajittumattomasta, sekä hienoja että karkeita rakeita sisältävästä maa-aineksesta.

Maa-aineksen raekoko selvitetään seulomalla se laboratoriossa kuiva- tai hienorakeisemman maalajin osalta areometrillä. Kun seulonnan tuloksista piirretään graafinen käyrä eli rakeisuusikäyrä, nähdään minkä raekoon kohdalle osuu läpäisyprosentti 50. Tämä raekoko eli keskiläpimitta ilmaistaan tunnuksella d_{50} . Raekokosuhde C_u on raekoko läpäisyprosentin 60 kohdalla jaettuna raekoolla läpäisyprosentin 10 kohdalla eli d_{60} / d_{10} . Maalaji on tasarakeinen, jos sen raekokosuhde on ≤ 5 ; sekarakeinen, jos sen

raekokosuhde on $>5 \dots 15$; suhteistunut, jos sen raekokosuhde on >15 . [3 s. 55-56.]

Taulukko 2. Kivennämaalajien lajitteet ja rakeet. [3, s. 58]

Päälajite		Alalajite	Rakeidenläpimitta mm
Nimi	Lyhenne		
Savi	Sa		$<0,002$
Siltti	Si		0,002-0,06
	hSi	Hienosiltti	0,002-0,06
	keSi	Keskisiltti	0,06-0,02
	kaSi	Karkea siltti	0,02-0,06
Hiekka	Hk		0,06-2,0
	hHk	Hienohiekka	0,06-2,0
	keHk	keskihiekka	0,2-0,6
	kaHk	Karkea hiekka	0,6-2,0
Sora	Sr		2,0-60,0
	hSr	Hienosora	2,0-6,0
	keSr	Keskisora	6,0-20,0
	kaSr	Karkea sora	20,0-60,0
Kivet	Ki		60-600
	pKi	Pienet kivet	60-200
	sKi	Suuret kivet	200-600
Lohkareet	Lo	-	>600

Maalajia nimettäessä todetaan ensin onko maa-aineksessa yli vai alle 20 painoprosenttia eloperäistä ainesta. Seuraavaksi tutkitaan kivennäismaalajien läpäisyprosenttia 50 vastaava raeläpimitta d_{50} . Savet nimetään savilajitteen määrän perusteella. Lopuksi katsotaan taulukon lajitepitoisuusehtoihin sopiva nimi. Moreeneiksi kutsutaan jääkauden aikana syntyneitä lajittumattomia kivennäismaalajeja. Moreenit jaetaan d_{50} -menetelmällä siltti-, hiekka- ja soramoreeneihin. [3, s. 63.]

Hiekan ja hiekkamoreenin välillä taulukko ei ole yksiselitteinen, joten niiden välillä täytyy tarkastella myös syntytapaa. Lisämääreitä ovat maalajin

kivisyys, lohkaraisuus ja turpeen maatuneisuus. Tietoa tarvitaan maalajien käyttöä ja kaivutöitä varten. [3, s. 63.]

Eloperäisiä maalajeja ovat turve ja lieju. Turve sisältää maatumisasteeltaan vaihtelevaa kasvien jätettä. Orgaanista ainesta on vain liejusavissa sekä maapeitteiden pintaosissa humuskerroksena. Lieju koostuu kasvi- ja eläinjätteistä sekä hienorakeisista kivennäisaineista. Liejun humuspitoisuus on yli 20%. [3, s. 63.]

Taulukko 3. Raekooltaan alle 60 mm aineksen nimitykset maalajiryhmittäin. [3, s. 59]

Maalajiryhmä	Maalaji	Lyhenne	Raekoko d ₅₀ ,mm	Lajitepitoisuus % kuivamassasta		
				Savi <0,002 mm	Hieno- aines <0,06mm	Sora 2-60 mm
Eloperäiset maalajit (E)	Turve Lieju	Tv Lj				
Hienorakeiset kivennäis- maalajit (H)	Savi Siltti	Sa Si	< 0,002 0,002- 0,06	≥ 30 < 30	≥ 50	< 5
Karkearakeiset kivennäis- maalajit (K)	Hiekka Sora	Hk Sr	0,06-2 2-60		< 50 < 5	< 50 ≥ 50
Moreeni- maalajit (M)	Siltti- moreeni Hiekka- moreeni Sora- moreeni	SiMr	< 0,06		> 50	≥ 5
		HkMr	0,06-2		5-50	5-50
		SrMr	> 2		≥ 5	> 50

Maalajeja kuvailtaessa voidaan käyttää apuna myös niiden rakeiden muotoa, plastisuutta, tiiviyyttä, leikkauslujuutta, konsolidaatiotilaa, sen vesipitoisuutta ja routivuutta [12].

2.2 Stabilointi

Stabilointimenetelmän tarkoituksena on saavuttaa halutulle alueelle massarakenne, jolla parannetaan pehmeikön kantavuutta. Stabiloinnissa voidaan erottaa kaksi eri menetelmää; massastabilointi ja pilaristabilointi. Menetelmän avulla pyritään parantamaan pehmeikköjen geoteknisiä ominaisuuksia ja korvataan pehmeiden maakerrosten massanvaihto tai mahdollinen paalulaatta. Näin saadaan lisättyä pehmeikön kantavuutta, pienennetään painumia tai tasoitetaan painumaeroja. Menetelmää käytetään eniten häiriintymisherkkien ja runsaasti kokoonpuristuvien kerrosten vahvistamiseen.[13 s. 1.]

2.3 Massastabilointi

Massastabiloinnilla tarkoitetaan savikerroksen sekoittamista tai kaivuu- ja ruoppausmassojen sekoittamista siten, että lopputuloksena syntyy lujittuva massarakenne. Massastabilointi on menetelmä, jossa kaivinkoneeseen asennetulla hydraulisella sekoitinlaitteistolla maa-ainekseen sekoitetaan sideaine, joka yleensä on sammuttamaton kalkki ja sementtipohjainen tuote. Sideaine sekoitetaan saven, siltin tai turpeen kanssa siten, että lopputuloksena syntyy sideaineen ja pehmeänkerroksen muodostama lujittuva homogeeninen massa, joka toimii kuormia jakavana ”laattana”. Massastabilointia käytetään pääsääntöisesti 1-5 m paksun turve- tai liejakerrosten stabilointiin. [7 s. 1.]

Massastabiloinnin pääasiallisia käyttökohteita ovat:

1. penkereiden perustaminen
2. putkijohtojen perustaminen
3. leikkauspohjan vahvistaminen



Kuva 1. Stabilointikerrokset. [11]

Stabiloidun saven käytöllä täyttötöissä, saavutetaan seuraavia etuja [7 s.1, 50-52.]:

1. savimassojen kuljetustarve vähenee
2. luonnonkiviaineksen tarve rakentamisessa vähenee
3. läjitysalueiden tarve vähenee
4. haitalliset aineet (savessa, sivutuotteissa ja stabilointiaineessa) sitoutuvat massaan.

Rakennustoiminnassa syntyy ylijäämämassoja, jos kaivumassoja ei voida käyttää rakenteilla olevassa kohteessa. Tämä voi johtua kaivumassojen laadusta tai epätasapainosta massataloudessa. Tyypillisesti ylijäämämassoja syntyy kaivutöistä savialueilla, massanvaihdosta tai ruoppaustöiden yhteydessä. Ylijäämämassojen sijoituspaikka on usein viranomaisten osoittama läjityspaikka, joka useimmiten on rakennettu täyttömäeksi. Liettyvien ja heikosti kantavien maamassojen sijoittaminen täyttömäkeen vaatii kuitenkin erikoistoimenpiteitä, jotta mäen stabiliteetti saadaan riittäväksi. Liettyvät massat ajetaan esimerkiksi louheesta rakennettuihin altaisiin, peitetään allas suodatinkerroksella ja rakennetaan päälle uusia allaskerroksia. Stabilointimenetelmistä massastabilointi on kalliimpi kuin pilaristabilointi. Massastabiloinnissa myös lujuserot voi olla suuria.[7 s. 1.]

Ruoppausmassojen sijoittaminen Helsingin kaupungin alueella ei ole toistaiseksi muodostunut ongelmaksi, koska käytettävissä on ollut meriläjitysalueita kohtuullisen matkan päässä. Ruoppausmassojen läjittämistä merialueille rajoittaa niiden sisältämät haitta-aineet esim. Vuosaaren satamahankkeen 2003 - 2009 aikana ruopatut pilaantuneet massat jouduttiin stabiloimaan satama-alueelle.

2.4 Pilaristabilointi

Pilaristabiloinnissa pilarointikoneen sekoitinkärki upotetaan pilarin suunnitellun alapään tasoon ja sideaineen syöttö ja pilarin sekoitus aloitetaan yleensä sekoitinta ylös vedettäessä. Suomessa on käytetty lähes yksinomaan

kuivamenetelmää, jossa jauhemainen sideaine syötetään paineilmaa käyttäen. Muun muassa Japanissa yleinen märkämenetelmä on Suomessa ainakin toistaiseksi rajoittunut muutamaankin kokeiluun. Esimerkiksi arabianrannassa on testattu märkämenetelmää. [8 s. 9.]

Pilarin halkaisijana on käytetty 500-800 mm. Yleisimpiä ovat 1990-luvun alkupuolelta asti olleet 600- 700 mm pilarit. Mitä suurempi pilarin halkaisija on, sitä vaikeammaksi voi tulla kovan kuivakuorikerroksen tai muiden lujien maakerrosten läpäisy. Suurilla pilarihalkaisijoilla saattaa myös tulla ongelmalliseksi saada sideaine jakautumaan tasaisesti koko pilarin poikkileikkaukselle. Pilarin maksimipituus nykyisellä kalustolla on noin 18-20 m, mutta maksimia lähentelevät pilaripituudet ovat harvoin taloudellisia. [8 s. 9.]

