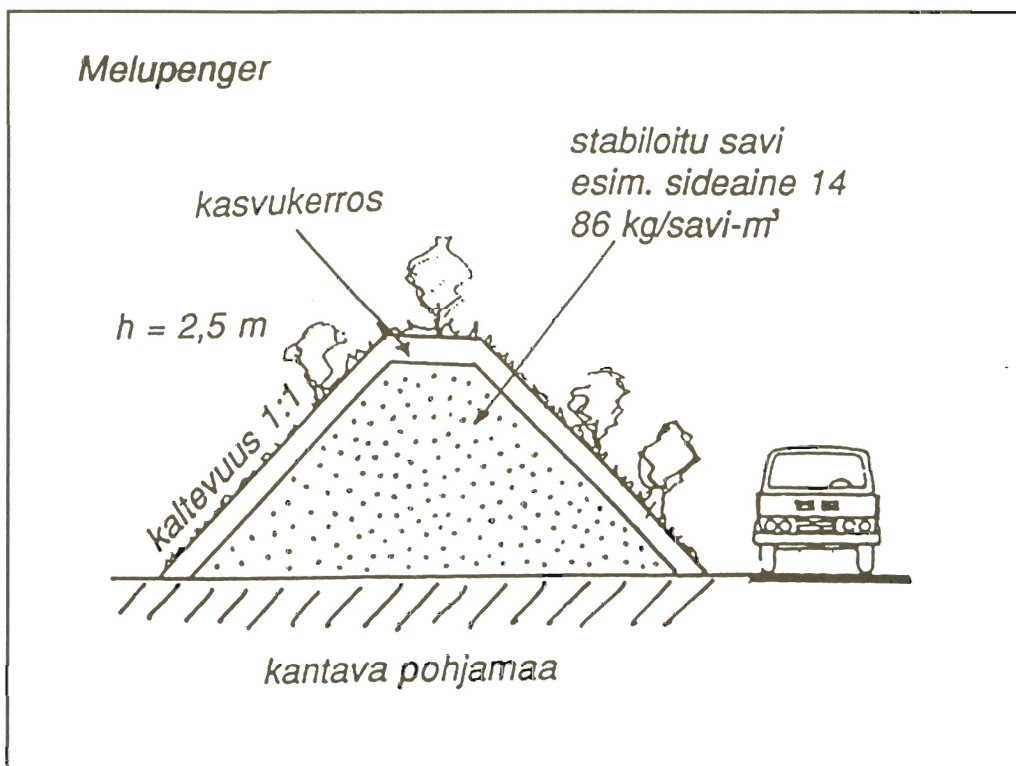




SAVEN OMINAISUUKSIEN PARANTAMINEN MASSASTABILOINNILLA

Rita Rekonen • Hannu Halkola



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO

ALKULAUSE

Tämä tiedote liittyy Helsingin kaupungin massastabiloinnin tutkimusprojektiin, josta ensimmäinen osa, " Ylijäämäsavien massastabilointi", on aikaisemmin julkaistu geoteknisen osan tiedotteena nro 61/1993.

Massastabilointi mahdollistaa aivan uuden, taloudellisen tavan ylijäämäsavien käsittelyyn, joko rakennuspaikalla tai läjitysalueella. Lisäksi menetelmä tarjoaa syvästabiloinnin ja massanvaihdon rinnalle uuden pohjanvahvistustavan.

Koska massastabiloinnissa sideainekustannukset vaikuttavat oleellisesti kokonaiskustannuksiin, selvitetään tiedotteessa perinteisiin sideaineisiin verrattuna edullisempien vaihtoehtojen saavaa stabiloivaa vaikutusta. Erityisesti on selvitetty, lujuus-, vedenläpäisevyys- sekä routivuusominaisuuksia.

Tiedotteessa esitetään myös massastabiloinnin soveltuvuus lievästi saastuneiden maiden käsittelyyn sekä muita käyttökohteita maarakennuksessa.

Tiedote perustuu tekn. yo. Rita Rekosen diplomityöhön, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkolan ohjauksessa. Työn valvoja oli professori Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta.

Helsingissä lokakuun 7. päivänä 1994



Usko Anttikoski

osastopäällikkö

II

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla tavoitteena selvittää vaihtoehtoja ylijäämäsavien sijoittamiselle maanlajitusalueille. Stabiloimalla savea erilaisilla sideaineilla ja sideaineyhdistelmillä voidaan saveen lujuus- ja painumaominaisuuksia parantaa huomattavasti. Lujitettua massaa voidaan käyttää maarakenteissa, kun taas käsittelemättömän, helposti liettyvän saveen kuljettaminen ja sijoittaminen maanlajitusalueille vaatii erityistoimenpiteitä.

Perinteisesti käytetyille sideaineille, sementille ja poltetulle kalkille on löydetty edullisempia vaihtoehtoja teollisuuden sivutuotteiden joukosta. Näistä etenkin lentotuhka ja rikinpoiston lopputuote sekä jossain määrin masuunikuona ovat osoittautuneet lujittavilta ominaisuuksiltaan merkittäviksi. Vähentämällä sementin ja poltetun kalkin osuutta ja lisäämällä sivutuotteita vaaditun lujuuden edellyttämä määrä saadaan sideainekustannuksia pienennettyä huomattavasti.

Saven lujittumista tutkittiin laboratoriossa tekemällä koekappaleille yksiaksiaaliset puristuskokeet. Vertailun vuoksi tehtiin yhdelle massalle kolmiaksiaalikokeet. Lisäksi massoille määritettiin rakeisuus, happamuus, vedenläpäisevyyskerroin ja routivuus. Stabiloinnilla saveen leikkauslujuus muuttui sideainemäärästä riippuen moninkertaiseksi. Lihavan saveen rakeisuus muuttui lujittumisen jälkeen pääsääntöisesti siltin rakeisuutta vastaavaksi. Stabiloidun saveen kokoonpuristuminen on luonnontilaisen saveen kokoonpuristumista nopeampaa johtuen suuremmasta vedenläpäisevyydestä. Routivuuden lisääntyminen aiheuttaa lisäselvityksiä massan käyttökohteissa.

Suurienkin massamäärien käsittely on tullut mahdolliseksi kaluston kehittymisen myötä. Tässä tutkimuksessa selvitettiin neljän erityyppisen työkonen soveltuvuutta massastabilointiin. Koepenkereiden ja koekuoppiin tiivistetyn massan lujittumista seurattiin kairauksin ja ruuvilevykokein ja tuloksia vertailtiin laboratoriossa saatuihin tuloksiin. Lisäksi mitattiin penkereiden painumista, routanousua ja lämpötiloja.

Massastabilointi on osoittautunut lievästi saastuneiden maamassojen kunnostusmahdollisuudeksi, sillä raskasmetallit voidaan saattaa stabiloimalla huonommin liukenevaan muotoon. Vaadittavien suojaustoimenpiteiden jälkeen massaa voidaan rajoitetusti käyttää erilaisten maarakenteiden osana.

Tarpeellisten lisäselvitysten jälkeen stabiloitua massaa voidaan käyttää kitka-maalajien sijasta piha- ja maisemointitäytyksissä, liikennealueiden maaluiskien muotoilussa, melu- ja tiepenkereissä, kunnallisteknisissä kaivannoissa sekä rakennustäytyksissä.

III

ABSTRACT

This research project was conducted at the geotechnical department of the City of Helsinki Real Estate Office. The main aim of this study was to clarify alternatives to locating surplus soils on deposition areas. Strength and settlement properties of clay can be considerably improved by stabilizing clay with various binders and with various combinations of binders. Strengthened bulk can be used in earth structures, while untreated, easily sludging clay demands special operations in deposition areas.

Cheaper alternatives for traditionally used binders (such as cement and quicklime) have been found among byproducts of industry. Particularly fly-ash and desulphurization product from coal-fired power plants (FGD), and to some extent blast-furnace slag have been proved to have significant strengthening properties for clay. Binder costs can be markedly lowered by reducing the proportion of cement and quicklime and by adding sufficient quantities of byproducts to meet the required level of strength.

Strength of bulk was studied in laboratory by unconfined compression test and by triaxial test for comparison. The grain size distribution, acidity, coefficient of permeability and frost-susceptibility were also determined. Shear strength of clay was multiplied by bulk stabilization, depending on the quantity of binder. The grain size of heavy clay changed to that of silt. The settlement of stabilized clay was more rapid than the settlement of natural clay due to the greater permeability. Increase in frost-susceptibility calls for further investigations when using stabilized bulk in earth structures.

The treatment of even large quantities of bulk has become possible through the development of equipment. The suitability of four different types of machines was studied and the strength of test-embankments and test sites was observed by penetration tests and screw-plate tests. Results were compared with those of laboratory tests. Also the settlement, frost heave and temperature distribution of the embankments were registered.

Bulk stabilization can be used to recondition slightly polluted soils as heavy metals can be converted into less-soluble forms. The stabilized bulk can, after necessary insulation, be used in earth structures restrictedly.

Stabilized bulk can be used as non-cohesive soil in yard and in landscape fillings, in the earth slopes of traffic areas, in various embankments, in pipeline canals and in construction fillings.

IV

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
MERKINNÄT	VI
1. JOHDANTO	1
2. STABILOINNISSA KÄYTETTÄVÄT SIDEAINEET	2
2.1 Sementit	2
2.2 Poltettu kalkki	2
2.3 Lentotuhka	3
2.4 Rikinpöston lopputuote	3
2.5 Masuunikuona	4
2.6 Kipsi	4
2.7 Sideaineyhdistelmät	4
3. SAVEN STABILOITUVUUS	5
4. STABILOIDUT SAVET JA TUTKIMUSOHJELMA	7
4.1 Malminkaaren savi	7
4.2 Tattarisuon savi	8
4.3 Viikin savi	9
4.4 Pikku-Huopalahden savi	10
5. LUJUUDENKEHITYS	11
5.1 Laboratoriossa tehdyt kokeet	11
5.1.1 Koekappaleiden valmistus	11
5.1.2 Puristuskokeet	12
5.1.3 Kolmiaksaalikokeet	14
5.1.4 Ödometrikokeet	16
5.2 Kenttäkokeet	16
5.2.1 Tattarisuon penkereet	16
5.2.2 Pikku-Huopalahden koealue	17
5.3 Koetulokset	18
5.3.1 Laboratoriotulokset	18
5.3.2 Kenttäkokeiden tulokset	22

V

6. ROUTIVUUS	27
6.1 Routivuuskriteerit	27
6.1.1 Luokitusominaisuudet	27
6.1.2 Hydrauliset ominaisuudet	28
6.1.3 Routanousukokeet	29
6.1.4 Stabiloidun saven routivuus	32
6.2 Laboratoriossa tehdyt routakokeet	33
6.2.1 Routanousukokeet	33
6.2.2 Rakeisuus	35
6.2.3 Vedenläpäisevyys ja kapillaarisuus	37
6.3 Tattarisuon kenttäkokeiden tulokset	38
7. STABILOINNIN KÄYTTÖKOhteita	42
7.1 Pintastabilointi	42
7.2 Kaivumassojen stabilointi	42
7.3 Saastuneiden maamassojen kunnostaminen	43
7.3.1 Maaperän saastuminen	43
7.3.2 Kunnostamisen periaatteet	46
8. MAARAKENNERATKAISUJA	50
8.1 Stabiloitujen massojen käyttö	50
8.2 Saastuneiden maamassojen eristäminen	52
9. STABILOINTIKALUSTO JA KUSTANNUKSET	55
9.1 Seulamurskain	55
9.2 Aumasekoitin	58
9.3 Aktivaattori	60
9.4 Saven sekoittaja	61
9.5 Kustannukset	62
10. YHTEENVETO	64
KIRJALLISUUSLUETTELO	67
LIITE 1. Stabiloidun Malminkaaren saven puristuskoetulokset.	

VI

MERKINNÄT

E_p	ruuvilevykokeesta saatava muodonmuutosmoduuli	[MPa]
E_u	puristuskokeesta saatava muodonmuutosmoduuli	[MPa]
I	syvyyskerroin	[-]
RH	ilman suhteellinen kosteus	[%]
SP	segregaatiopotentiaali kuormitettuna	[mm ² /Kh]
SP ₀	segregaatiopotentiaali nollakuormalla	[mm ² /Kh]
T	lämpötila	[°C]
gradT	lämpötilagradientti jäätyneessä maakerroksessa	[K/mm]
a	savipitoisuudesta riippuva kerroin	[1/MPa]
c'	tehokas koheesio	[kPa]
c_v	konsolidaatiokerroin	[cm ² /s] tai [m ² /a]
e	Neperin luku	[-]
h	korkeus	[mm] tai [m]
h_c	kapillaarinen nousukorkeus	[m]
dh	näytteen routanousu ajassa dt	[mm]
k	vedenläpäisevyyskerroin	[m/s]
q	puristuslujuus	[kN/m ²]
s	painuma	[mm]
s_u	suljettu leikkauslujuus	[kN/m ²]
dt	routanousuun kulunut aika	[h]
v	veden virtausnopeus näytteeseen	[mm/h]
w	muotokerroin	[-]
w-%	vesipitoisuus kuivapainosta	[%]
ε	suhteellinen muodonmuutos	[-] tai [%]
σ	jännitys	[kPa]
σ_v	myötöjännitys	[kPa]
ν	Poissonin luku	[-]
ϕ'	tehokas kitkakulma	[°]
$\emptyset$	halkaisija	[mm]

1. JOHDANTO

Rakennustoiminnassa syntyvien ylijäämäsavimassojen sijoittamiseen on viimeaikoina ollut tarvetta kiinnittää entistä enemmän huomiota, sillä liettyvien ja heikosti kantavien maamassojen kuljettaminen ja sijoittaminen maanlajitusalueille vaatii erityistoimenpiteitä. Massastabilointi eli maamassojen lujittaminen stabilomalla on osoittautunut kannattavaksi, sillä näin ylijäämämassat voidaan saada hyötykäyttöön.