Sideaineen sekoituksella on suuri merkitys pilarin lujuuteen ja tasalaatuisuuteen. Oleellisimpia asioita ovat sideaineen syötön tasaisuus ja hallittavuus, riittävän tehokas sekoitustyö sekä paineilman käytön minimointi. Sideaineen syöttömäärä rekisteröidään nykyisin yleensä 0,2 metrin mittaista pilarinosaa kohden. Mittaus perustuu yleensä säiliön massan vähenemiseen sideainetta syötettäessä, mikä asettaa rajoitukset todelliselle mittaustarkkuudelle. Tyypillisiä nykyhetken realistisia vaatimuksia sideaineen syöttötarkkuudelle ovat 5 prosentin poikkeama pilarikohtaisesti ja 8-10 prosentin poikkeama pilarimetrikohtaisesti. Sideaineen syöttömäärää pystytään säätämään syvyysuunnassa, mutta tätä mahdollisuutta on toistaiseksi käytetty harvoin. Tulevaisuudessa syöttömäärän säätämistä syvyysuunnassa tullaan todennäköisesti toteuttamaan enemmän, koska se on taloudellisempaa urakoitsijan näkökulmasta. [6 s. 10.]

Sekoitustyön tehokkuus (terätasokierrosta/pilarimetri) on riippuvainen terän noususta kierrosta kohti ja sekoittimen terätasomäärästä. sekoitustyön tehokkuus = n/nousu kierrosta kohti (1) n on terätasojen määrä sekoitinkärjessä (nykyisin tavallisesti 2-4) terän nousu/kierros (nykyisin

yleensä 8-15 mm/r). Pilarikoneen terää maahan upotettaessa ilmaa työnnetään suuttimista ulos niiden tukkeutumisen estämiseksi. Tarvittavaa ilmamäärää voidaan pienentää esimerkiksi terän nopealla upottamisella sekä mahdollisesti myös kehittämällä suljettavat suuttimet. Sekoitustyön aikana syöttöpaine pyritään pitämään siinä minimiarvossa, jolla sideaine juoksee häiriöttä. Suuret pilarointisyvyydet lisäävät tarvittavaa painetta. Työssä noudatettava paine määritetään ennen varsinaisen työn aloitusta. Pilariin syötetyn ilman poistumista voidaan edistää käyttämällä nelikulmaista sekoittimen tankoa. [6 s. 10.]

Pilaristabiloinnin pääasiallisia käyttökohteita ovat:

1. tie- ja katupenkereet
2. putkijohtojen kaivannot
3. pumppaamot
4. luiskan lujitus



Kuva 2. Pilaristabilointikone

2.5 Stabiloinnissa käytettävät sideaineet

Suomessa ja muualla maailmalla on kokeiltu ja testattu useita erilaisia stabiloinnin side- ja aineyhdistelmiä. Aineista osa on teollisesti valmistettuja ja osa teollisuuden sivutuotteita. Maailmanlaajuisesti eniten käytetyt stabilointiaineet ovat kalkki ja sementti. Yleisesti käytettyjä teollisuuden sivutuotteita ovat esimerkiksi kivihiilen lentotuhka ja terästeollisuuden kuonat. Teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä stabiloinnissa sekä yhdistämistä edellä mainittuihin sideaineisiin on kokeiltu useissa hankkeissa kustannusten pienentämisen toivossa. Sivutuotteiden käytön lisäämisellä halutaan myös vähentää kaato- ja läjityspaikoille päätyvän jätteen määrää. [10 s. 22.]

Yleisesti stabiloinnin tarkoituksena on kasvattaa maan lujuutta. Lujuuteen vaikuttavat käytetty sideainetyyppi sekä stabiloitavan maaperän ominaisuudet. Lisäksi lujuuden kehitykseen vaikuttavat sideainemäärä, lujittumisaika, sekoitustapa ja -aika, lämpötila sekä lujittumisaikana vaikuttava jännitys. Maaperä lujittuu, kun maan huokostila täyttyy sideaineen ja maan reaktiossa syntyvistä reaktiotuotteista. Teoriassa syntyvien reaktiotuotteiden määrästä voidaan arvioida stabiloidun maaperän lujuus. Arvio on kuitenkin vain suuntaa-antava; maaperässä saattaa olla kemiallisia reaktioita edistäviä tai hidastavia kemikaaleja ja samantyyppiset reaktiotuotteet saattavat olla erilaisia lujuuksiltaan. Lisäksi sideaineet reagoivat eri tavalla suhteessa maaperään. [10 s. 22.]

Sideaineen vaikutus maaperän vedenläpäisevyyteen riippuu sideaineen vaikutustehosta, lujittumisajasta, stabiloidun massan rakenteesta ja olosuhteista. Laboratoriossa ja kentällä saadut vedenläpäisevyydet saattavat poiketa erittäin paljon toisistaan ja laboratoriossa saatua arvoa voidaankin pitää alarajana. Heti sideaineen sekoittamisen jälkeen ioninvaihdosta johtuva kokkaroituminen saattaa aiheuttaa vedenläpäisevyyden kasvua maamassassa.

Reaktiotuotteiden määrän kasvaessa ja maan huokostilan täytyessä maan lujuus kasvaa ja usein vedenläpäisevyys pienenee samassa suhteessa. Sideaineiden lisääminen maaperään aiheuttaa myös mm. maan vesipitoisuuden laskua. Vesipitoisuuden pienenemisen aiheuttavat maahan sekoitettavat sideainepartikkelit ja veden sitoutuminen kemiallisissa reaktioissa. Vettä saattaa myös haihtua pieniä määriä sideaineen sekoitusprosessin aikana. Muita sideainelisäyksen vaikutuksia ovat esimerkiksi muodonmuutosominaisuuksien sekä juoksu- ja plastisuusrajan muuttuminen ja maan tiheyden kasvu. [10 s. 24.]

Teknisten seikkojen lisäksi sideainevalintaan vaikuttavat taloudelliset ja ympäristölliset syyt. Yksi sideaine ei välttämättä tuota parhaita tuloksia kaikkialla, vaan tulos vaihtelee maatyypin mukaan. Paras sideaineyhdistelmä ei myöskään aina ole se, joka tuottaa nopeimmin suurimman lujuuden. Kun stabiloidun maan lujuus on pienempi, maa-aines saattaa esimerkiksi toimia paremmin suhteessa ympäröivään stabiloimattomaan maahan. Myös stabilointituloksen kestävyys vaikuttaa sideainevalintaan, erityisesti alueilla, joilla on voimakkaasti virtaavaa pohjavettä. [10 s. 24.]

2.5.1 Kalkkisementti

Kalkin käytöstä savien stabiloimiseen on olemassa runsaasti kokemusta. Kalkkipilarimenetelmä otettiin käyttöön Ruotsissa 1970-luvun loppupuolella. Kalkkia käytetään myös pintastabilointiin, sillä vahvistetaan mm. teiden ja rautateiden pohjia. [10 s. 29.]

Kalkissa vain oksidi- (CaO) ja hydroksidi- ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) muodossa oleva osa reagoi stabiloinnissa. Näiden yhdisteiden pitoisuutta kutsutaan kalkin aktiiviseksi CaO -pitoisuudeksi. Poltettu kalkki valmistetaan kalsiumkarbonaatista (CaCO_3) kalsinoimalla noin 1000°C lämpötilassa. Polton jälkeen rakeinen kalkki jauhetaan haluttuun hienousasteeseen. Kalkki sitoo lujittumisprosessin yhteydessä voimakkaasti vettä ja samassa prosessissa kehittyy voimakkaasti lämpöä. Varsinainen lujuus kehittyy

hydratoituneen kalkin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin reagoiessa maaperän aluminaattien ja silikaattien kanssa potsolaanireaktiossa. Kalkin hyvä puoli stabilointirakenteen kannalta on, että epähomogeeninen massa lujittuu ajan myötä. [10 s.29.]

Sementillä ja kalkilla stabiloitua maa-ainesta voidaan käyttää mm. tienrakennuksessa ja kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa. Jo hyvin pienet sementtipitoisuudet, esimerkiksi alle kaksi prosenttia maa-aineksen painosta, muuttavat maan ominaisuuksia. Sementtipitoisuuden ollessa viidestä kymmeneen prosenttia, maa käyttäytyy kuin betoni. Sementtistabilointi muun muassa kasvattaa maan lujuutta ja kantokykyä, sekä jäätymiskestävyyttä. [10 s. 24.]

Sementti on hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa muodostaen lujittuvaa massaa. Tavallisimmin käytetty sideainesementti on Portland-sementti. Se valmistetaan Portland-klinkkeristä ja kipsistä. Klinkkeri tehdään kalkista ja savesta, sintraamalla seos noin 1450 °C. Klinkkeriin sekoitetaan noin 5 prosenttia kipsiä ja seos jauhetaan 1...100 mikrometrin partikkelikokoon. Sementin ominaispinta-ala on tällöin noin 300...550 m²/kg. Sementin reaktiivisuus on sitä suurempi, mitä suurempi sen ominaispinta-ala on. Sementin tiheys on 1,2 t/m³. Näistä kaksi kalsiumsilikaattia ovat tärkeimmät stabiloitumisen kannalta. Kun sementti sekoitetaan maa-ainekseen, ensimmäisenä alkavat reaktiot sementin ja maan sisältämän veden välillä. Seoksen pH kasvaa noin kolmeentoista, kun reaktioissa muodostuu kalsiumhydroksidia. [10 s. 25.]

Kun sementtiä käytetään sideaineena, yksi tärkeimmistä parametreista on sekoitettavan massan vesi-sementtisuhde (kg/kg). Hydrataatiossa muodostuva kalsiumsilikaattihydraattigeeli täyttää reaktion edetessä partikkelien välisiä huokosia ja lujittuu vähitellen. Jos vettä on sementtiin nähden paljon, sementtipartikkelien etäisyydet ovat suuret ja muodostuva massa on huokoisempaa ja lujuudeltaan heikompaa kuin pienemmällä

vesisementtisuhteella valmistettu massa. Veden ja sementin reaktion jälkeen stabiloidun maan lujittuminen jatkuu hitaamman potsolaanireaktion vaikutuksesta. Veden ja sementin reaktiossa muodostunut kalsiumhydroksidi reagoi savimaa-aineksen sisältämien alumiini- ja piipitoisten potsolaanimineraalien kanssa. Reaktiossa muodostuu joko kalsiumaluminaattisilikaattihydraattia tai kalsiumsilikaattihydraattia riippuen maan sisältämän aluminaatin määrästä. Sementin ja veden reaktiossa syntynyt lämpö edistää potsolaanireaktiota. On esitetty, että maa-aineksen vedenläpäisevyys pienenee sementtistabiloinnin vaikutuksesta, lukuun ottamatta savisia maita, joissa sementin lisäys aiheuttaa vedenläpäisevyyden kasvua. Uudemmissa tutkimuksissa on raportoitu seitsemän päivän vedenläpäisevyyden sementillä stabiloidussa savessa olevan merkittävästi suurempi kuin 28 päivän vedenläpäisevyys. Sementtiä käytetään sideaineena paitsi yksinään, myös monien sideaineiden lisänä. Sementtiä käytetään erityisesti kalkin kanssa, mutta sitä lisätään myös aktivaattoriksi teollisuuden sivutuotteita hyödynnettäessä. [10 s. 28.]

2.5.2 Sivutuotteet

Teollisuuden sivutuotteista on kokeiltu kivihiiivoimalaitosten rikinpoiston lopputuotetta, lentotuhkaa, lannoiteteollisuudessa syntyvää jätekipsiä sekä terästeollisuuden masuunikuonaa. Aikaisemmin syvästabiloinnin yhteydessä on saatu myönteisiä kokemuksia jätekipsin lujuutta lisäävästä vaikutuksesta kalkin kanssa. Koska jätekipsiä on saatavissa ainoastaan Uudestakaupungista ja Siilinjärveltä, ei kuljetusmatkojen takia ole harkittu kipsin käyttöä stabilointiaineena Helsingissä. Stabiloituvuuskokeiden perusteella kipsi soveltuu kalkin ohella massastabilointiin silloin kun kuljetusetäisyydet pysyvät kohtuullisina.

Masuunikuona, MaKu

Masuunikuonaa on kokeiltu toisaalta sen potsolaanisten ominaisuuksien ja aikaisemmin selvityksissä havaitun haitallisia aineita sitovan vaikutuksensa vuoksi. Masuunikuonalla ei Helsingin kaupungin koekohteissa tehdyissä

tutkimuksissa ollut toivottua vaikutusta savien stabiloitumiseen. [4 s. 4] [10 s. 37.]

Lentotuhka, LT

Kivihiilen polton lentotuhkan käyttö sellaisenaan ei aikaisempien tutkimusten mukaan sovellu stabilointiin, mutta muutamat kokeet kalkin kanssa ovat viitanneet rohkaisevaan suuntaan. Jotta lentotuhkaa voitaisiin käyttää stabiloinnissa, vaatisi se jatkoselvityksiä. [1 s. 3] [7 s. 3.]

Rikinpoistotuote, RPT

Kivihiilivoimalaitosten rikinpoistotuote on muodostunut jäteongelmaksi, koska toistaiseksi tuotteelle ei ole löytynyt kaupallista hyötykäyttömahdollisuutta. Toisaalta rikinpoistotuote on myös ympäristöviranomaisten mukaan määritelty haitallisia aineita sisältäväksi, joten sen käyttö on myös kielletty esimerkiksi vesistökohteissa. Aikaisempien tutkimusten mukaan rikinpoistotuote heikentää stabiloidunmassan lujuutta sementin kanssa, mutta lisää lujuutta merkittävästi kalkin kanssa. [1 s. 4] [7 s. 3.]

2.6 Stabilointitutkimukset

Stabiloinnin alkaessa täytyy ensiksi selvittää kohteessa vallitsevat pohjaolosuhteet. Pohjaolosuhteita varten selvitetään normaalin pohjatutkimuksen tapaan paino- ja siipikairaus, joilla selvitetään maakerrosten paksuuksia ja lujuusvaihteluja. [6 s.11] [9.]

Tutkimuksia varten valitaan mahdollisimman hyvin kokonaisuutta kuvaavat näytteenottopisteet. Näytteenottopisteet valitaan kerrosten vaihtelevuuden perusteella. [6 s. 11] [9.]

Näytteistä tutkittavia ominaisuuksia ovat maalajin rakeisuus, vesipitoisuus, humuspitoisuus, tilavuuspaino, pH ja leikkauslujuus. Tehtyjen tutkimusten ja paino- sekä siipikairausten perusteella voidaan määrittää stabiloituvuus syvyydet. [6 s. 11] [9.]

3 TUHKAT

Kivihiilen pohjatuhkasta ja kuonasta hyötykäytetään noin 80 prosenttia muun muassa maarakentamisessa ja rakennusteollisuudessa. Suomessa syntyvä kivihiilen tuhka on lähes yksinomaan niin kutsuttua ”pölypolton tuhkaa”, jolloin suurin osa tuhkasta on lentotuhkaa >80 prosenttia. Kivihiilen lentotuhkan hyötykäyttöaste on keskimäärin noin 60 prosenttia vuosittain. Esimerkiksi 1997 lentotuhkan hyötykäyttö oli jopa noin 84 prosenttia ja pohjatuhkan sekä kuonan 78 prosenttia. Tästä hyötykäytöstä noin 70 prosenttia käytetään maarakentamisessa ja loput sementti-, betoni- ja asfalttiteollisuudessa. [1 s. 2.]

Koko maailmassa kivihiilen poltossa syntyy vuosittain vajaat 500 miljoonaa tonnia, joista hyötykäytetään runsaat 30 prosenttia. Suurimpia hyötykäyttöalueita ovat kaivos- ja pengertäyttö sekä kaatopaikkarakentaminen, jotka muodostavat yhteensä noin 50 prosenttia. Sementti- ja betoniteollisuudelle kuuluu 30 prosenttia. Tie- ja vastaavaan rakentamiseen kivihilituhkia on käytetty vajaat 8 prosenttia koko hyötykäytetystä määrästä. Euroopassa suurimmat hyötykäyttäjät ovat Hollanti, Saksa ja Ranska, joissa pääosa tuhkista menee sementti- ja betoniteollisuudelle. Hyötykäyttöön vaikuttavat käyttökohteeseen liittyvät tekniset vaatimukset, kysynnän ja tarjonnan yhdenmukaisuus, kuljetus ja varastointitarpeet, erilaiset taloudelliset tuet, kilpailevien materiaalien saatavuus ja hinta sekä markkinoilla ja viranomaisten piirissä vallitsevat asenteet etenkin ympäristöriskien suhteen. [1 s. 2.]

3.1 Energiateollisuuden tuhkat

3.1.1 Kivihiilen polton lentotuhka, LT



Kuva 3. Kivihiilen polton lentotuhka, LT [19]

Lentotuhka on jauhemaista, erikokoisista pallomaisista hiukkasista ja pienistä neulasmaisista kiteistä koostuvaa materiaalia. Sen ominaisuuksiin vaikuttavat kivihiilen laatu, hiilipölyn hiukkaskoko, polttotekniikka ja poltto-olosuhteet. Hyötykäyttöä ajatellen sen ominaisuuksiin vaikuttaa lisäksi

Kemiallinen yhdiste	paino- %
Piioksidi, SiO_2	45-55
Alumiinioksidi, Al_2O_3	20-30
Rautaoksidi, Fe O_3	8
Kalsiumoksidi, CaO	4
Magnesiumoksidi, MgO	3
Kaliumoksidi, K_2O	1
Natriumoksidi, Na_2O	0-2

välivarastointitapa ja aika. [1 s. 3] [4 s. 3.]

Taulukko 4. Lentotuhkan kemiallinen koostumus [1 s. 4]

3.1.2 Kivihillen polton pohjatuhka, PT

Pohjatuhka on väriltään ruskean harmaata ja vastaa rakeisuudeltaan karkeaa hiekkaa tai soraa. Rakeisuus on 1,5 – 5 millimetriä. Pohjatuhka ei ole potso-
laaninen materiaali, joten se ei lujitu samaan tapaan kuin lentotuhka. [1 s. 4.]