Pinta- ja syvästabiloinnissa on perinteisesti käytetty sideaineina sementtiä ja poltettua kalkkia. Teollisuuden sivutuotteilla, kuten energialaitoksissa syntyvillä lentotuhkalla ja rikinpoiston lopputuotteella sekä raudanvalmistuksessa syntyvällä masuunikuonalla on havaittu olevan lujittavia vaikutuksia. Sivutuotteiden hinta on erittäin kilpailukykyinen, ja lisäksi niiden käyttöönottamisella voidaan vähentää niiden sijoitustarvetta läjitysalueille.

Teollisuuden sivutuotteilla stabiloitua massaa ei ole voitu käyttää maarakenteissa, sillä ne sisältävät ympäristölle haitallisia aineita kuten raskasmetalleja. Massastabiloinnin on kuitenkin havaittu sitovan raskasmetalleja vaikeammin liukeneviksi yhdisteiksi. Tästä johtuen massastabilointia voidaan käyttää myös lievästi saastuneiden maamassojen kunnostamiseen.

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto on julkaissut aikaisemmin yhden massastabilointia käsittelevän tiedotteen. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää erilaisilla sideaineyhdistelmillä stabiloitujen savimassojen geoteknisiä ominaisuuksia ja mahdollisia ympäristövaikutuksia. Stabiloitumista selvitettiin laboratoriossa tehdyin luokitus- ja lujuuskokein sekä maastossa toteutettujen koerakenteiden avulla. Lisäksi arvioitiin käytetyn kaluston soveltuvuutta ylijäämämassojen käsittelyyn sekä lujittuneen massan erilaisia käyttökohteita. Koska sideaineyhdistelmien koostumukset selvitettiin yhteistyössä Lohja Oy:n kanssa, osa sideaineista esitetään tuotesuojasta johtuen numeroituina.

2. STABILOINNISSA KÄYTETTÄVÄT SIDEAINEET

2.1 Sementit

Tässä tutkimuksessa käytettiin sideaineina suomalaista ja venäläistä portlandsementtiä sekä yleissementtiä. Vertailun vuoksi tutkittiin myös muiden rakennussementtien lujittavaa vaikutusta. Ominaisuuksiltaan sementti on sideaineista tehokkain ja se lujittaa myös sellaisia maalajeja, joissa kalkki toimii huonosti.

Portlandsementti saa Suomen standardisoimisliiton mukaan sisältää portlandklinkkeriä ja yhteensä enintään 5 % seosaineita laskettuna klinkkerin ja seosaineiden yhteisestä määrästä. Portlandklinkkeri on hydraulinen tuote, joka syntyy, kun hienoksi jauhettua mineraalista raaka-aineseosta kuumennetaan sintraantumiseen saakka. Portlandklinkkeri koostuu pääosin kalsiumoksidista CaO ja piidioksidista SiO_2 sekä pienemmässä määrin alumiinitrioksidista Al_2O_3 ja rautatrioksidista Fe_2O_3 . Seosaineita ovat masuunikuona, lentotuhka, kalkkikivi tai muu mineraalinen, epäorgaaninen aine /33/. Käytetyt portlandsementit olivat normaalisti kovettuvia P40/28 -sementtejä ja ne täyttävät standardin SFS 3165 vaatimukset.

Yleissementti saa Suomen standardisoimisliiton mukaan sisältää portlandklinkkeriä ja yhteensä korkeintaan 25 % seosaineita, kuitenkin enintään 15 % kalkkikiveä, ilmajähdytettyä masuunikuonaa tai muita vastaavia seosaineita, laskettuna klinkkerin ja seosaineiden yhteismäärästä /33/. Käytetty yleissementti oli standardin mukainen normaalisti kovettuva Y40/28 -sementti.

2.2 Poltettu kalkki

Syvästabiloinnissa käytettävälle poltetulle eli sammuttamattomalle kalkille on Kalkkipilariohjeissa /10/ asetettu seuraavat vaatimukset, joiden voidaan olettaa koskevan myös pinta- ja massastabilointia. Kalkin tulee olla kovaksi poltettua sammuttamatonta kalkkia ja kalkin CaO -pitoisuuden on oltava vähintään 80 %.

3

Jos kalkin syöttö tapahtuu paineilman avulla, kalkin on oltava hienojakoista ja rakeisuudeltaan 0 - 0,2 mm siten, että vähintään 80 % läpäisee seulakoon 0,2 mm. Kalkin maksimiraekoon tulee olla 1 mm. Lisäksi kalkin juoksevuuden on oltava sellainen, että kalkki liikkuu säiliössä ja putkistoissa hyvin. Juoksevuus voidaan määritellä 0,5 mm seulan läpäisyprosentin perusteella. Kalkin juoksevuuden tulisi tällöin olla vähintään 70 % /10/.

2.3 Lentotuhka

Lentotuhka on hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa voimalaitoksissa syntyvä pozzolaani, joka on erotettu savukaasuista. Pozzolaanilla tarkoitetaan ainetta, joka kalsiumhydroksidin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kanssa reagoidessaan muodostaa sementtikiven kaltaisia pysyviä reaktiotuotteita /33/. Lentotuhka koostuu piidioksidista SiO_2 (40 - 50 %), alumiinitrioksidista Al_2O_3 (16 - 23 %), rautatrioksidista Fe_2O_3 (10 - 14 %), kalsiumoksidista CaO (6 - 10 %), magnesiumoksidista MgO (4 - 6 %) ja sulfiitista SO_3 (0,4 - 1,5 %). Lisäksi lentotuhka sisältää palamatonta hiiltä 0,5 - 15 % ja pieniä määriä muita yhdisteitä. Lentotuhka vastaa rakeisuudeltaan silttiä /18/.

2.4 Rikinpoiston lopputuote

Tässä tutkimuksessa käytetty rikinpoiston lopputuote on peräisin energialaitosten savukaasujen puhdistamisessa käytettävästä puolikuivasta rikinpoistomenetelmästä, jossa savukaasuihin ruiskutetaan kalkkilietettä. Rikinpoiston lopputuote sisältää kalsiumsulfiittia CaSO_3 , kalsiumsulfaattia CaSO_4 , kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kalsiumoksidia CaO ja lentotuhkaa /37/. Lisäksi rikinpoiston lopputuote voi sisältää pieniä määriä useita eri raskasmetalleja. Lopputuotteen koostumus vaihtelee erästä toiseen riippuen poltetun hiilen koostumuksesta, prosessista ja kalkin tarjonnasta /11/.

2.5 Masuunikuona

Masuunikuonaa syntyy raudanvalmistuksessa, kun emäksinen silikaattisulfaatti jäähdytetään. Masuunikuonalla on piilevät hydrauliset ominaisuudet, mikä tarkoittaa aineen kykyä muuttua hydrauliseksi heräteaineiden, kuten sementin vaikutuksesta. Tämän vuoksi masuunikuonaa voidaan käyttää rakennus-sementtien seosaineena. Masuunikuona sisältää kalsiumoksidia CaO (36 - 46 %), piidioksidia SiO_2 (36 - 38 %), magnesiumoksidia MgO (7 - 12 %), alumiinitrioksidia Al_2O_3 (8 - 13 %) ja rikkiä S (0,5 - 2,4 %) /35/.

Masuunikuonaa esiintyy kolmessa muodossa, joilla on erilaiset piilevät hydrauliset ominaisuudet. Granuloidulla kuonalla on hyvät piilevät hydrauliset ominaisuudet ja pelletoidulla kuonalla jonkin verran heikommat. Ilmajäähdytetyn kuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet ovat huonot /33/.

2.6 Kipsi

Kipsi on lannoiteteollisuudessa syntyvä jätetuote, joka suurimmaksi osaksi koostuu kalsiumsulfaatista CaSO_4 . Jätekipsiä on aikaisemmissa tutkimuksissa käytetty koeluentoisesti saven stabilointiin /11/. Tässä tutkimuksessa kipsiä ei käytetty.

2.7 Sideaineyhdistelmät

Tässä tutkimuksessa käytettiin sideaineyhdistelmiä, jotka suurimmaksi osaksi koostuivat teollisuuden sivutuotteista eli lentotuhkasta, rikinpoiston lopputuotteesta ja masuunikuonasta. Yhdistelmissä oli aina myös lisänä sementtiä tai poltettua kalkkia tai molempia. Tarkkoja reseptejä ei tässä yhteydessä ole kaikkien yhdistelmien osalta ilmoitettu, vaan seoksilla on numeroidut nimet. Tällaisia sideaineita ovat esimerkiksi seos 4, seos 14, Lohjamix A ja Lohjamix B.

3. SAVEN STABILOITUVUUS

Saven stabiloituvuuden selvittämiseksi voidaan laboratoriossa tehdä ennakkokokeita. Tarvittavan sideaineen ja sideainemäärän määrittämiseksi tulisi selvittää ainakin maalajin rakeisuus, vesi-, humus- ja rikkipitoisuus sekä happamuus. Saven stabiloitumiseen vaikuttavia ominaisuuksia on tutkittu erityisesti kalkkipilaroinnin yhteydessä. On todettu, että erityisesti humus- ja rikkipitoisuus hidastavat tai estävät lujittumisreaktioiden tapahtumista /10/.

Maa, joka sisältää paljon humusta, saattaa stabiloitua huonosti happamuutensa takia. Kalkin lisääminen muuttaa kuitenkin maan happamuutta edullisempaan suuntaan, ts. emäksisemmäksi. Geotekninen maaluokitus /14/ luokittelee maalajin liejuiseksi (saveksi), jos humuspitoisuus on 2 - 6 % ja (saviseksi) liejuksi, jos humuspitoisuus on 6 - 20 % kuivapainosta laskettuna. Lujittumisen kannalta ongelmia voi aiheuttaa yli 10 % humuspitoisuus /10/.

Rikkipitoisuus heikentää kalkkistabiloidun saven lujittumista, jos kokonaisrikkipitoisuus ylittää 0,3 % tai sulfaattipitoisuus 0,06 %. Tarkemmin ei ole pystytty selvittämään, mistä rikin yhdisteestä on stabiloitumiselle eniten haittaa. Tässä tutkimuksessa savista määritettiin sulfaattipitoisuus (SO_4) gravimetrisellä saostus-suodatus -menetelmällä, mutta sulfaatin lisäksi rikkiä saattaa esiintyä muissakin yhdisteissä.

Stabiloituvuuden edellytyksenä on, että stabiloitavassa massassa on riittävästi vettä, jotta lujittumisreaktiot voivat tapahtua. Saven stabiloinnissa vettä on yleensä riittävästi, mutta jos seassa on esimerkiksi kuivaa hiekkaa, on vedenlisäyksestä tarvittaessa huolehdittava. Toisaalta on huolehdittava myös siitä, ettei massa stabiloinnin jälkeen pääse kuivumaan liikaa.

Tärkeä saven lujittumiseen vaikuttava tekijä on lämpötila. Laboratorio-oloissa on huomattu, että kylmäsäilytyksessä pidetyille koekappaleille on saatu oleellisesti

6

huonompia lujuustuloksia kuin näytteille, jotka on säilytetty stabiloidun rakenteen lämpötilaa vastaavissa olosuhteissa /10/.

Tässä tutkimuksessa, kuten myös aikaisemmissa, tehdyt lujittumisselvitykset antoivat edellämainittujen ominaisuuksien osalta ristiriitaisia koetuloksia. Lisäksi käytettäessä useita eri sideaineita ja niiden sekoituksia, lujittumiseen vaikuttavat ominaisuudet jäivät osittain epäselviksi. Tämän vuoksi on syytä olettaa myös muiden ominaisuuksien kuten esimerkiksi saven mineraalikoostumuksen tai kemiallisten ominaisuuksien vaikuttavan merkittävästi stabiloituvuuteen.

Tarkemman tiedon puuttuessa on ennakkokokeiden tekeminen laboratoriossa välttämätöntä. Tällöin tulee todellisissa olosuhteissa tapahtuvaa sekoitusta, tiivistämistä ja lujittumislämpötilaa jäljitellä mahdollisimman tarkasti. Maakerosten erilaisuus on otettava huomioon tekemällä tarvittaessa rinnakkaiskokeita eri syvyydeltä otetuille saviille. Lisäksi olisi suositeltavaa koerakenteiden, esimerkiksi penkereiden tai täyttöjen tekeminen maastoon, jolloin ilmaston, maakerrosvaihteluiden ym. ennalta-arvaamattomien seikkojen vaikutus tulisi todenmukaisemmin esille.

4. STABILOIDUT SAVET JA TUTKIMUSOHJELMA

4.1 Malminkaaren savi

Malminkaaren savi otettiin putkinäytteenottomella Malminkaaren ja Kehä-l:n risteyksen välittömästä läheisyydestä 2-4 metrin syvyydestä. Savikerroksen paksuus on kyseisessä kohdassa noin kymmenen metriä. Geoteknisen maa-lajiluokituksen mukaan savi on lihavaa savea, ja sen vesipitoisuus on välillä 68-75 %. Saven tilavuuspaino on noin 15-16 kN/m³, humuspitoisuus < 1 %, sulfaattipitoisuus 0 % ja pH 5,8 - 7,7. Häiriintymättömän saven leikkaus-lujuudeksi on määritetty siipikairalla 8-10 kN/m² ja kartiokokeella 5-10 kN/m².