Taulukko 5. Pohjatuhkan kemiallinen koostumus.[17 s. 54]

Kemiallinen yhdiste	paino- %
Piiksid	3,1...57
Alumiinioksid	2,5...29
Magnesiumoksid	1...25
Kalsiumoksid	5...30
Rautaoksid	0...36
Titaanioksid	0,1...4
Natriumoksid	0...6
Kaliumoksid	0,3...7
Sulfiitti	0,06...0,23
Fosforioksid	1...11
S	0,12...3
Cl	0...1
F	< 0,01
Bariumoksid, BaO	0,1- 0,6
Mangaanioksid, MnO	0,1...0,5
Si	35
Al	8
Fe	20
Ca	4...10
Mg	0,29...1,3
K	0,29...3,1
Hehkutushäviö	2...15

4.1.3 Kivihillen polton rikinpoiston lopputuote, RPT

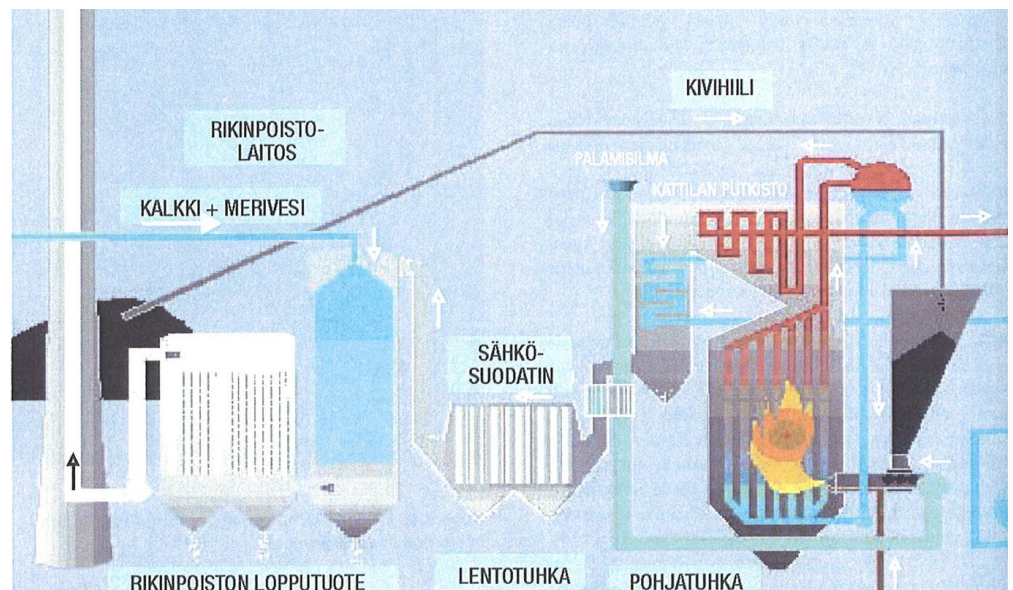
Puolikuivan rikinpoiston lopputuote koostuu pääasiassa kalsiumsulfaatista ja sulfiitista sekä pienistä määristä reagoimatonta kalkkia (kalsiumhydroksidi), kalsiumkarbonaattia ja kloridia. Lisäksi se sisältää pieniä määriä muita yhdisteitä ja alkuaineita, kuten raskasmetalleja. Maarakennusmateriaaleihin sitä suositellaan käytettäväksi korkeintaan 15 prosenttia massan kuiva-

ainepitoisuudesta, ellei rakentaminen tapahdu meren läheisyydessä. [1 s. 4][17 s. 54.]

Taulukko 6. RPT:n kemiallinen koostumus [17 s. 51]

Kemiallinen yhdiste	Paino- %
Kalsiumsulfaatti, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15
Kalsiumsulfitti, $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	50-70
Kalsiumhydroksidi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	20
Kalsiumkarbonaatti, CaCO_2	5
Kalsiumkloridi, CaCl_2	0,5-3
Lentotuhka	1

Rikinpoiston lopputuote on kuivaa jauhetta, johon esierottimen tehokkuudesta riippuen sekoittuu jonkin verran lentotuhkaa. Väri vaihtelee vaaleasta kellertävän ruskeaan, riippuen käytetystä hiilestä ja absorbentista. Raemuoto on pääasiassa pyöreä. Rakeiden pinnalle on kiinnittyneenä pienempiä kalsiumoksiidi ja hydroksidihiukkasia. Rakeisuudeltaan tämä RPT vastaa silttiä. Se on lajittumaton ja ylimääräisen veden vaikutuksesta liettyvä materiaali. [1 s. 4] [7 s. 3.]



Kuva 4. Tuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen muodostuminen kivihiilen polttoprosessissa [17 s. 50]

3.2 Metsäteollisuuden tuhkat

Turvetuhkaa syntyy jyrshinturvetta polttavissa voimalaitoksissa, joissa polttoaineena käytetään usein jäteliemiä ns. mustalipeää. Mustalipeä on puusta liuottamalla saatua jäteliöntä, jota hyödynnetään polttoaineena voimalaitoksissa. Monet laitokset käyttävät turpeen, puun ja mahdollisesti muiden polttoaineiden seoksia. Tuhkan koostumus vaihtelee polttokattilasta ja polttoainekoostumuksesta riippuen. Hyötykäyttöarvoa heikentäviä tekijöitä ovat esimerkiksi alkalisuus ja sulfaattipäästöt, jonkin verran myös liukenevat metallit. Ympäristöominaisuuksiltaan turvetuhka voi soveltua päällystettyihin tierakenteisiin, jos se on teknisesti käyttökelpoista eikä sisällä runsaasti liukenevaa sulfaattia.

Turvetuhkan käyttösuositus:

Metsäteollisuuden tuhkien ominaisuudet poikkeavat kivihiilituhkista ja laatu saattaa käytetystä polttoaineesta riippuen vaihdella näitä enemmän. Metsäteollisuuden tuhkat ovat usein peräisin seospolttoaineita käyttävistä voimalaitoksista. Polttoaine voi sisältää turvetta, puuta, puun kuorta, öljyä, kivihiiltä ym., minkä vuoksi koostumus ja liukoisuusominaisuudet voivat vaihdella ja käytettävyys on selvittävä tarkemmin. Samaa polttoainetta käyttävän laitoksen tuhkien laatu on luonnollisesti tasaisempaa. Puutuhka voi kuivana olla myös reaktiivisempaa, kuin kuiva kivihiilituhka. Tuhkien ympäristökelpoisuus ja soveltuvuus käyttökohteeseen on arvioitava tapauskohtaisesti. Tuotanto on usein ympärivuotista. Puutuhkia on käytetty kokeilukohteissa sideainesekoitteissa. Metsäteollisuuden tuhkat soveltuvat käytettäväksi kuivissa penkereissä, kun materiaalilta ei edellytetä routimattomuutta. Kokeilukohteissa niiden käytettävyys on selvitettävä ja arvioitava tapauskohtaisesti. [15 s. 47] [17 s. 56.]

Taulukko 7. Metsäteollisuuden turvetuhkat (eri laitosten) kemiallinen koostumus. [17 s. 56]

Kemiallinen yhdiste	paino- %
Piioksidi	3,1...57
Alumiinioksidi	2,5...29
Magnesiumoksidi	1...25
Kalsiumoksidi	5...30
Rautaoksidi	0...36
Titaanioksidi	0,1...4
Natriumoksidi	0...6
Kaliumoksidi	0,3...7
Sulfitti	0,06...0,23
Fosforioksidi	1...11
S	0,12...3
Cl	0...1
F	< 0,01
Bariumoksidi, BaO	0,1- 0,6
Mangaanioksidi, MnO	0,1...0,5
Si	35
Al	8
Fe	20
Ca	4...10
Mg	0,29...1,3
K	0,29...3,1
Hehkutushäviö	2...15

3.3 Ympäristöominaisuudet

Tuhkan karakterisoinnilla tarkoitetaan haitta-aineiden kokonaispitoisuuksien ja pitkäaikaisliukoisuuksien kertaluonteista määrittämistä. Karakterisointitestit tehdään otettaessa tuhkaa ensimmäisen kerran maanrakennuskäyttöön ja aina silloin, kun tuhkan ominaisuudet muuttuvat oleellisesti. Tuhkan ominaisuudet voivat muuttua, kun polttoprosessissa tai polttoaineessa tapahtuu tuhkan laatuun vaikuttavia oleellisia muutoksia. [1 s. 10] [6 s. 37] [10 s. 49] [15 s. 23.]

Tuhkan haitta-aineiden kokonaispitoisuudet määritetään kuningasvesiuutosta tai väkevää typpiutosta käyttämällä. Karakterisoinnissa liukoisuustestinä suositellaan käytettäväksi hollantilaisen standardin mukaista kolonitestiä. Jos tuhkaa on aikomus käyttää kiinteytettynä materiaalina, tulee karakterisointi tehdä hollantilaisella diffuusiotestillä. Karakterisointitestin ja sitä täydentävien testien näyttemateriaali on säilytettävä jatkoa varten laadunvalvontaa varten. Näin voidaan laadunvalvontaa varten otettavien aineiden osalta tutkia karakterisointitestin ja laadunvalvonta testin välinen korrelaatio. [1 s.10] [6 s. 37] [10 s. 49] [15 s. 23.]

3.3.1 Näytteenotosta

Tuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen näytteet tulee ottaa kuivina kertanäytteinä niiden siiloista. Näytemääräksi suositeltu määrä on n. 40 litraa. Samasta otetusta näyte määrästä otetaan ympäristö ja teknisen kelpoisuuden testit. Tuhkanlaatu vaihtelee siihen käytettyjen polttoaineiden ja polttoprosessista johtuvista syistä. Tästä syystä samankin voimalaitoksen tuhkat tutkitaan erikseen. [10 s. 64.]

3.3.2 Tuhkan teknisen laadun testaus

Kuivasta lentotuhkasta teknistä laatua seurataan seuraavien määritysten avulla:

Kaikista näytteistä tutkitaan hehkutus häviö (tässä selvitetään orgaanisen aineen pitoisuus) irtotiheys, rakeisuus, optimivesipitoisuus, optimitiiviys ja tiivistettävyyys. Lisäksi tutkitaan aina, kun tuhkaa käytetään lujittuvana materiaalina tai seos- ja sideaineena puristuslujuus 28d lujittumisen jälkeen (potsolaanisuus). Aktiivisen CaO:n määrä rikinpoiston lopputuotteesta tutkitaan reagoivan kalkin määrä ja rikkipitoisuus. [1 s. 19.]

3.3.3 Tuhkien sisältämät haitalliset aineet

Voimalaitosten prosessissa kivihiilen sisältämät epäpuhtaudet, lähinnä raskasmetallit, päätyvät lähes kokonaan lento- ja pohjatuhkaan. Absoluuttisina määrinä metalleja on varsin vähän ja myös tuhkien haitta-ainepitoisuudet ovat suhteellisen alhaiset. Pääosa haitallisista aineista on niukkaliukoisessa muodossa eivätkä ne yleensä muodosta vaaraa ympäristölle. Haitta-aineiden määrät vaihtelevat kuitenkin paljon kivihiilen alkuperästä riippuen ja myös liukoisuuksiin vaikuttavat monet tekijät. Tuhkamateriaalin käyttökelpoisuus ympäristön kannalta on sen vuoksi aina varmistettava. [1 s. 5.]

Kivihiilentuhkan ympäristöominaisuudet tunnetaan varsin hyvin. Tehtyjen tutkimusten perusteella osataan sanoa, että erityistä huomiota on kiinnitettävä arseeniin (As), kromiin (Cr), molybdeeniin (Mo) ja vanadiiniin (V) ympäristöllisen käyttökelpoisuuden varmistamiseksi. [1 s. 5.]

3.3.4 Tuhkan laatu ja sen varmentaminen

Tuhkan laatu vaatimukset jakautuvat kahteen osaan:

1. Tuhkan tekninen laatu (geotekniset ominaisuudet)
2. Tuhkan ympäristöominaisuudet

Tuhkan teknisen laadun eli sen geoteknisten ominaisuuksien perusteella voidaan arvioida sitä, miten tuhkaa voidaan soveltaa eri rakennesovelluksissa. Puolestaan tuhkan ympäristöominaisuuksilla voidaan selvittää sen soveltuvuus ympäristöön. Kummatkin ominaisuudet tulee selvittää ennen tuhkan hyötykäyttöä. Tuhkan laadun vaihtelusta tulee myös olla selvillä ottaen huomioon sen hyödyntämis kohde. [1 s. 7.]

Laadunvalvonnan tulee kattaa sellaiset osa-alueet, joilla on merkitystä suunnitellun rakenteen tekniseen toimivuuteen ja ympäristöön. Seurantaan varten

asetetaan ehdot, jotka heikentyessään saattaisi vaikuttaa merkittävästi kohteen suunnittelu tai lupaperusteiden toteutumiseen. [1 s. 7.]

Laadunvalvonnassa kirjataan kivihiilen alkuperä ja tuhkapitoisuus (ominaisuus joka vaikuttaa lentotuhkan alkuainekonsentraatioon) sekä muut tuhkan laatuun vaikuttavat polttoprosessin tiedot. [1 s. 7] [8 s. 31] [9 s. 7.]

3.4 Tuhkien hyötykäyttöä rakenteissa

3.4.1 Tie- ja katurakenteet

Lentotuhkan ja rikinpoistonlopputuotteen seoksen ja sideainestabiloidun tuhkan käyttö on teknisesti mahdollista kaikissa päällysrakenteen kerroksista suodatinkerroksesta kantavaan kerrokseen. Pelkkää lentotuhkaa voidaan käyttää jakavassa tai alemmissa rakennekerroksissa. Lujittumatonta tai heikosti lujittuvaa kasavarastoitua tuhkaa tai tuhkan ja rikinpoistolopputuotteen seosta on mahdollista käyttää pengertäyhteessä varastointiajasta ja tuhkien ominaisuuksista riippuen. Esimerkiksi Vuosaaren satamassa tehtiin kuuden hehtaarin satamakenttä, missä kantava rakennekerros tehtiin tuhkapohjaisella sideaineseoksella stabiloidusta murskeesta. [1 c-osa] [15 s. 11.]

Suodatinkerroksissa tuhkaa voidaan käyttää kuivilla pohjamailla. Kosteilla ja heikoilla pohjamailla on syytä rakentaa kapillaarisen vedennousun katkaiseva suodatinkerros tuhka rakenteen alle. Pengerrakenteessa penger ja jakava kerros voidaan tehdä yhtenevänä kerroksena. [1 c-osa] [15 s. 11.]

Riittävän lujien lentotuhkan ja rikinpoistonlopputuotteen seoksen sekä stabiloitujen tuhkien käyttö on mahdollista kantavassa kerroksessa. Pelkän lentotuhkan käyttö kantavissa rakenteissa on mahdollista vain poikkeustapauksissa. [1 c-osa] [15 s. 11.]

Hyvin lujittuvilla tuhkillä voidaan tuhkarakenteet suunnitella sitomattomia kiviainesrakenteita ohuempina. Tuhkan kiviainesta pienemmän

lämmönjohtavuuden takia voidaan rakennetta ohentaa myös routamitoituksen kannalta. Päällysrakenteen yläosassa käytettävien tuhkien routimattomuuden tarkistaminen on erityisen tärkeää. [1 c-osa] [15 s. 11.]

3.4.2 Täytöt ja pengerrakenteet

Tuhkat soveltuvat esimerkiksi tukimuurien, siltojen siipimuurien sekä perustusten taustatäyttöihin. Tuhkia voidaan käyttää myös toissijaisissa täytöissä hienojen moreenien, silttien ja savimaiden korvaajina. Myös maisemointitäytöt, maa ja meluvallit sekä patojen tiivisrakenteet ovat mahdollisia tehdä tuhkillä. [1 c-osa] [15 s. 11.]

3.4.3 Yhdyskunta ja ympäristörakentaminen

Lentotuhka soveltuvat erilaisten kunnallistekniikan putkikaivantojen täytemateriaaliksi. Sopiva kaivantojen täyttömäärän lujuus on 1 MPa, jotta kaivantojen myöhempi auki kaivaminen ei liiaksi vaikeudu. Putkien ja johtokaivantojen yhteydessä tulee aina selvittää myös tuhkien käytöstä mahdollisesti aiheutuva korroosioriski. [1 c-osa] [15 s. 11.]

Hyvin lujittuvia tuhkia on mahdollista käyttää rumpujen täytöissä ja siirtymärakenteissa. [1 c-osa] [15 s. 11.]

Merkittävä tuhkarakenteiden hyötykäytön osa-alue on kaatopaikkarakentaminen, jossa tuhkarakenteita on mahdollista käyttää kaatopaikan pintarakenteissa sekä maisemoinnin täytöissä. [1 c-osa] [15 s. 11.]

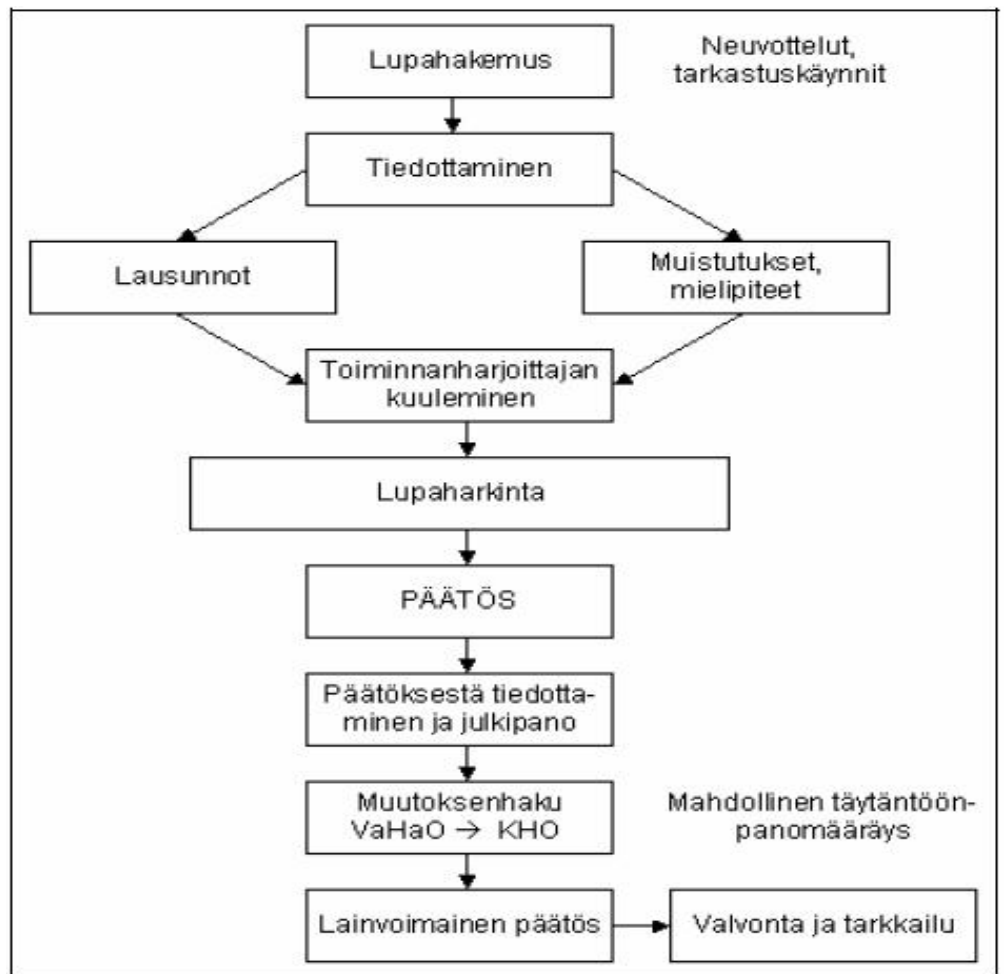
4 YMPÄRISTÖSUOJELULAINSÄÄDÄNTÖ

4.1 Jätelaki

Jätelaki on jätehuoltoa koskeva erityislaki. Siinä käsitellään säännöksiä, joilla pyritään vaikuttamaan jätteen synnyn ehkäisemiseen, jätteiden vaarallisten tai haitallisten ominaisuuksien vähentämiseen, hyödyntämisen edistämiseen ja jätehuollon edistämiseen, roskaantumisen ehkäisemiseen sekä roskaantuneiden alueiden puhdistamiseen. Jätelain tarkoituksena on kehittää luonnonvarojen kestävästä kehitystä ja järkevää käyttöä. Välttämällä jätteiden muodostumista torjutaan niistä aiheutuva vaara terveydelle ja ympäristölle. Jätelain ja ympäristönsuojelulain soveltamisalat ovat usein päällekkäisiä ja toisiinsa kytkeytyneitä. Jätteiden käsittely vaatii usein ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan. Ympäristönsuojelulakia sovelletaan kaikkeen toimintaan, jossa syntyy jätettä tai käsitellään jätettä. [1 s.17] [16.]