Saven stabiloituvuutta tutkittiin laboratoriossa usealla eri sideaineella ja sideaine-pitoisuudella. Sideaineina käytettiin poltettua kalkkia, erilaisia sementtejä, lentotuhkaa, rikinpoiston lopputuotetta, masuunikuonaa ja näiden sekoituksia. Yhteen-sä tutkittiin yli 30 sideainesekoitusta, mutta tässä tutkimuksessa keskitytään vain osaan koetuloksista. Koekappaleille tehtiin yksiaksiaalinen puristuskoe 3, 28 ja 91 vuorokauden ikäisenä.

Taulukko 1. Malminkaaren saven stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja niiden pitoisuudet.

Pitoisuus Sideaine	6 % 52 kg/m ³	10 % 86 kg/m ³	16 % 138 kg/m ³	25 % 205 kg/m ³
Portland- sementti	X	X		X
Yleis- sementti	X	X		X
Poltettu kalkki	X	X		X
Masuunikuona	X	X		X
Seos 4	X	X	X	X
Seos 14	X	X		X

Taulukossa 1 on esitetty Malminkaaren saven stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja niiden pitoisuudet. Sideainepitoisuus (%) on laskettu saven kuivapainosta ja vertailun vuoksi sideainemäärä on ilmoitettu myös savikuutiota kohti (kg/m³).

4.2 Tattarisuon savi

Tattarisuon savi kaivettiin kaivinkoneella 1-3 metrin syvyydestä. Savi on lihavaa savea, jonka vesipitoisuus on välillä 80 - 100 %. Luonnontilaisen saven tilavuuspaino on 14,5 kN/m³, humuspitoisuus 1,5 - 2 %, sulfaattipitoisuus 0,1 % ja pH 6,6. Häiriintymättömän saven leikkauslujuus siipikairalla määritettynä on 5-10 kN/m².

Saven stabiloitumista tutkittiin kahdella sideaineella laboratoriossa sekä rakentamalla Tattarisuon alueelle kaksi koepengertä. Sideaineina käytettiin kahta sivutuotteiden, kalkin ja sementin seosta. Lujuudenkehitystä tutkittiin laboratoriossa sekä kaivinkoneella sekoitetusta että laboratoriossa sekoitetusta massasta. Koekappaleille tehtiin puristuskokeet 5, 28, ja 91 vuorokauden ikäisenä. Penkereet kairattiin siipikairalla kuukauden ja kahdeksan kuukauden ikäisenä. Lisäksi penkereissä tehtiin ruuvilevykokeet kahdeksan kuukauden ikäisenä (kts. kohta 5.3.2). Taulukossa 2 on esitetty käytetyt sideaineet ja niiden pitoisuudet.

Taulukko 2. Tattarisuon saven stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja niiden pitoisuudet.

Pitoisuus Sideaine	10 % 77 kg/m ³	10-15 % 80-120 kg/m ³ *	15 % 116 kg/m ³	20 % 154 kg/m ³	20-26 % 160-200 kg/m ³ *	25 % 193 kg/m ³
Seos 4				L	P,L	L
Seos 14	L	P,L	L			

L = laboratoriossa tehdyt koekappaleet

P = penkereet

* = arvioitu sideainepitoisuus

4.3 Viikin savi

Viikin savi kaivettiin Viikin keskuspuhdistamon tunnelilinjauksen lähetyviltä. Savi kaivettiin kahdelta eri syvyydeltä kaivinkoneella. Syvyydeltä 0-2,5 m kaivettu savi on liejuista laihaa savea, jonka vesipitoisuus on 89 %, humuspitoisuus 2,7 %, sulfaattipitoisuus 0 % ja pH 6,5. Syvyydeltä 3-6 m kaivettu savi on lihavaa savea, joka häiritynä on muista savista poiketen täysin juoksevassa olomuodossa. Saven vesipitoisuus on 83 %, humuspitoisuus 0,3 %, tilavuuspaino 14,5 kN/m³, sulfaattipitoisuus 0,01 % ja pH 8,8. Alueella tehtyjen siipikairauten mukaan savien leikkauslujuus häiriintymättömänä on noin 10 kN/m² ja häiritynä 0,3 - 2 kN/m².

Laboratoriossa tutkittiin saven lujittumista portlandsementillä, kalkkisementtiseoksilla ja viidellä sivutuotesekoituksella. Koekappaleille tehtiin puristuskokeet 7, 14, 28 ja 91 vuorokauden ikäisenä. Taulukossa 3 on esitetty käytetyt sideaineet ja pitoisuudet.

Taulukko 3. Viikin saven stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja pitoisuudet.

Sideaine	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [kg/m ³]
Portlandsementti	4 %	32
Portlandsementti + poltettu kalkki	2 + 2 % 5 + 5 %	16 + 16 40 + 40
Poltettu kalkki + lentotuhka	3 + 30 %	24 + 241
Poltettu kalkki + rikinpoiston lopputuote	3 + 30 %	24 + 241
Seos 14	9 %	72
Seos 20	9 %	72
Lohjamix A	6 % 10 % 15 %	48 80 120

4.4 Pikku-Huopalahden savi

Pikku-Huopalahden savea tutkittiin neljältä eri syvyydeltä. Savi otettiin pinnasta kaivinkoneella ja syvemmältä putkinäytteenottimella. Tutkitut maalajit ovat laiha savi, lihava savi sekä savinen lieju. Savien vesipitoisuus on 80 - 110 %. Laihan saven humuspitoisuus on 0,4 % ja sulfaattipitoisuus 0,05 %. Lihavan saven humuspitoisuus on 0,3 % ja sulfaattipitoisuus 0,02 %. Savisen liejun humuspitoisuus on 7,7 - 11,1 % ja sulfaattipitoisuus 0,22 %. Savien tilavuuspaino on keskimäärin 13,9 kN/m³. Häiriintymättömän saven leikkauslujuus on siipikairalla määritettynä 10 kN/m² ja kartiokokeella 8 kN/m².

Saven lujittumista tutkittiin laboratoriossa erilaisilla sementeillä ja sivutuotteita sisältävillä sekoituksilla. Koekappaleille tehtiin puristuskokeet 7, 14, 28 ja 56 vuorokauden ikäisenä. Lisäksi Pikku-Huopalahden alueelle tehtiin massastabiloitu koealue, jossa käytettiin kahta eri sideainetta. Alue tutkittiin puristin- (CPT) ja siipikairauksilla 7, 14, 28 ja 56 vrk:n ikäisenä ja lisäksi tehtiin ruuvilevykokeet 56 vrk:n ikäisenä (kts. kohta 5.3.2). Taulukossa 4 on esitetty käytetyt sideaineet ja pitoisuudet.

Taulukko 4. Pikku-Huopalahden saven stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja niiden pitoisuudet.

Sideaine	Pitoisuus [%]	Pitoisuus [kg/m ³]
Portlandsementti	24 %	160 (L)
Yleissementti	24 %	160 (L)
Venäläinen portlandsementti	16 % 24 %	108 (L, K) 160 (L)
Lohjamix B	16 %	108 (L, K)
Seos 14	27 %	180 (L)

L = laboratoriossa tehdyt koekappaleet

K = Pikku-Huopalahden kenttäkoe

5. LUJUUDENKEHITYS

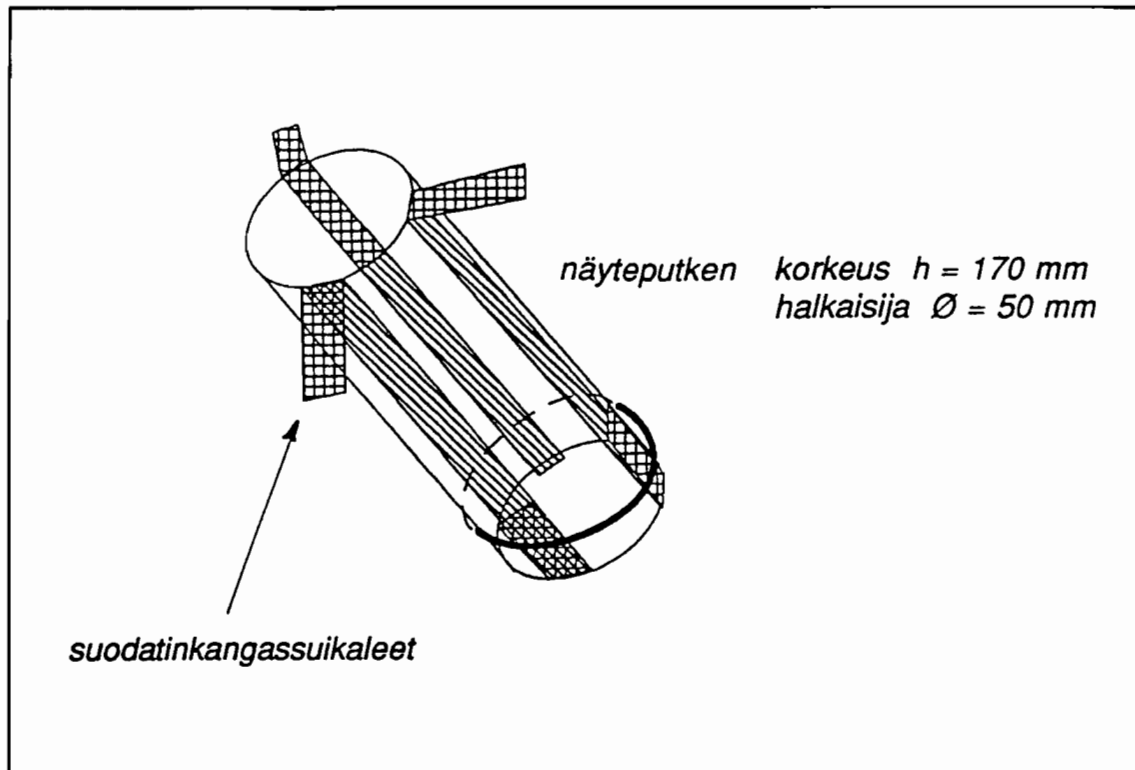
5.1 Laboratoriossa tehdyt kokeet

5.1.1 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleiden valmistukseen tarvittava savi säilytettiin muovisaaveissa kylmähuoneessa, jonka lämpötila oli $+7,5^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 100 %. Savi oli sekoitettu vispiläsekoittimella noin 60 - 70 litran erissä tasalaatuisuuden varmistamiseksi.

Koekappaleiden valmistus aloitettiin punnitsemalla savea ja sideainetta sekoitusastiaan tarvittava määrä ja sekoittamalla massaa koneellisesti taikinakoukulla 2 minuuttia. Sekoitettu massa sullottiin välittömästi punnittuihin ja numeroituihin lasikuitu- tai messinkiputkiin, joiden sisähalkaisija oli 50 mm ja korkeus 170 mm (kuva 1 /11/). Putkien sisäpintaan oli asetettu pituussuuntaan kolme 10 mm levyistä suodatinkangassuikaletta, joita pitkin veden liikkuminen oli mahdollista. Lisäksi putken sisäpintaan oli suihkutettu vähän silikonispraytä helpottamaan kovettuneen koekappaleen ulostyöntämistä. Massa sullottiin putkiin viitenä kerroksena, joista jokainen tiivistettiin 10 - 15 puunuijan iskulla. Joidenkin massojen sullominen oli niiden koostumuksen vuoksi mahdotonta, jolloin massa pyrittiin painamaan putkeen mahdollisimman tiiviisti. Putkien kumpaankin päähän asetettiin suodatinkangaspalat sekä avonaiset korkit.

Kerralla sekoitetusta massasta sullottiin 2 - 4 näytettä, minkä jälkeen putket punnittiin samansuuruisen tiiviyden varmistamiseksi ja tiedot taulukoitiin. Putkia säilytettiin huoneenlämpöiseen veteen (noin $+22^{\circ}\text{C}$) upotettuna ensimmäisen kuukauden ajan, jonka jälkeen myöhemmin koestettavat koekappaleet siirrettiin kylmähuoneeseen ($T = +7,5^{\circ}\text{C}$ ja $\text{RH} = 100\%$). Osa Tattarisuon savesta tehdyistä koekappaleista säilytettiin vertailun vuoksi koko ajan kylmähuoneessa veteen upotettuna.



Kuva 1. Stabiloidun saven näyteputki /11/.

5.1.2 Puristuskokeet

Koekappaleet koestettiin yksiakselisella puristuskoneella muodonmuutosnopeudella 0,4 mm/min. Koekappaleiden päät katkaistiin ja tasattiin siten, että näytteen pituus oli noin 100 mm (kaksi kertaa näytteen halkaisija). Puristulaitteen ylämäntä oli nivelellinen, jolloin näyte saattoi epähomogeenisuuden johdosta puristua myös epätasaisesti. Kokeen edistymistä seurattiin näyttöpäätteeltä ja koe keskeytettiin, kun jännitys oli alentunut huomattavasti murtumisen jälkeen. Tuloksena saatiin kokeen jännitys-muodonmuutos (σ - ϵ) -kuvaaja, maksimijännitys eli puristuslujuus (q) ja muodonmuutosmoduuli (E_v). Rinnakkaisista koetuloksista laskettiin keskiarvo. Tulokset on esitetty kappaleessa 5.3.1. Koelaitteisto on esitetty kuvassa 2 ja esimerkkikuvaaja kuvassa 3. Muodonmuutosmoduuli, joka määritettiin sekanttimuoduluna, on laskettu kaavasta 5.1.

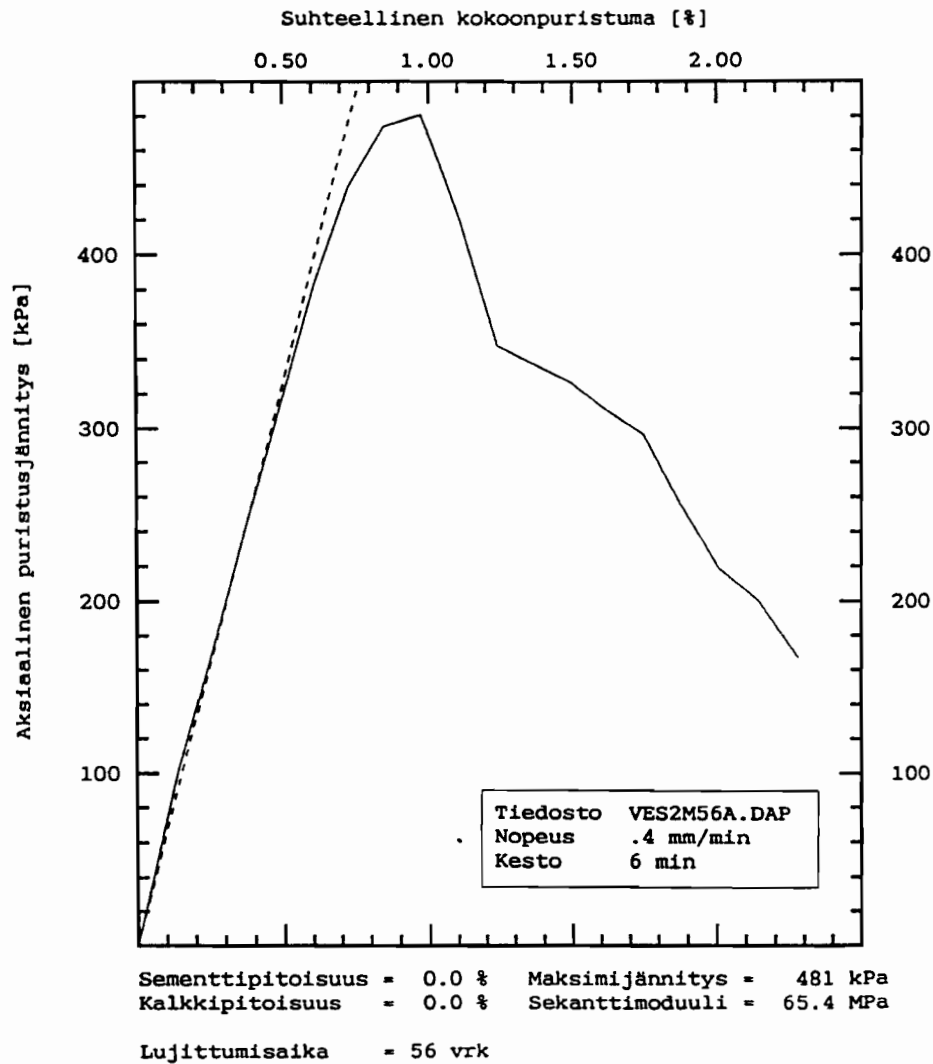
$$E_u = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (5.1)$$

jossa	E_u	on	muodonmuutosmoduuli	[kPa]
	$\Delta \sigma$		pystyjännityksen muutos	[kN/m ²]
	$\Delta \epsilon$		jännitysväliä $\Delta \sigma$ vastaava suhteellinen muodonmuutos	[-]



Kuva 2. Yksiaksaalinen puristuskoelaitteisto.

14



Kuva 3. Yksiakselisen puristuskokeen jännitys-muodonmuutos -kuvaaja.

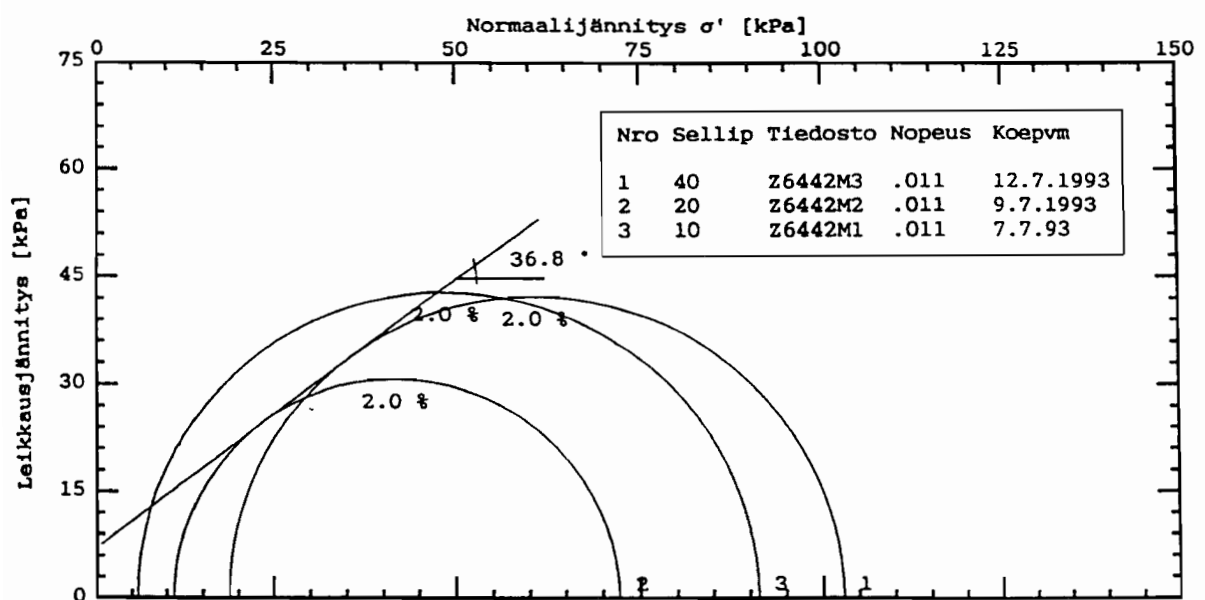
5.1.3 Kolmiakselialikokeet

Yhdelle Malminkaaren koemassalle tehtiin myös kolmiakselialikokeita kitkukulman, koheesion ja muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseksi. Koekappaleina käytettiin sideaineella 14 (10 %) stabiloitua Malminkaaren savea, joka oli lujittunut 28 vrk:n ajan. Koetyyppi oli konsolidoitu, suljettu koe, ja sellipaineina käytettiin arvoja 10, 20 ja 40 kPa olettaen stabiloidun saven sijaitsevan lähellä maanpintaa.

Kolmen koekappaleen tulokset olivat ristiriitaisia koekappaleiden epähomogeenisuudesta johtuen, ja neljäs koekappale turmeltui, joten kyseiselle massalle ei voitu luotettavasti arvioida tehokkaita lujuusparametreja (c' , ϕ') näiden koekappaleiden perusteella. Stabiloitujen koekappaleiden murtopintojen kaltevuudesta voidaan kuitenkin päätellä tehokkaan kitkakulman olevan suurempi kuin stabiloimattomilla savilla. Taulukossa 5 on esitetty eri sellipaineen arvoilla saavutetut puristusjännitykset.

Taulukko 5. Stabiloitun Malminkaaren saven kolmiaksisiaalikoetulokset. Sideaine 14 (10 %).

Sellipaine [kPa]	Kokeen suoritusnopeus [mm/min]	Maksimi puristusjännitys [kN/m ²]
0 (pur.koe)	0,400	56
10	0,011	86
20	0,011	62
40	0,011	86



Kuva 4. Stabiloitun Malminkaaren saven (sideaine 14, 10 %) Mohrin ympyrät.

Puristuskokeesta saatu puristusjännityksen maksimi on suhteellisen suuri verrattuna kolmiakσιαalikokeen tuloksiin, mikä johtunee osaksi moninkertaisesti suuremmasta puristusnopeudesta. Yksiakσιαalisessa puristuskokeessa murtuminen tapahtui likimäärin 1 % ja kolmiakσιαalikokeissa likimäärin 2 % muodonmuutoksen kohdalla. Kuvassa 4 on esitetty Mohrin ympyrät 2 % muodonmuutoksen kohdalla. On huomattava, että kolme ristiriitaista kolmiakσιαalikoetta eivät riitä kitkakulman ja koheesion luotettavaan määrittämiseen.

5.1.4 Ödometrikokeet

Vedenläpäisevyysominaisuuksien selvittämiseksi tehtiin stabiloidulle Malminkaa-ren savelle vakioportaisia CRS-ödometrikokeita. Kaikki kahdeksan massaa saatiin asetettua ödometrirengaaseen "häiriintymättömänä", ts. niitä ei jouduttu hie-nontamaan. Konsolidaatiokertoimien (c_v) minimiarvoiksi massoille saatiin 6,2 - 25,5 m²/a (0,002 - 0,008 cm²/s), jotka vastaavat siltin arvoja. Konsolidaatioker-roin oli sitä suurempi, mitä kovempi ja karkearakeisempi näyte oli. Konsolidaa-tiokertoimen avulla laskettuja vedenläpäisevyyskertoimen arvoja on esitetty kappaleessa 6.2.3.

5.2 Kenttäkokeet

5.2.1 Tattarisuon penkereet

Tattarisuon varalumenkaatopaikalla tehtiin stabilointikokeilu, jossa kaivetun saven ja paikalle tuodun sideaineen sekoittaminen suoritettiin kaivinkoneen kauhasta tehdyllä seulamurskaimella. Seulamurskaimen toimintaa on selostettu kappaleessa 9.1. Kaivinkoneet työskentelivät puoli metriä paksun louhe- ja murskekerroksen päällä, ja savi kaivettiin kerroksen reunalta pitkänomaisesta kaivannosta ja läjitettiin ko. kerroksen päälle. Koska saven vesipitoisuus oli 90 - 110 %, se ei häirittyinä pysynyt 0,3 metriä paksumpana kerroksena. Kaivun

jälkeen savikasan päälle annosteltiin sideainetta kaivinkoneen kauhalla ennalta arvioitu määrä. Sekoituksen edetessä massa alkoi pysyä paremmin kasassa. Tiivistäminen suoritettiin kaivinkoneen kauhalla tasoittamalla.

Alueelle tehtiin kaksi koepengertä, joista penger 1 stabiloitiin seoksella 4 (noin 25 %) ja penger 2 seoksella 14 (noin 10 %). Koepenger 1 oli korkeudeltaan 1,2 metriä ja tilavuudeltaan noin 110 m³, ja penger 2 oli korkeudeltaan 1,0 m ja tilavuudeltaan noin 55 m³. Koepenkereissä tehtiin siipikairauksia kuukauden ja kahdeksan kuukauden ikäisenä ja ruuvilevykokeita kahdeksan kuukauden ikäisenä (kohta 5.3.2). Penkereisiin asennettiin lämpötila-anturit ja painumalevyt painumisen ja mahdollisen routanousun arvioimiseksi. Lisäksi seurattiin aikaisemmin eri sideaineilla tehtyjen koekuoppien painumista. Penkereiden painuma- ja lämpötilamittausten tulokset on esitetty kappaleessa 6.3.

Työmaalla sekoitettua massaa sullottiin laboratoriossa näyteputkiin, joista suurin osa säilytettiin koko ajan kylmähuoneessa. Vertailun vuoksi muutama putki jätettiin huoneenlämpötilaan lujittumaan. Lisäksi tehtiin laboratoriossa sekoittamalla vertailukoekappaleet, joiden sideainepitoisuus arvioitiin kenttäkoetta vastaavaksi.

5.2.2 Pikku-Huopalahden koealue

Pikku-Huopalahdessa tehtiin stabilointikokeilu aktivaattorilla, missä testattiin kah- ta eri sideainetta. Kumpikin koealue oli pinta-alaltaan 5 * 5 m² ja syvyydeltään 2 metriä. Sideaine syötettiin savisen liejun sekaan aktivaattorin kärjen varressa olevaa putkea pitkin. Sideaine annosteltiin liikuttamalla kärkeä pystysuunnassa ja sekoitettiin liikuttelemalla sitä vaakasuunnassa. Sideaineen menekkiä voitiin seurata sideaineauton vaa'an lukemista. Aktivaattorin toimintaa on selostettu kappaleessa 9.3. Alue kairattiin puristin- (CPT) ja siipikairoilla 7, 14, 28 ja 56 vrk:n ikäisenä ja lisäksi tehtiin ruuvilevykokeet 56 vrk:n ikäisenä (kohta 5.3.2). Pikku-Huopalahden savesta tehtiin myös vertailukoekappaleet laboratoriossa.

5.3 Koetulokset

5.3.1 Laboratoriotulokset

Malminkaaren savessa ei lujittumisen kannalta ollut ongelmia. 91 vuorokauden lujittumisen jälkeen oli suurimmilla sideainepitoisuuksilla stabiloidun saven leikkauslujuus kasvanut 6-96 -kertaiseksi. Sementteistä portlandsementillä stabiloidut koekappaleet olivat puristuslujuudeltaan parhaita ja yleissementillä stabiloidut seuraavia. Poltetulla kalkilla saadut puristuslujuudet jäivät alhaisiksi, ja masuunikuonalla oli lujittavia vaikutuksia vasta suurina pitoisuuksina. Lukuisten sideaineseosten tuloksista kävi ilmi, että lentotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta sisältävistä seoksista löytyy hinnaltaan erittäin kilpailukykyisiä vaihtoehtoja perinteisille sideaineille vaaditusta lujuustasosta riippuen.

Taulukossa 6 ja liitteessä 1 on esitetty stabiloidun Malminkaaren saven koetulokset. Tuloksista huomataan, että seos 14 oli parempi kuin seos 4 pienillä sideainepitoisuuksilla 6 ja 10 %, kun taas seos 4 oli parempi 25 % pitoisuudella. Esimerkkinä voidaan mainita, että seokset 4 ja 14 olivat tässä tapauksessa poltettua kalkkia parempia, vaikka ne ovat hinnaltaan alle puolet kalkin hinnasta. Taulukossa on esitetty suoraan puristuskokeesta saadut puristuslujuudet. Leikkauslujuuden voidaan olettaa olevan likimäärin puolet puristuslujuuden arvosta.