Tuhkien hyödyntämiseen jätteenä tarvitaan jätteen käytölle ympäristöluva ammattimaiseen hyödyntämiseen. Valtioneuvosto voi säätää jätteenhyödyntämistä ympäristönsuojeluvaatimuksista ja valvonnasta. Näin toiminta voidaan vapauttaa luvanvaraisuudesta. Tällaisesta toiminnasta on kuitenkin tehtävä ilmoitus alueelliselle ympäristökeskukselle. [1 s.17] [16.]

Sovellettaessa ympäristönsuojelulakia jätteitä hyödyntävään toimintaan on otettava huomioon jätelain säännökset. Ympäristöluva myönnetään, jos toiminta voidaan toteuttaa edellä mainittujen lakien ja säädösten mukaisesti. [1 s.17] [16.]



Kuva 5. Ympäristölupakäsittelyn päävaiheet .[18]

4.2 Ympäristösuojelulaki

Ympäristösuojelulaille säädellään tuhkien hyödyntämistä maanrakentamisessa. Voimassa olleen jätelain tulkintakäytännöksi on muodostunut, että sivutuotteiden maanrakennuskäyttö katsotaan jätteen ammattimaiseksi hyödyntämiseksi ja näin ollen luvanvaraiseksi. Kuitenkin vähäiset tuhkan käytön kohteet katsotaan niin pienimuotoiseksi hyödyntämiseksi, etteivät ne vaadi erikseen ympäristölupaa. [1 s. 17] [16.]

Voimalaitoksien ympäristöluvista on usein kuitenkin annettu erikseen määräykset tällaisia tilanteita varten esim. ilmoittamisvelvollisuus [1 s. 17] [16].

Yleisellä tasolla lupaa ei voida myöntää jos toiminnasta aiheutuu terveyshaittaa tai muuta merkittävää ympäristön pilaantumista. Toiminnasta ei saa myöskään aiheutua maaperän tai pohjaveden pilaantumista. Maaperän ja pohjaveden saastuminen on sidottu ja perusteltavissa myös terveysperustein. [16.]

Lain mukaan terveyshaittana pidetään konkreettista haittaa tai sen ilmenemistä pitkäaikaisen altistumisen seurauksena [16].

Lain tavoitteena on:

1. Ehkäistä ympäristön pilaantumista sekä poistaa ja vähentää pilaantumisesta aiheutuvia vahinkoja;
2. Turvata terveellinen ja viihtyisä sekä luonnontaloudellisesti kestävä ja monimuotoinen ympäristö;
3. Ehkäistä jätteiden syntyä ja haitallisia vaikutuksia;
4. Tehostaa ympäristöä pilaavan toiminnan vaikutusten arviointia ja huomioon ottamista kokonaisuutena;
5. Parantaa kansalaisten mahdollisuuksia vaikuttaa ympäristöä koskevaan päätöksentekoon;
6. Edistää luonnonvarojen kestävää käyttöä; sekä
7. Torjua ilmastonmuutosta ja tukea muuten kestävää kehitystä.

Soveltamisala

Lakia sovelletaan toiminnassa, jossa aiheutuu tai saattaa aiheutua ympäristön pilaantumista. Tätä lakia sovelletaan toimintaan, jossa syntyy jätettä, sekä jätteen hyödyntämiseen tai käsittelyyn. [1 s. 17] [16.]

4.3 Maaperän pilaamiskielto

Maahan ei saa jättää tai päästää jätettä eikä muutakaan ainetta siten, että seurauksena on sellainen maaperän laadun huononeminen, josta voi aiheutua

vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle, viihtyisyyden melkoista vähentymistä tai muu niihin verrattava yleisen tai yksityisen edun loukkaus (maaperän pilaamiskielto) [16].

4.4 Ympäristökelpoisuus

Sivutuotteiden käyttö maarakentamisessa edellyttää, että sivutuotemateriaalit ovat ympäristökelpoisia. Sivutuotteiden sisältämät haitta-aineet kulkeutuvat ympäristöön liukenemalla tai pölyämällä. Ympäristökelpoisuutta arvioitaessa on huomioitava, että koska sivutuotteet ovat teollisuuden jätettä, niiden laatu saattaa vaihdella merkittävästi. [10 s. 49.]

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston julkaisussa Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakentamisessa esitetään joitakin yleisiä käytäntöjä koskien massastabiloidun saven käyttöä. Julkaisussa suositellaan, että stabiloituja savirakenteita käytettäisiin noin metrin verran pohjaveden pinnan yläpuolella. Käytäntö vähentää haitta-aineiden liukenemista pohjaveteen. Varsinkin teollisuuden sivutuotteilla stabiloitua savea on käytettävä harkiten pohjaveden pinnan alapuolella. Toisaalta stabiloitujen savirakenteiden käyttö rajoittuu lähinnä juuri savikkoalueille, joilla ylijäämäsavvia syntyy – ei vaativille pohjavesialueille. [10 s. 49.]

5 LABORATORIOTULOKSET

5.1 Lähtökohdat

Stabiloituvuustutkimukset tehtiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten T&K-laboratoriossa.

Laboratoriossa suoritettujen tutkimusten tarkoituksena on ollut selvittää tuhkillä saavutetut lujuusominaisuudet runkomateriaalinäytteen eli saven stabiloinnissa. Runkoainemateriaalista (saLj) on määritetty vesipitoisuus, märkätiheys, rakeisuus ja heikutushäviö. Testauksessa käytettiin 1-aksiaalisesti tehtyjä lujuusmäärittämiä.

Testatut sideainevaihtoehdot on aikaisemmin päätettyjen reunaehtojen mukaiset. Tutkimus on rajoitettu tilaajan tahdosta ainoastaan energiateollisuuden tuhkien, yleisementin ja 2:1 seoksen käytöllä saavutettaviin lujuusominaisuuksien selvittämiseen. Testisarjojen tarkoituksena on ollut selvittää eri sideaineratkaisujen toimivuutta, vertailtu eri sideainemäärien vaikutusta lujittumiseen ja tarkkailtu eri sideaineratkaisujen poikkeavia aikalujittumiskäyttäytymistä.

5.2 Tutkimusmenetelmät

Laboratorioon toimitetut tuhkamassat saatiin metsäteollisuudentehtaiden tuhista. Ennen kuin laboratoriotutkimukset aloitettiin, kyseiset näyte-erät homogenisoitiin yhdeksi näytekohdaisesti tasalaatuiseksi massaksi. Runkomateriaalinäytteen vesipitoisuus (w) on määritetty uunikuivauksella (105° C) ja vesipitoisuus on laskettu näytteen sisältämän vesimäärän suhteena näytteen kuivamassaan.

Stabiloinnissa käytettävien sideainemäärien mittaamisessa tarvittava runkomateriaalin märkätiheys on määritetty käsinpainelemalla stabiloimatonta näy-

tettä mittasylinteriin. Sylinterin täyttö on tapahtunut siten, ettei näytteeseen jää koloja. Ilmoitettu märkätiheys on laskettu tunnetun sylinterin tilavuuden ja siihen painellun näytteen massan perusteella.

Hehkutushäviö on määritetty hehkuttamalla kuivattua näytettä vähintään 1,5 tuntia 800° C. Hehkutushäviö on laskettu vertaamalla kuivatun näytteen hehkutettaessa hävinneen massan määrää näytteen kuivamassaan. Testitulokset ovat kahden rinnakkaisen näytteen keskiarvoja. Humuksen määrä on arvioitu vähentämällä hehkutushäviöstä näytteen savipitoisuuden perusteella arvioitu kidevesiosuus. Materiaalin rakeisuus on määritetty aerometrikoetta käyttäen.

Valmiiksi homogenisoitu runkoainemateriaalinäytteeseen sekoitetaan haluttu määrä sideainetta. Sideaineen määrä on ennalta määrätty ja se lasketaan suhteessa stabiloitavan runkomateriaalin tilavuuteen. Sekoitus tapahtuu laboratoriosekoittimella n. 1 kg sekoituserinä ja käyttäen vakiotyömäärää 2 min sekoituserää kohden.



Kuva 6. Vaaka (keskellä) ja sekoitin (oikealla).