Taulukko 6. Stabiloidun Malminkaaren saven puristuskoetulokset.

KOES- TUSIKÄ vrk	PITOI- SUUS %	PURISTUSLUJUUS q [kN/m ²] ja (MUODONMUUTOSMODUULI E_u [MPa])						(maalaji liSa w = 68 - 75 %)	
		portland- sementti	yleis- sementti	poltettu kalkki	masuuni- kuona	seos 4	seos 14		
3	6	167 (25,3)	63 (15,6)	13	10	6	11		
	10	278 (42,3)	88 (34,4)	13	11	7	28 (5,6)		
	25	940 (207)	284 (100)	62 (4,6)	16	28 (3,8)	56 (14,3)		
28	6	211 (64,6)	151 (40,7)	15	20	11	25 (3,6)		
	10	438 (159)	236 (52,0)	19	18	32 (4,6)	56 (13,4)		
	25	1611 (471)	1082 (233)	53 (9,5)	92 (22,0)	429 (124)	210 (44,3)		
91	6	275 (78,5)	187 (44,2)	22 (1,3)	25 (1,7)	14	31 (5,8)		
	10	541 (122)	338 (58,7)	30 (1,3)	30 (3,7)	35 (3,4)	61 (17,0)		
	25	1931 (387)	1390 (404)	116 (4,7)	1583 (433)	298 (83,4)	229 (60,8)		

Tattarisuon puristuskoetuloksista huomataan, että laboratoriossa sekoitettujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat paljon suurempia kuin maastossa sekoitettujen koekappaleiden lujuudet. Tämä johtuu ainakin osittain siitä, että sekoittuminen oli epätäydellistä työmaaolosuhteissa ja sideainepitoisuuden arviointi oli hankalaa. Pitoisuus laskettiin arvioimalla savi- ja sideainekuutiometrien määrät. Laboratoriossa sekoitettujen koekappaleiden leikkauslujuus oli 91 vuorokauden ikäisenä 3-9 -kertainen stabiloimattoman saven lujuuteen verrattuna. Sen sijaan kokoajan kylmähuoneessa säilytetyt koekappaleet eivät lujittuneet juuri lainkaan. Taulukossa 7 on esitetty stabiloidun Tattarisuon saven koetulokset.

Taulukko 7. Stabiloidun Tattarisuon saven puristuskoetulokset.

KOESTUS- IKÄ	SÄILYTYS- LÄMPÖTILA	PURISTUSLUJUUS q [kN/m ²] ja E_u [MPa] (maalaji liSa, $w = 80 - 110 \%$)					
		4 (L)	4 (P)	4 (L)	14 (L)	14 (P)	14 (L)
vrk	°C	20%	20 - 26 %	25%	10%	10 - 15 %	15%
5	7,5		5 (0,3)			10 (0,3)	
	22	29 (0,6)		46 (1,5)	36 (0,7)		52 (1,8)
28	7,5		7 (0,2)			13 (0,2)	
	22	97 (3,6)	19 (0,4)	133 (5,2)	46 (1,8)	16 (0,3)	84 (3,5)
91	7,5		21 (3,4)			12 (3,0)	
	22 + 7,5 *	111 (26,4)		174 (26,9)	52 (7,6)		98 (17,0)

L = laboratoriossa sekoitetut massat

P = penkereistä otetut koemassat

* = koekappaleita säilytettiin ensimmäisen kuukauden ajan +22°C lämpötilassa ja seuraavan kahden kuukauden ajan +7,5°C lämpötilassa.

Viikin saven stabiloitumista tutkittiin kahdessa eri maakerroksessa. Sideainemäärät oli valittu erikseen massastabiloinnin ja syvästabiloinnin tarpeita vastaaviksi. Syvästabilointia silmälläpitäen testattiin sideainetta Lohjamix A (15 %) ja sekoitusta portlandsementti 5 % ja poltettu kalkki 5 %. Pitoisuudet valittiin siten, että sideaineiden hinnat olivat suurinpiirtein yhtäsuuret. Viikissä toteutettiin myöhemmin syvästabilointikokeilu, mutta pilareiden koestustulokset eivät tällä hetkellä ole käytettävissä. Muut laboratoriossa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät valittiin massastabilointia silmälläpitäen. Stabiloidun Viikin saven koetulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Stabiloidun Viikin saven puristuskoetulokset.

KOES- TUS- IKÄ vrk	VESI- PITOI- SUUS %	PURISTUSLUJUUS q [kN/m ²]									
		portland- sementti	kalkki + portland- sementti	kalkki + lento- tuhka	kalkki + rikinp. lopput.	seos 14	seos 20	kalkki + portland- sementti	Lohja mix A		
		4%	2 + 2 %	3 + 30 %	3 + 30 %	9%	9%	5 + 5 %	15%	10%	6%
7	Sa 83%	17	44	23	33	43	10	52	202		
	ljSa 89%	21	21	14	13	10	11	28	202		
14	Sa 83%	16	42	22	43	45	11	75	249	197	92
	ljSa 89%	18	27	13	15	12	11	34	262		
28	Sa 83%	27	80	29	83	49	12	83	327	206	69
	ljSa 89%	41	30	13	25	14	14	32	315		
91	Sa 83%	37	90	33	114	55	19	93	254		
	ljSa 89%	27	48	20	18	19	16	41	457		

KOES- TUS- IKÄ vrk	VESI- PITOI- SUUS %	MUODONMUUTOSMODUULI E _u [MPa]									
		portland- sementti	kalkki + portland- sementti	kalkki + lento- tuhka	kalkki + rikinp. lopput.	seos 14	seos 20	kalkki + portland- sementti	Lohja mix A		
		4%	2 + 2 %	3 + 30 %	3 + 30 %	9%	9%	5 + 5 %	15%	10%	6%
7	Sa 83%	2,8	6,9	1,4	3,4	9,8	1,8	8	53,1		
	ljSa 89%	3,1	1,5	0,8	0,8	0,4	1,2	2,1	44,8		
14	Sa 83%	1,4	10	3,1	13,4	12,3	1,9	10,6	53,8	27,5	12,9
	ljSa 89%	2,9	2,9	0,9	1,1	0,6	1	4,6	61,1		
28	Sa 83%	5,5	18,9	4,1	24,4	9,3	2,2	17,5	88,4	55,2	15,5
	ljSa 89%	7,6	5,4	1,5	3,4	1,8	1,5	4,7	67,5		
91	Sa 83%	4,1	12,4	3,4	17,5	8,6	2,7	12,8	52,2		
	ljSa 89%	6,3	6,3	1,2	5,2	2,1	1,6	5,4	70,8		

Viikin saven leikkauslujuus kasvoi stabiloinnilla 1-23 -kertaiseksi 91 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Koetuloksista voidaan päätellä, että liejuinen savi lujittui pääsääntöisesti huonommin kuin lihava savi. Muutamat sideaineet eivät lujittaneet liejuista kerrosta ollenkaan, kun taas portlandsementti lujitti liejuisen kerroksen 7, 14 ja 28 vuorokauden ikäisenä paremmin kuin lihavan savikerroksen. Portlandsementilläkin liejuisen kerroksen lopullinen lujittuminen jäi hyvin alhaiseksi. Poikkeuksen teki Lohjamix A, joka tehosi yhtä hyvin kumpaankin maakerrokseen. Lohjamix A lujitti saven huomattavasti paremmin kuin vastaavan hintainen sekoitus sementti 5 % ja poltettu kalkki 5 %. Kalkin ja rikinpoiston lopputuotteen sekoitus näytti antavan paremman lujuuden kuin kalkin ja lentotuhkan sekoitus. Kalkin ja sementin sekoituksella saavutettiin

parempi lujuus kuin jos sideaineena olisi ollut vastaava määrä sementtiä. Yllättävä tulos on se, että lähes sama lujuus saavutettiin seoksella portlandsementti 2 % ja poltetu kalkki 2 % kuin seoksella 5 % ja 5 %.

Pikku-Huopalahden ensimmäisessä tutkimuksessa vertailtiin suomalaista ja venäläistä portlandsementtiä sekä yleissementtiä. Lisäksi vertailtiin erilaisten maakerrosten lujittumista. Stabiloidun Pikku-Huopalahden saven koetulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Eri sementtien vertailu Pikku-Huopalahden saven stabiloinnissa.

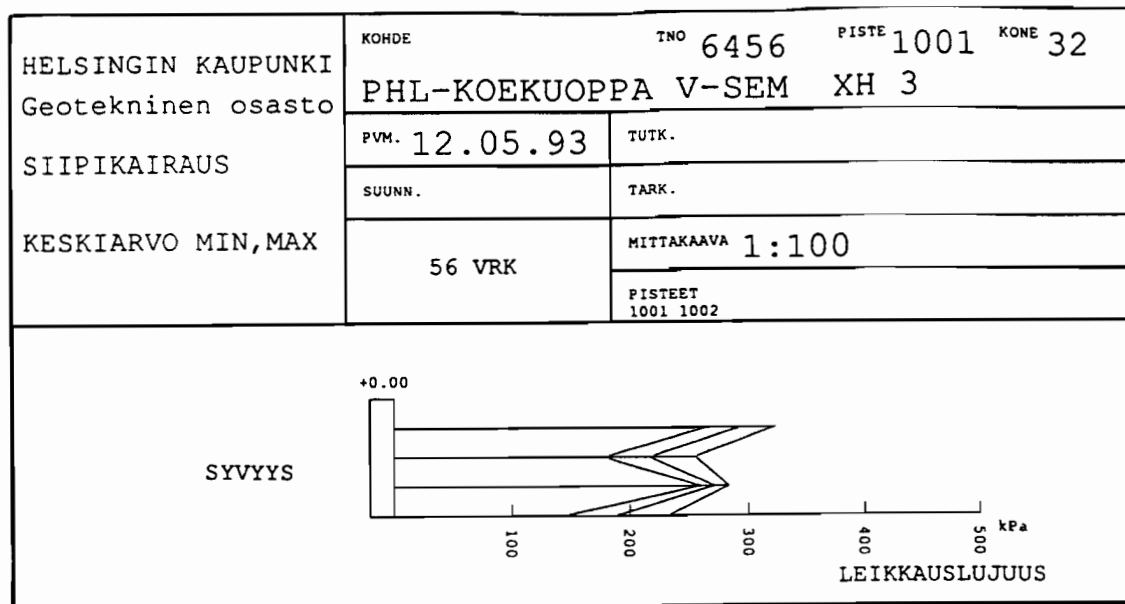
SIDEAINE JA PITOISUUS	KOES- TUSIKÄ [vrk]	SY- VYYS [m]	MAA- LAJI	VESI- PITOI- SUUS	PURISTUS- LUJUUS q [kN/m ²]	MUODONMUU- TOSMODUULI E_u [MPa]
Portlandsementti 160 kg/m ³	56	4	liSa	112%	963	223
		7	laSa	77%	496	111
		9	saLj	113%	459	117
Yleissementti 160 kg/m ³	56	4	liSa	112%	596	119
		7	laSa	77%	478	71
		9	saLj	113%	701	136
Venäläinen portlandsementti 160 kg/m ³	14	4	liSa	112%	1012	114
		7	laSa	77%	615	96
		9	saLj	113%	546	172
	28	4	liSa	112%	1133	280
		7	laSa	77%	583	219
		9	saLj	113%	790	85,2
	56	4	liSa	112%	782	141
		7	laSa	77%	431	63,9
		9	saLj	113%	572	113

Pikku-Huopalahden saven leikkauslujuus kasvoi sementeillä stabiloitaessa 22-48 -kertaiseksi 91 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Venäläinen sementti näyttää kaikenkaikkiaan sijoittuvan lujuudeltaan suomalaisen portlandsementin ja yleissementin välille, vaikka eri maakerroksissa onkin havaittavissa eroavuuksia. Venäläisen sementin koetulosten pienenemistä 56 vuorokauden kohdalla ei voitu selittää tämän tutkimuksen perusteella. Keskiarvo on laskettu kolmen rinnakkaisen koetuloksen perusteella sekä 28 että 56 vrk:n kohdalla.

5.3.2 Kenttäkokeiden tulokset

Tattarisuon penkereet sekä Pikku-Huopalahden koealue tutkittiin siipikairauksilla ja ruuvilevykokeilla. Pikku-Huopalahdessa tehtiin myös puristinkairauksia. Kokeita tehtiin 4-5 kappaletta kultakin syvyydeltä ja tuloksista laskettiin keskiarvo.

Siipikairauksessa käytettiin nk. pilarisiipikairaa, jonka siivekkeen leveys oli 130 mm ja korkeus 65 mm. Siipikairalla saatiin suoraan tulokseksi leikkauslujuus eri syvyyksillä. Puristinkairalla saatiin puristuslujuus, joka Pikku-Huopalahden aikaisempien tulosten ja siipikairausten avulla muutettiin leikkauslujuudeksi (s_u). Kuvassa 5 on esitetty siipikairalla ja kuvassa 6 puristinkairalla saatavat kairausdiagrammit.