Sekoitettu massa, joka sisältää runkoainemateriaalin ja sideaineen, pakataan halkaisijaltaan 43 mm näytesylinteriin, joiden korkeus on n. 125 mm. Näytesylinterit säilytetään 2 ensimmäistä vuorokautta sideaineen sekoittamisen jälkeen huoneen lämmössä (n. 20° C) lämpöeristettyihin laatikkoihin pakattuina. Alkuvaiheen jälkeen säilytyslämpötilaksi koestamiseen asti on 8° C. Muovipusseihin pakatut koekappaleet eivät pääse kuivumaan ennen koestusta.



Kuva 7. Näytesylinteri

Ennen puristuslujuusmäärittystä koekappaleet poistetaan sylinteristä ja silmäääräisesti tarkastetaan homogeenisyys ja koekappaleiden ehjyys. Koestus tapahtuu 1-akselisesti käyttäen kuormitusnopeutta 1 mm/min. Koekappalekoko $h/d=86/43$ mm.



Kuva 8. Puristin

5.3 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

Kaikki tutkimuksessa käytetyt materiaalit on toimitettu Ramboll Finland Oy:n Luopioisten T&K -laboratorioon YIT:n toimesta syyskuussa 2007. Tutkimuksissa on käytetty sideaineena yleissementtiä (CEM II A-M (S-LL) 42.5 N) ja metsäteollisuudentuhkaa. Käytetty tuhka on saatu yhdistämällä kolme YIT:n toimittamaa (kuivaa) tuhkanäytettä suhteessa 1:1:1.

5.4 Stabiloituvaluustutkimukset

Lujuusmäärityksiä on tehty sekä yksittäismäärityksin että käyttäen kahta eri rinnakkaiskappaletta.

5.5 Johtopäätökset

Laboratoriotutkimuksista saatujen tuloksien mukaan pelkkää tuhkaa käyttäen on saavutettavissa kohtuullisia lujittumisen tuloksia. Tässä ehtona on kuitenkin riittävät tuhkamäärät. Tulosten perusteella on arvioitavissa, että jos pitkäaikaislujittuminen on mahdollista hyödyntää täysimääräisesti, voidaan 200...225 kg/m³ tuhkamäärää käyttämällä saavuttaa 100 kPa puristuslujuus-taso eli 50 kPa leikkauslujuus. Kuitenkin pienemmällä testatulla tuhkamäärällä 150 kg/m³, ei runkomateriaalia saatu lujittumaan juuri lainkaan. Tulokset perustuvat testattuihin näytteisiin, joten tehtyjen kokeiden perusteella voidaan tehdä vain suuntaa-antavia johtopäätöksiä.

Sementin ja tuhkan yhdistelmä vaikuttaa kuitenkin potentiaaliselta vaihtoehdolta. Varsinkin pienehköjä sideainemääriä käytettäessä, jolloin puristuslujuus jää alle 500 kPa luokkaa. Pelkän sementin osalta ei kuitenkaan ole suoria vertailutuloksia alle 100 kg/m³ sideainemäärillä, joten luotettava arviointi tuhalla saavutettavan lisähyödyn suhteen on näin ollen mahdotonta. Kuitenkin voidaan arvioida, että ainakin sideainemäärätasolle 50+100 kg/m³ asti tuhalla saavutetaan lisähyötyä stabilointituloksen suhteen. Sen sijaan mitä suuremmilla sideainemäärillä ja lujuuksilla liikutaan, sitä kapeammaksi etu muodostuu. 100 kg/m³ sementtimäärällä saavutetaan jo 28 vrk testeissä korkeammat lujuusarvot kuin seoksella, jossa on sementtimäärän lisäksi käytetty 200 kg/m³ tuhkaa.

Ainoastaan tuhkaa käytettäessä pitkäaikaislujittumisen merkitys on suurempi ja sen osuus loppulujuudesta on muita testattuja vaihtoehtoja suurempi.

Arvioitaessa tuloksia tulee myös muistaa, että tarkastelussa on käytetty yhden valitun runkoainemateriaalivaihtoehdon stabiloinnissa saavutettavia lujuusominaisuuksia, kun stabiloinnissa hyödynnetään tutkimuksissa käytettyä kolmen tuhkalaadun seosta. Muutokset joko stabiloitavan runkomateriaalin laadussa tai hyödynnettävässä tuhkassa voivat vaikuttaa lopputulokseen huomattavastikin eivätkä tulokset ole suoraan yleistettävissä.

Taulukko 8. [YIT Rakennus Oy/T&K, stabiloituvuustestaus]

Sideaineet: Tuhkaseos A+B+C 1:1:1 ja yleissementti (=YSe)

Runkomateriaali: Savi

I-vaihe: eri sideaineiden toimivuusvertailu

Saven luokitteluominaisuudet: w, tiheys, hehkutushäviö ja rakeisuus (areometrikoe)

Sideainemäärä	Tuhkaseos	YSe+tuhkaseos 1:2	YSe
	7 d	7 d	7 d
100 kg/m ³	0	1	1
150 kg/m ³	1	1	0
225 kg/m ³	1	1	0
300 kg/m ³	1	0	0
Yhteensä	3	3	1

	14 d	14 d	14 d
100 kg/m ³	0	1	1
150 kg/m ³	1	1	0
225 kg/m ³	1	1	0
300 kg/m ³	1	0	0
Yhteensä	3	3	1

	28 d	28 d	28 d
100 kg/m ³	0	1	1
150 kg/m ³	2	1	0
225 kg/m ³	2	1	0
300 kg/m ³	2	OMA	0
Yhteensä	6	3	1

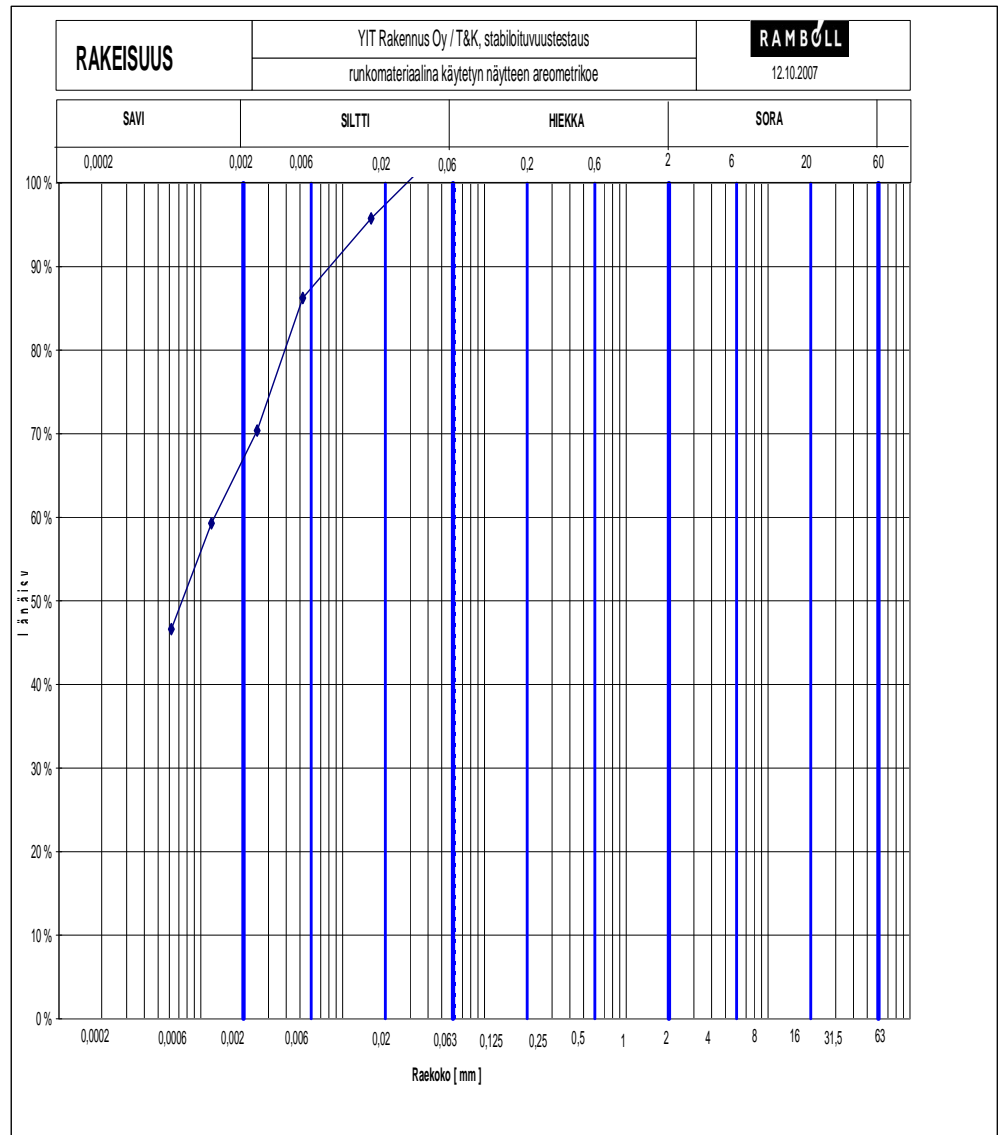
	90 d	90 d	90 d
100 kg/m ³	0	0	0
150 kg/m ³	2	1	0
225 kg/m ³	2	0	0
300 kg/m ³	2	0	0
Yhteensä	6	1	0

	vara	vara	vara
100 kg/m ³	0	1	1
150 kg/m ³	1	1	0
225 kg/m ³	1	1	0
300 kg/m ³	1	OMA	0
Yhteensä	3	3	1