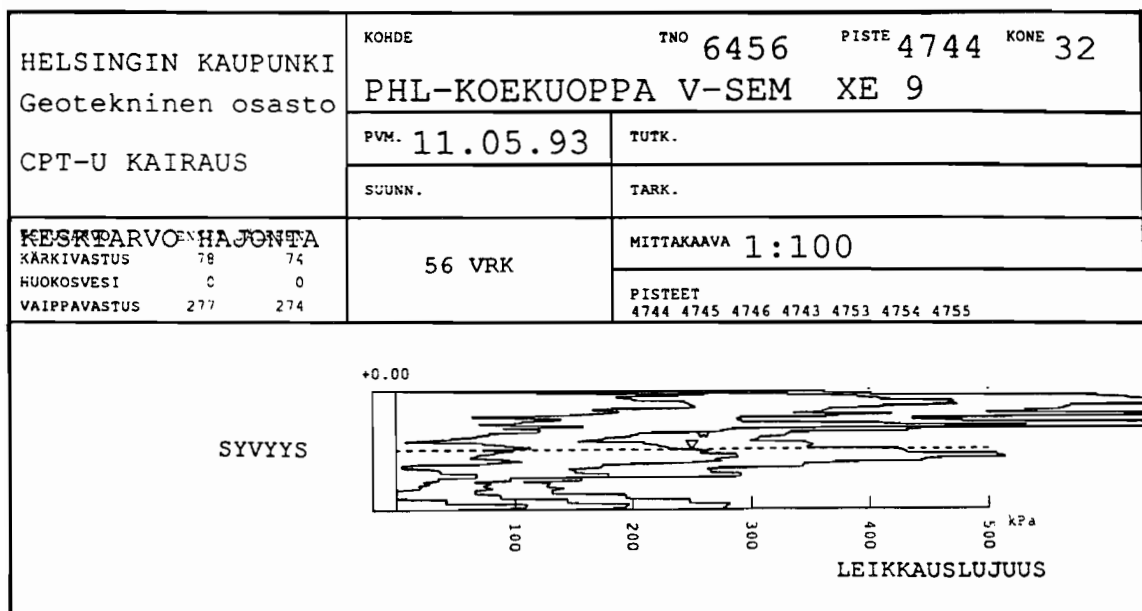
Kuva 5. Siipikairan kairausdiagrammi.

Ruuvilevykokeessa käytettiin ruuvilevyä, jonka halkaisija oli 160 mm. Ruuvilevy kierrettiin varovaisesti häiriintymisen välttämiseksi haluttuun syvyytasoon ja kuormitusportaat valittiin suunnittelupohjapaineen arvoja vastaaviksi. Koemas-

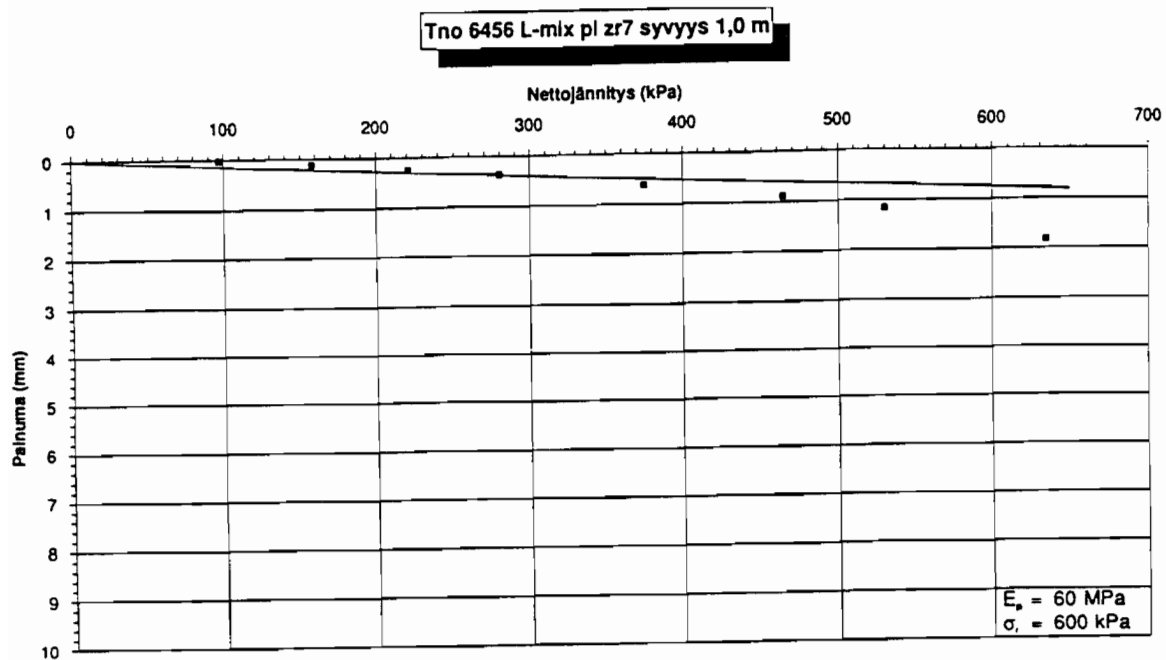
soja ei kuormitettu murtoon asti, jolloin myötöjännitys (σ) määritettiin jännitys-muodonmuutos -kuvaajan kohdasta, jossa muodonmuutos kasvaa äkillisesti. Jos selvää myötörajaa ei ollut havaittavissa, myötöjännitys määritettiin kohdasta, jossa painuma oli 1 % levyn halkaisijasta. Muodonmuutosmoduuli (E_p) saatiin kaavasta 5.2 /16,19/. Kuvassa 7 on esitetty ruuvilevykokeen σ - ϵ -kuvaaja.

$$E_p = w(1 - \nu^2) \frac{I * \Delta \sigma * \varnothing}{s} \quad (5.2)$$

jossa	E_p	on	muodonmuutosmoduuli	[kPa]
	w		muotokerroin ($\pi/4$, kun pyöreä levy)	
	ν		Poissonin luku (0,5)	
	$\Delta \sigma$		mitattu nettojännitysväli kimmoalueella	[kN/m ²]
	$\varnothing$		levyn halkaisija	[mm]
	s		mitattu painuma	[mm]
	l		kerroin (1,0, kun kuormitusvyvyys < 1 metri, 0,87, kun kuormitusvyvyys > 1 metri)	



Kuva 6. Puristinkairan (CPT) kairausdiagrammi.



Kuva 7. Ruuvilevykokeen jännitys-muodonmuutos -kuvaaja.

Tattarisuon kenttäkokeiden tuloksissa oli paljon hajontaa, mikä ainakin osittain johtuu siitä, että kairausten yhteydessä penkereistä löytyi kohtia, joihin sideainetta ei ollut sekoittunut ollenkaan. Tattarisuon koepenkereiden siipikairaus- ja ruuvilevykoetulokset on esitetty taulukossa 10. Tuloksia laboratoriokoetuloksiin verrattaessa on huomattava, että laboratoriotulokset on esitetty puristuslujuuksina ja kenttäkokeiden tulokset leikkauslujuuksina.

Tuloksista nähdään, että koepenger 2 (seos 14, 10 %) on lujittunut paremmin kuin koepenger 1 (seos 4, 25 %). Laboratoriokokeissa sen sijaan seoksella 4 saadut lujuudet olivat seoksella 14 saatuja parempia (vrt. taulukko 7). Seoksella 14 saadut puristuskoetulokset vastaavat hyvin laboratoriossa sekoitettujen koekappaleiden tuloksia. Sen sijaan seoksella 4 saadut tulokset ovat alle puolta pienempiä kuin laboratoriossa saadut tulokset. Kenttäkokeessa Tattarisuon saven leikkauslujuus kasvoi stabiloinnilla kaikenkaikkiaan 3-7 -kertaiseksi kahdeksan kuukauden lujittumisen jälkeen. Koetulosten eroavuuksia

voidaan selittää sideaineen huonon sekoittumisen ja sideainemäärän arvioinnin vaikeuden lisäksi myös sillä, ettei penkereitä kenttäolosuhteissa tiivistetty yhtä huolellisesti kuin koemassoja laboratoriossa.

Taulukko 10. Tattarisuon penkereiden koetulokset.

SYVYYS m	Penger 1 Seos 4		Muodonmuutos- moduuli [MPa] (ja myötöjännitys [kPa]) 8 kk	Penger 2 Seos 14		Muodonmuutos- moduuli [MPa] (ja myötöjännitys [kPa]) 8 kk
	Leikkauslujuus s _u [kN/m2]			Leikkauslujuus s _u [kN/m2]		
	1 kk	8 kk		1 kk	8 kk	
0,3	12,1	32	2,8 (57)	27,7	70	4,0 (100)
0,6	10,6	35	4,1 (84)	31,9	58	5,8 (77)
0,9	10,2	31	-	17,9	-	-
1,2	12,1	-	-	-	-	-

Pikku-Huopalahden toisessa tutkimuksessa vertailtiin venäläisellä sementillä ja Lohjamix B:llä stabiloidun saven lujittumista maasto- ja laboratorio-olosuhteissa. Taulukoissa 11a) ja b) on esitetty Pikku-Huopalahden stabiloidun koealueen tulokset.

Koetuloksista huomataan, että laboratoriossa tehtyjen koekappaleiden ja puristinkairausten (CPT) avulla määritetyt leikkauslujuudet vastaavat toisiaan melko hyvin. Laboratoriossa tehtyjen koekappaleiden leikkauslujuudet olivat yhtä poikkeusta lukuunottamatta 1,3 - 2 kertaa suuremmat kuin puristinkairalla määritetyt lujuudet. Puristinkairauksesta saadut puristuslujuudet oli muutettu leikkauslujuuksiksi siipikairaustulosten ja aikaisempien kokemusten avulla.

Myös Pikku-Huopalahden kenttäkokeiden tuloksissa oli paljon hajontaa. Kairausten yhteydessä koealueelta löytyi kohtia, joissa massa ei ollut lujittunut juuri lainkaan sideaineen vähyyden vuoksi. Sideaineen sekoittuminen oli varsinkin koealueen alimmissa kerroksissa jäänyt paikoitellen varsin heikoksi.

Taulukko 11a). Pikku-Huopalahden stabiloidun koealueen leikkauslujuudet.

KOESTUS- IKÄ vrk	maalaji saLi	LEIKKAUSLUJUUS s_u [kN/m ²] ja (MUODONMUUTOSMODUULI E_u [MPa])						sideainetta 108 kg/m ³
	SYVYYS m	SIIPIKAIRAUUS		CPT-KAIRAUUS		PURISTUSKOE		
		Venäläinen portlands.	Lohjamix B	Venäläinen portlands.	Lohjamix B	Venäläinen portlands.	Lohjamix B	
7	0 - 0,5			150	120			
	0,5 - 1,0	170	100	220	135			
	1,0 - 2,0	175	110	145	55	194 (38,8)	82 (24,2)	
	2,0 - 3			20	55			
14	0 - 0,5			210	380			
	0,5 - 1,0	120	125	210	260			
	1,0 - 2,0	80	110	130	120	260 (52,9)	107 (35,3)	
	2,0 - 3			40	200			
28	0 - 0,5			250	165			
	0,5 - 1,0	51	16	130	165			
	1,0 - 2,0	51	16	240	105	386 (110)	151 (35,0)	
	2,0 - 3			135	80			
56	0 - 0,5			360	170			
	0,5 - 1,0	260	230	260	80			
	1,0 - 2,0	235	80	165	80	219 (94,3)	134 (47,2)	
	2,0 - 3							

Taulukko 11b). Pikku-Huopalahden stabiloidun koealueen ruuvilevykoetulokset.

SYVYYS m	Koestusikä 56 vrk			
	Venäläinen portlandsementti		Lohjamix B	
	Muodonmuutos- moduuli [MPa]	Myötöjännitys [kPa]	Muodonmuutos- moduuli [MPa]	Myötöjännitys [kPa]
0 - 0,5	54	> 600	16	235
0,5 - 1,0	36	> 500	60	600
1,0 - 2,0	13	225	-	-

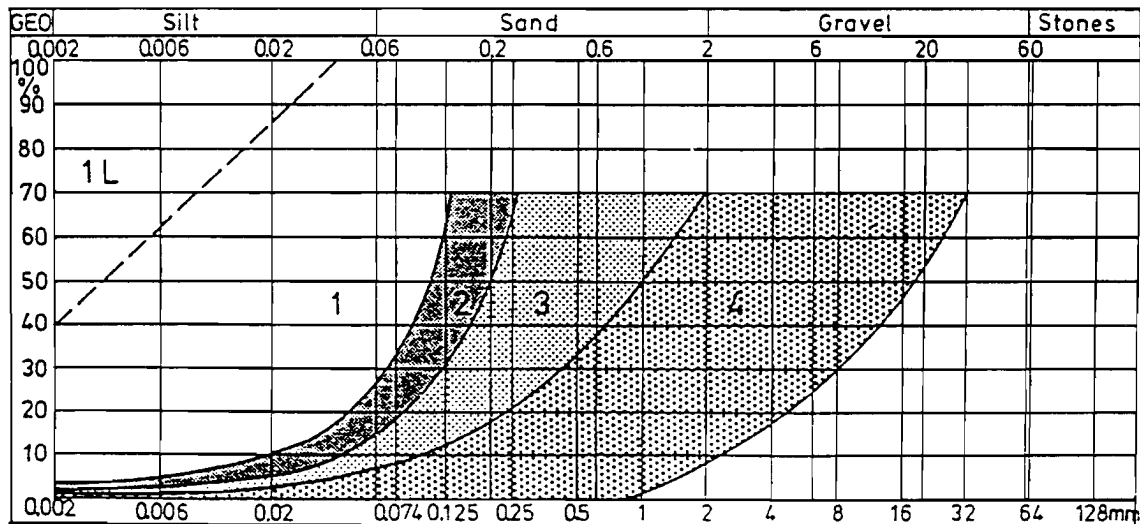
6. ROUTIVUUS

6.1 Routivuuskriteerit

6.1.1 Luokitusominaisuudet

Maalajien routivuutta voidaan tarkastella luokitusominaisuuksiin, hydraulisiin ominaisuuksiin tai routanousukokeisiin perustuvilla kriteereillä. Luokitusominaisuuksista yksinkertaisimmin routivuutta voidaan arvioida rakeisuuden perusteella, jolloin otetaan huomioon rakeisuuskäyrän muoto sekä tiettyjä raekokoja vastaavat läpäisyprosentit. Käytännössä routivuuden arviointi tapahtuu kuvan 8 mukaisilla rajakäyrillä /8,34/. Alueelle 1 sijoittuva maalaji on routiva ja alueelle 1L sijoittuva lievästi routiva. Maalajit, joiden rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 2, 3 tai 4, ovat routimattomia, elleivät käyrien alapäätt pääty pysyvästi vasemmanpuoleisen rajakäyrän yläpuolelle. Routimattomilla maalajeilla kapillaarisen nousukorkeuden tulee olla alle 1 metri. Routivuuden voimakkuutta ei saada rakeisuuskäyristä selville /5,34/.