Kaikki yhteensä	38
-----------------	----

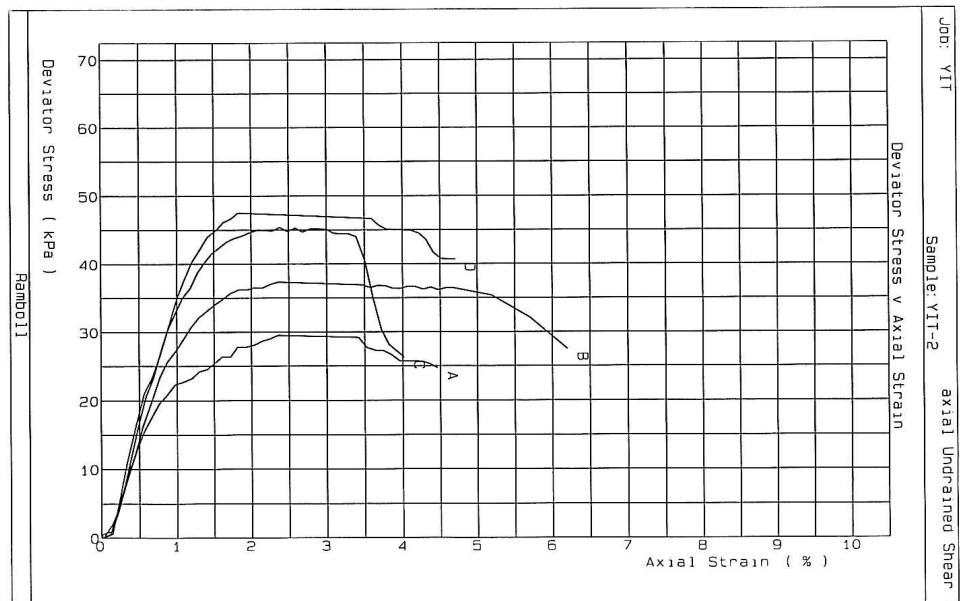
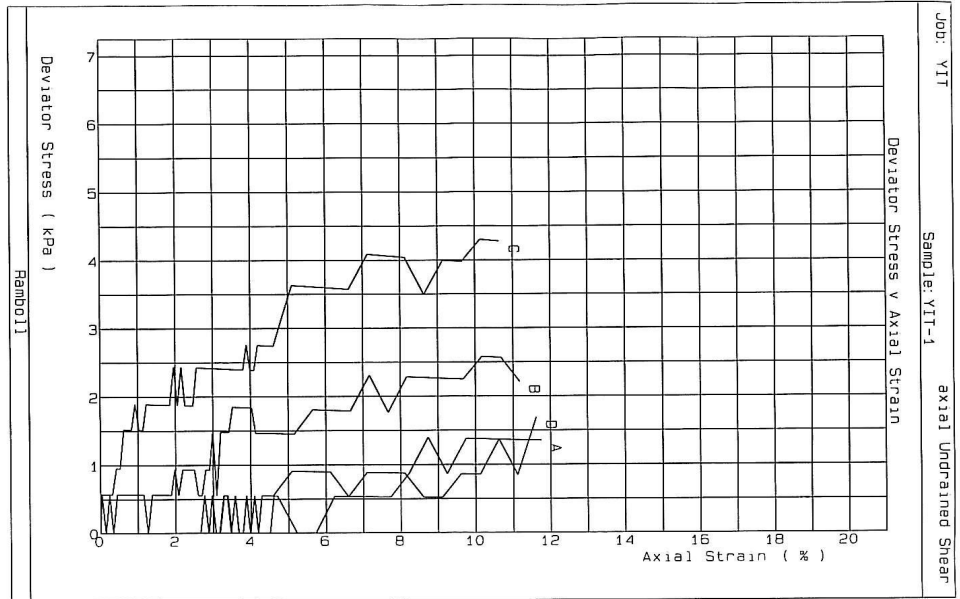
Sementti ja tuhka-sementtiseokset lujittuvat testeissä hyvin. Alla osoitettu stabiloituvuustutkimustuloksia, jossa on mukana myös runkomateriaalin luokitteluominaisuudet.

Taulukko 9. [YIT Rakennus Oy/ Runkomateriaalin luokitteluominaisuudet.]



Alla esitetty esimerkki koekappalekohtaisista jännitys-muodonmuutoskäyristä.

Taulukko 10. Jännitys-muodonmuutoskäyrät [YIT Rakennus Oy]



6 YHTEENVETO

Heikosti kantavia maita, siltti ja savi, voidaan vahvistaa käytössä olevalla tekniikalla - stabilointimenetelmällä. Massastabilointimenetelmällä maahan muodostuu sideaineen vaikutuksesta lujittuva maamassa laattamaiseksi rakenteeksi, joka mahdollistaa kuormia paremmin. Sideaineena massastabiloinnissa voidaan käyttää metsä- ja energiatuotannon tuhkia. Kiviainestarpeen vähentyessä säästetään arvokkaita sora- ja kallioalueita, siten myös projektin kustannukset vähenevät. Energiantuotannon sivutuotteiden hyödyntämiselle asettaa lainsäädännöllisen perustan voimassa oleva jätelaki, jonka ensisijainen lähtökohta on käytöstä poistetun aineen hyödyntämisvelvollisuus. Myös viranomaisten on omassa toiminnassaan edistettävä tämän hyödyntämisvelvoitteen toteutumista. Nykyisellään tuhkan kriteerit hyötykäyttöön ovat liian tiukkoja.

Tuhkientutkimustuloksista voidaan päätellä, että erilaisten tuhkien käyttö rakennuskohteissa on mahdollista, riippuen hyödyntämiskohteesta. Tuhkaa on tähän mennessä hyödynnetty ruoppaussementtien stabiloinnissa ja teiden pohjien parannuksessa. Tähän hyötykäyttöön vaikuttavat käyttökohteen sijainti suhteessa tuhkan kuljetuskustannuksiin ja rakennuskohteen pohjaolosuhteiden soveltuvuudesta stabilointiin eri sideaineilla. Stabilointia eri tuhkaseoksilla ja erilaisiin pohjaolosuhteisiin tulisi tutkia lisää ja eri rakennuskohteissa tapauskohtaisesti. Tulevaisuudessa kuljetusetäisyyksien kasvaessa voidaan käyttökohteen teknisten ominaisuuksien salliessa käyttää tuhkaa sideaineena. Itse tuhkaa voidaan käyttää massastabilointitekniikalla kantavana työaikaisenalaattana työkoneille. Lisätutkimus hankkeina voisi ehdottaa:

- Tuhkien kokeilemista koealueelle, joka on kaavoitettu puistokäyttöön.

-Veden määrän lisäämisen tai määrän vähentämisen vaikutus tuhkien lujuudenkehitykseen ja kemiallisten aineiden vaikutus lämpötilan nousuun.

Pilaristabiloinnissa ja kohteissa, joissa tarvitaan riittäviä lujuuksia tulevia rakennushankkeita varten, ei tuhkien lujuuden kehitys tehtyjen tutkimusten perusteella ole käytännöllisesti katsoen projektien kannalta kannattavaa.

VIITELUETTELO

- [1] Tuhkarakentamisohje Tie-, katu- ja kenttärakenteisiin, energia-alan keskusliitto ry finergy. 2000.
- [2] Rajala, Pasi, Espoo, Leppävaara Massastabilointi koerakenteena. Insinööriyö. Tampereen teknillinen oppilaitos Rakennusosasto. Tampere 1995
- [3] Rantamäki, Martti- Jääskeläinen, Raimo- Tammirinne, Markku, Geotekniikka, 18. painos, Helsinki: Otatieto. 2001.
- [4] Vähäaho, Ilkka, Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset, Tiedote 73/1996, Kiinteistö virasto Geotekninen osasto 1996.
- [5] Tiehallinnon julkaisu, http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf, luettu 28.4.2010
- [6] Tiehallinnon julkaisu, <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100008-v-04.pdf>, luettu 28.4.2010
- [7] Rekonen, Rita, Halkola, Hannu, Saven ominaisuuksien parantaminen massa-stabiloinnilla, Tiedote 64/1994, Kiinteistö virasto Geotekninen osasto, Helsinki 1994.
- [8] Tielaitoksen selvityksiä, Syvästabilointi tielaitoksen kohteissa Osa 1 toteutetut kohteet, Tielaitos 1999.
- [9] Tielaitoksen selvityksiä, Syvästabilointi tielaitoksen kohteissa Osa 2 laadunvalvontatutkimukset ja laadunvalvontien vaikutus, Tielaitos 1999.

- [10] Ruohonen, Elise, Ylijäämäsavien käyttö rakennustekniikassa. Diplomi-insinööriyö. Teknillinen korkeakoulu. Helsinki 2006 [verkkodokumentti, viitattu 11.5.2008]. Saatavissa: www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/D_Elise_Ruohonen.pdf
- [11] Finnsementin esittelystä, <http://www.finnsementti.fi/stabilointi/massastabilointi.htm>, luettu 28.4.2010
- [12] Wikipedian artikkeli maaperästä, <http://fi.wikipedia.org/wiki/Maaperä>, luettu 26.4.2010
- [13] Jaakkola, Mika, Massastabilointikoneiden ohjausjärjestelmäkehitys, Oulun yliopisto, Ahti Jurmu, YIT- rakennus Oy, Oulun yliopisto 2000.
- [14] Naukkarinen, Jukka, Pohjanvahvistus stabilointimenetelmällä, insinööriyö, Helsinki 2001.
- [15] Tiehallinnon verkkojulkaisu, <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>, luettu 20.4.2010
- [16] Finlexin verkkosivu, <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060591>, luettu 14.4.2010
- [17] Sivutuotteet -luentosarjan esite, YIT
- [18] Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu, www.ymparisto.fi, luettu 28.4.2010
- [19] Tuote esittelysivu, <http://www.bulkgroup.com/morefile.asp?ItemsproID=23>, luettu 28.4.2010