Maalajin routivuutta voidaan arvioida pelkästään rakeisuuden perusteella silloin, kun kyseessä ovat rakenteet, joille ei ole asetettu tiukkoja vaatimuksia routivuuden suhteen tai kun maalajin luokitus routiviin tai routimattomiin riittää /5/. ISSMFE:n kansainvälinen routakomitea suositaa routivuuden arviointia ensisijaisesti rakeisuuden perusteella ja tämän jälkeen tarvittaessa (esim. rajatapauksissa) täydentävillä routakriteereillä. Muita luokitusominaisuuksiin perustuvia arviointikeinoja ovat konsistenssi (juoksuraja, plastisuusluku ja neuvostoliittolainen juoksevuusluku), ominaispinta-ala ja huokoskokojakauma sekä hienoustekijä. Konsistenssin ja hienoustekijän selvittäminen onnistuu lähinnä hienorakeisille maalajeille. Ominaispinta-alan ja huokoskokojakauman perusteella routivuutta on käytännössä tarkkojen raja-arvojen puuttuessa hankala arvioida /5/. Stabiloitujen massojen rakeisuuskäyriä on esitetty kohdassa 6.2.2.



Kuva 8. TVH:n ja ISSMFE:n routakomitean suosittelema routivuuskriteeri /34,8/.

6.1.2 Hydrauliset ominaisuudet

Hydraulisia ominaisuuksia, joiden perusteella maalajin routivuutta voidaan arvioida, ovat kapillaarinen nousukorkeus (h_c), vedenläpäisevyyskerroin (k) ja vedenpidätyskäyrä (pF-käyrä). Hydraulisiin ominaisuuksiin perustuvien kriteerien käyttämistä vaikeuttaa osittain riittävän vertailumateriaalin ja selvien luokitusohjeiden puuttuminen. Kapillaarisen nousukorkeuden perusteella maalajit voidaan jakaa melko luotettavasti routimattomiin ja routiviin /5/. ISSMFE:n routakomitea suosittelee maalajin routivuuden luokittelua taulukon 12 mukaisesti. Vastaava jaottelu voidaan tehdä vedenläpäisevyyskerroimen perusteella (taulukko 12 /2/). Vedenpidätyskäyrän perusteella voidaan melko luotettavasti arvioida routivuutta, mutta routivuusluokkien välisten raja-arvojen määrittely vaatii lisäselvityksiä /5/. Stabiloitujen massojen hydraulisia ominaisuuksia vedenpidätyskäyrää lukuunottamatta on arvioitu kohdassa 6.2.3.

Taulukko 12. Maalajien routivuuden arviointi kapillaarisen nousukorkeuden /8/ ja vedenläpäisevyyskertoimen perusteella /2/.

Routivuus	Kapillaarinen nousukorkeus [m]	Routivuus	Vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
routimaton	$h_c < 1$	routimaton	$k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$
lievästi routiva	$1 \leq h_c < 1,5$	rajatapaus	$1,0 \cdot 10^{-9} < k < 1,3 \cdot 10^{-9}$
keskinkertaisesti routiva	$1,5 \leq h_c < 2$	routiva	$1,3 \cdot 10^{-9} \leq k \leq 1,7 \cdot 10^{-6}$
		rajatapaus	$1,7 \cdot 10^{-6} < k < 1,0 \cdot 10^{-5}$
erittäin routiva	$h_c \geq 2$	routimaton	$k \geq 1,0 \cdot 10^{-5}$

6.1.3 Routanousukokeet

Maan routivuutta ja routanousua voidaan mitata erityyppisillä routanousukokeilla. Koe voi toimintaperiaatteiltaan olla vakioämpötilakoe, vakioroutaantumisenopeuskoe tai koe, jossa lämmön poistuminen tapahtuu vakionopeudella /5/. Routanousukokeessa tutkittava maanäyte asetetaan routaselliin, josta routanousua ja lämpötilaa eri kohdissa voidaan mitata. Kun tutkitaan luonnontilaisen maalajin routivuutta, on häiriintymättömän näytteen käyttäminen routasellissä suositeltavaa, mutta selvitetessä maarakenteen, esim. stabiloidulla maamassalla tehdyn täytön, routivuutta, voidaan näyte myös rakentaa selliin. Näytteen tiheyden sellissä tulisi vastata maalajin tai täytteen luonnontilaista tiheyttä, ja näyte on kyllästettävä vedellä ennen kokeen aloittamista /8/.

Vakioämpötilakokeen tuloksista voidaan määrittää segregatiopotentiaali SP, jonka perusteella maalajin routivuutta voidaan arvioida. Segregatiopotentiaali määritellään kaavoilla 6.1 ja 6.2 /5/.

$$SP = \frac{v}{gradT} \quad (6.1)$$

$$v = \frac{dh}{1.09 \cdot dt} \quad (6.2)$$

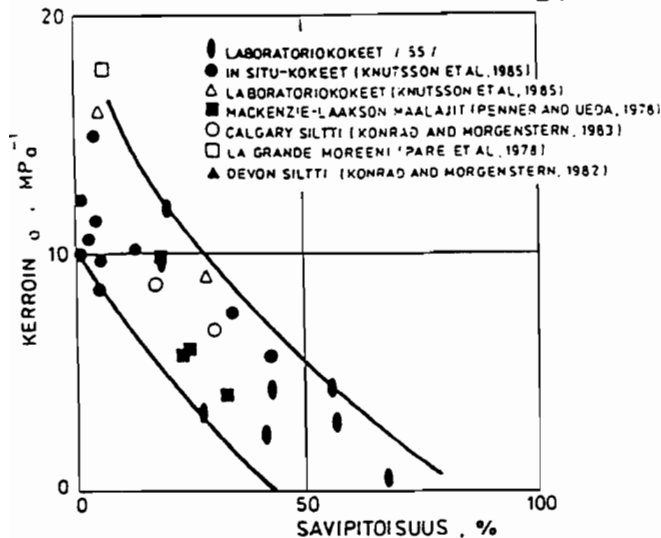
joissa	SP	on	segregaatiopotentiaali kokeessa käytetyllä kuormituksella	[mm ² /Kh]
	v		veden virtausnopeus näytteeseen	[mm/h]
	gradT		lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa	[K/mm]
	dh		näytteen routanousu ajassa dt	[mm]
	dt		routanousuun kulunut aika	[h]

Routivuusluokituksessa käytetty SP_o saadaan laskettua kaavan 6.3 mukaan jakamalla SP kertoimella, joka riippuu käytetystä kuormituksesta ja hienoaines-pitoisuudesta kuvan 9 mukaan /13/. Routanousukokeesta voidaan saada myös suoraan SP_o tekemällä koe niin pienellä kuormituksella kuin kokeen onnistu-misen kannalta on mahdollista.

$$SP_o = \frac{SP}{e^{-a\sigma}} \quad (6.3)$$

jossa	SP_o	on	segregaatiopotentiaali nollakuormalla	[mm ² /Kh]
	SP		segregaatiopotentiaali kuormitettuna	[mm ² /Kh]
	e		Neperin luku	[-]
	a		savipitoisuudesta riippuva kerroin (saadaan kuvasta 9)	[1/MPa]
	σ		pintakuorma	[MPa]

Segregaatiopotentiaali voidaan määrittää myös in situ -mittauksista edellyttäen, että osittain jäätyneen maan lämpötilagradientti ja jäätymisrintamaan virtaavan veden määrä tunnetaan /15/. Routivuusluokitus voidaan tehdä Konradin /12/ tai



Kuva 9. Pintakuorman vaikutus segregatiopotentiaaliin savipitoisuuden funktiona /9,5/.

Taulukko 13. Routivuusluokitus ISSMFE:n /8/ ja Konradin /12/ esittämän luokituksen mukaan.

Routivuus- luokitus /8/	Segregaatiopo- tentiaali [mm^2/Kh]	Routivuus- luokitus /12/	Segregaatiopo- tentiaali [mm^2/Kh]
erittäin routiva	$SP_0 \geq 3,0$	äärimmäisen voimakkaasti routiva	$SP_0 \geq 18,0$
		erittäin voimak- kaasti routiva	$7,2 \leq SP_0 < 18$
		voimakkaasti routiva	$3,6 \leq SP_0 < 7,2$
keskinkertai- sesti routiva	$1,5 \leq SP_0 < 3,0$	keskinkertai- sesti routiva	$0,72 \leq SP_0 < 3,6$
lievästi routiva	$0,5 \leq SP_0 < 1,5$	lievästi routiva	$0,18 \leq SP_0 < 0,72$
routimaton	$SP_0 < 0,5$	routimaton	$SP_0 < 0,18$

ISSMFE:n /8/ esittämien raja-arvojen perusteella (taulukko 13). Useimmissa tapauksissa ISSMFE:n luokitus antaa Konradin luokitusta lievemmän määritelmän routivuudelle. Lisäksi ISSMFE:n luokituksessa on Konradin luokituksen

kolme ylintä luokkaa yhdistetty käytännöllisistä syistä yhdeksi luokaksi. Segregaatiopotentiaalin avulla voidaan laskea routanousun määrä, kun tunnetaan lämpötilagradientti ja sen vaikutusaika /5/.

Edellä mainittujen kokeiden perusteella voidaan arvioida maaperän tai maa-rakenteen in situ -routivuutta, kun otetaan huomioon vallitsevat olosuhteet. Mitä paremmin routanousukokeen olosuhteet vastaavat todellista tilannetta, sitä paremmin in situ -routivuutta voidaan arvioida. Tärkeimmät maarakenteen routivuuteen vaikuttavat tekijät ovat rakenneratkaisut (mahdollinen routasuojaus), maalajiominaisuudet, pakkasmäärä ja sen kertymisnopeus sekä veden esiintyminen maassa /8/.

6.1.4 Stabiloidun saven routivuus

Stabiloidun saven routivuuden arviointi on hankalampaa kuin stabiloimattoman. Saven leikkauslujuus moninkertaistuu stabiloitaessa ja plastisuus- ym. geotekniset ominaisuudet muuttuvat. Niinpä routivuuskriteereistä tulevat kyseeseen lähinnä rakeisuus, kapillaarinen nousukorkeus, vedenläpäisevyys ja routanousukokeet. Stabiloidun saven routivuuteen vaikuttavat savi, käytetty sideaine sekä sideaineen määrä. Kujala on väitöskirjassaan /15/ todennut saven routivuuden vähenevän sementtistabiloinnilla ja kasvavan kalkkistabiloinnilla. Koekappaleita oli vain yksi kumpaakin, jolloin luotettavien johtopäätösten tekeminen on epävarmaa. Vastaavasti sementillä stabiloidun saven routanousupaine oli suurempi kuin kalkkistabiloidun saven. Kaikkein pienin routanousupaine oli stabiloimattomalla savella. Tämä johtuu siitä, että näytteet, joiden kokoonpuristuvuus on pieni, kehittävät suuren routanousupaineen. Sementtistabiloitu savi oli paljon kovempaa ja sillä oli pienempi kokoonpuristuvuus kuin kalkkistabiloidulla savella /15/. Kappaleessa 6.2.1 on esitetty stabiloitujen massojen routivuuden selvittämiseksi tehtyjen kokeiden tulokset.

6.2. Laboratoriossa tehdyt routakokeet

6.2.1 Routanousukokeet

Tattarisuon, Malminkaaren ja Viikin saviille tehtiin kullekin neljä avointa vakio-
lämpötilakoetta. Savien geotekninen kuvaus on kappaleessa 4. Eri sideaineilla
ja sideainemäärillä stabiloitujen savien routivuutta tutkittiin kuukauden lujittumi-
sen jälkeen. Kokeessa näytteet sullottiin routaselliin, jonka jälkeen ne kyllästettiin
vedellä. Tämän jälkeen näytteen yläpintaa jäädytettiin vakiolämpötilalla $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja
alapinta pidettiin sulana lämpötilassa $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näytteeseen pääsi virtaamaan va-
paasti ulkopuolista vettä, jolloin maksimiroutanousun kehittyminen oli mahdol-
lista. Näytettä kuormitettiin jännityksellä 3 kPa, joka vastaa lähellä maanpintaa
olevan saven kuormitusta. Kokeen kesto oli noin 10 vuorokautta, jonka aikana
seurattiin automaattisen tiedonkeruujärjestelmän avulla näytteessä tapahtuvaa
routanousua sekä näytteen lämpötilajakaumaa. Jakauman perusteella voitiin
selvittää jäätymisrajan eteneminen näytteessä ajan funktiona /5,26/.

Vakiolämpötilakokeessa mitattujen lämpötilojen ja siirtymien perusteella laskettiin
näytteille segregatiopotentiaali SP_{e} , jonka avulla stabiloitujen massojen routi-
vuusluokitus tehtiin. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 14. Taulukossa on
vertailun vuoksi esitetty myös aiemmin samoilla lähtöarvoilla tehtyjen Tattarisuon
saven routanousukokeiden tulokset /11/. ISSMFE:n routivuusluokituksen mukaan
(taulukko 13) viisi massaa oli lievästi routivia, neljä massaa keskinertaisesti
routivia ja kolme massaa erittäin routivia. Kaikenkaikkiaan segregatiopotentiaalit
vaihtelivat välillä 0,4 - 4,2 mm^2/Kh .

Stabiloimattoman saven segregatiopotentiaaleja ei tässä tutkimuksessa määri-
tetty. Aikaisempien tutkimusten mukaan liHAVAN stabiloimattoman saven segre-
gaatiopotentiaaliksi on määritetty 0,5 - 1,5 mm^2/Kh ja siltin segregatiopoten-
tiaaliksi 1,5 - 3,0 mm^2/Kh /5/. Sementillä stabiloidun liHAVAN saven segregatiopoten-
tiaaliksi on saatu 1,1 mm^2/Kh ja kalkkistabiloidun 6,5 mm^2/Kh . Sideainepitoisuus
oli kummassakin tapauksessa 12 % (noin 15,4 % kuivapainosta) /15/.

Taulukko 14. Routanousukokeiden ja aikaisemmin tehtyjen kokeiden /11/ tulokset.

Savi	Sideaine	Sideaine- pitoisuus [%]	SP ₀ [mm ² /Kh]	Routivuus /8/
Malminkaari	14	10	1,5	keskinkertaisesti routiva
Malminkaari	14	25	0,6	lievästi routiva
Malminkaari	4	10	1,3	lievästi routiva
Malminkaari	4	25	0,9	lievästi routiva
Tattarisuo	14	10	2,1	keskinkertaisesti routiva
Tattarisuo	14	25	3,7	erittäin routiva
Tattarisuo	4	10	2,5	keskinkertaisesti routiva
Tattarisuo	4	25	1,1	lievästi routiva
Viikki	kalkki	3	3,2	erittäin routiva
Viikki	kalkki + rplt	3 + 30	0,5	lievästi routiva
Viikki	kalkki + lento- tuhka	3 + 30	4,2	erittäin routiva
Viikki	Lohjamix A	10	2,9	keskinkertaisesti routiva
Tattarisuo	sementti + rplt	7 + 30	0,8	lievästi routiva
Tattarisuo	kalkki + rplt	4 + 15	1,6	keskinkertaisesti
Tattarisuo	kalkki + rplt	7 + 15	0,5	lievästi routiva
Tattarisuo	kalkki + rplt + mk	7 + 30 + 3	1,1	lievästi routiva
Tattarisuo	kalkki + rplt	4 + 30	0,4	routimaton

rplt = rikinpoiston lopputuote

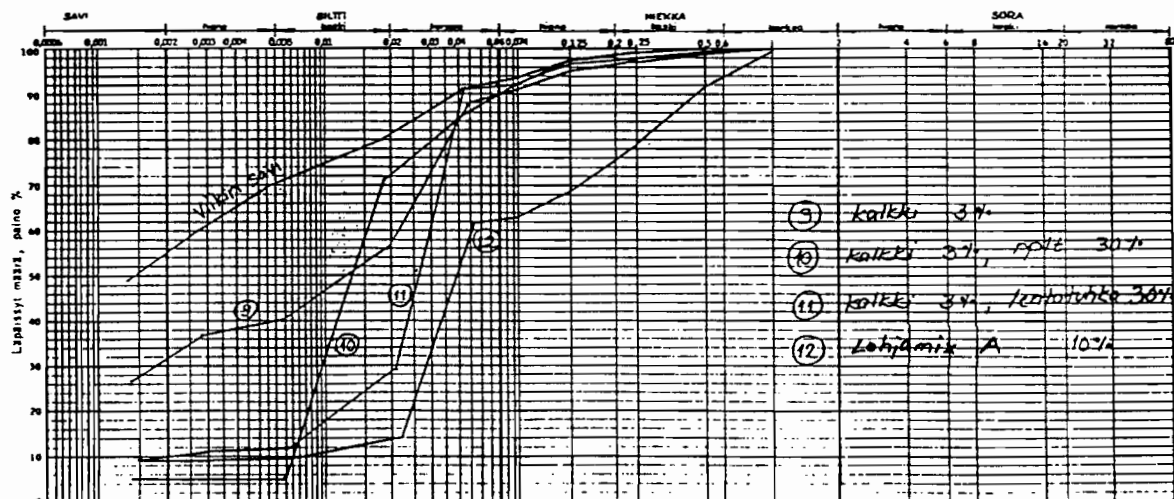
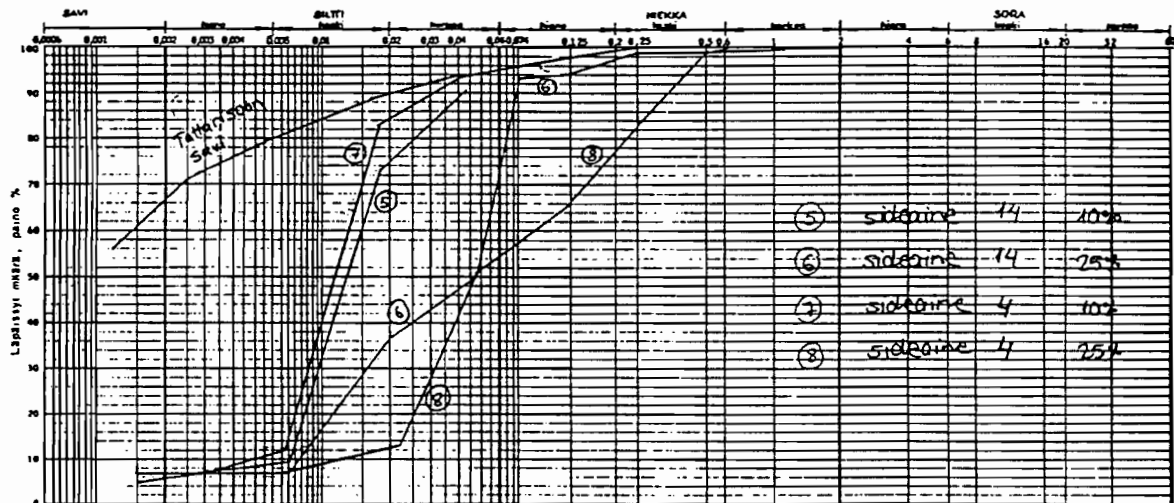
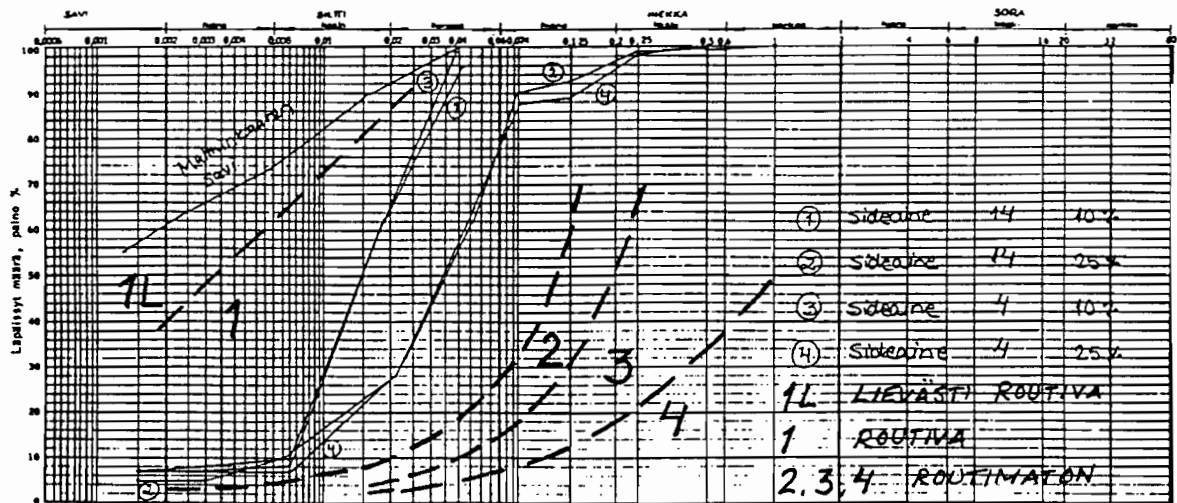
mk = masuunikuona

Koetulosten perusteella huomataan, että savien routivuus näyttää riippuvan siitä, onko stabiloinnissa käytetty sideaineena sementin ja kalkin ohella lentotuhkaa,

rikinpoiston lopputuotetta vai masuunikuonaa. Kun sideaineena käytettiin lentotuhkaa tai masuunikuonaa, stabiloitu massa oli paljon routivampaa kuin rikinpoiston lopputuotetta käytettäessä. Mitä enemmän massassa oli rikinpoiston lopputuotetta, sitä vähemmän massa routi, kun taas lentotuhkan lisäys vaikutti päinvastoin. Massan sisältäessä kumpaakin sideainetta vaikutukset osittain kumosivat toisensa. Malminkaaren ja Tattarisuon stabiloiduissa savissa yhtä poikkeusta lukuunottamatta routivuus pieneni sideainemäärän kasvaessa. Tämä selittyy sillä, että massojen rakeisuus oli sitä karkeampi, mitä enemmän siinä oli sideainetta (kuva 10). Tattarisuon stabiloitu savi oli routivampaa kuin Malminkaaren savi. Seoksella 14 stabiloidut massat olivat jonkinverran routivampia kuin seoksella 4 stabiloidut, mutta tulosten ristiriitaisuuden takia tarkkojen johtopäätösten tekeminen on hankalaa. Seosten 4 ja 14 koostumus kuitenkin tukee tätä johtopäätöstä.

6.2.2 Rakeisuus

Stabiloiduille massoille tehtiin areometrikokeet rakeisuuden määrittämiseksi kuukauden lujittumisen jälkeen. Kokeen edellyttämässä näytteen valmistelussa noudatettiin osin geoteknisistä laboratorio-ohjeista /32/ poikkeavaa käytäntöä. Näyte oli ilmakeivattua, ja se hienonnettiin huumareella, sillä saven ja sideaineen sidokset olisivat voineet hajota koneellisessa jauhamisessa. Vastaavasti liuosta sekoitettiin normaalia kauemmin, jotta varmistuttiin partikkelien erottumisesta. Saven ja sideaineen sidokset ovat veteen liukenemattomia, joten liuoksen pidentetty sekoittaminen ei pienennä näytteen raekokoa. Aikaisempien tutkimusten valossa näyttää siltä, että tämä menettely antaa luotettavan kuvan massojen rakeisuudesta. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 10. Stabiloimattomien savien rakeisuudet sijaitsevat routivuusalueella 1L (kts. kuva 8), joten savet ovat lievästi routivia. Kaikkien stabiloitujen massojen käyrät sijaitsevat alueella 1, joten ne ovat routivia. Rakeisuuskäyrästä huomataan sideainemäärän vaikutus massan rakeisuuteen.



Kuva 10. Stabiloitujen saven rakeisuuskäyrät.

Massat 1 - 4 Malminkaaren savi, 5 - 8 Tattarisuon savi, 9 - 12 Viikin savi.

Sideaineilla 4 ja 14 stabiloitujen Malminkaaren ja Tattarisuon savien rakeisuus muuttui melko säännönmukaisesti sideainepitoisuudesta riippuen. Malminkaaren lihava savi muuttui stabioloimalla rakeisuudeltaan silttiä vastaavaksi. Suurempi sideainepitoisuus muutti rakeisuuden karkeammaksi. Tattarisuon lihava savi käyttäytyi samalla tavoin lukuunottamatta massan 8 käyrää, joka oli hiekkaista silttiä vastaava. Viikin lihava savi muuttui kalkilla (3 %) stabioloitaessa rakeisuudeltaan laihaa savea vastaavaksi, sideaineella Lohjamix A stabioloitaessa hiekkaista silttiä vastaavaksi ja muilla sideaineilla stabioloitaessa silttiä vastaavaksi. Lentotuhka on rakeisuudeltaan karkeampaa kuin rikinpoiston lopputuote, ja lentotuhkalla stabioloitu savi on myös karkeampaa kuin vastaavalla määrällä lopputuotetta stabioloitu savi.

6.2.3 Vedenläpäisevyys ja kapillaarisuus

Routamassojen vedenläpäisevyyskerroin (k) arvioitiin ödometrikokeesta saatavan konsolidaatiokertoimen (c_v) avulla. Vedenläpäisevyyskerroimen arvot olivat välillä $1 - 9 \cdot 10^{-9}$ m/s, ja vastaavat näinollen siltin arvoja. Massat ovat taulukon 12 mukaan yhtä rajatapauستا lukuunottamatta routivia. Tuloksia voidaan pitää melko luotettavina, sillä stabiloidut massat saatiin asetettua ödometrirenkaaseen murskaamattomina.

Routamassojen kapillaarista nousukorkeutta (h_c) yritettiin myös määrittää, mutta koska lujittunutta massaa ei sellaisenaan saatu muotoiltua kapillaarimetrin astiaan, oli massa hienonnettava ja tiivistettävä koeastiaan. Hienontamisen jälkeen näyte vastasi kuitenkin rakeisuudeltaan lähinnä hienoa hiekkaa, jolloin tulokseksi saatuja kapillaarisen nousukorkeuden arvoja ei voida pitää luotettavina. Kapillaariseksi nousukorkeudeksi saatiin kaikille massoille < 1 metri.

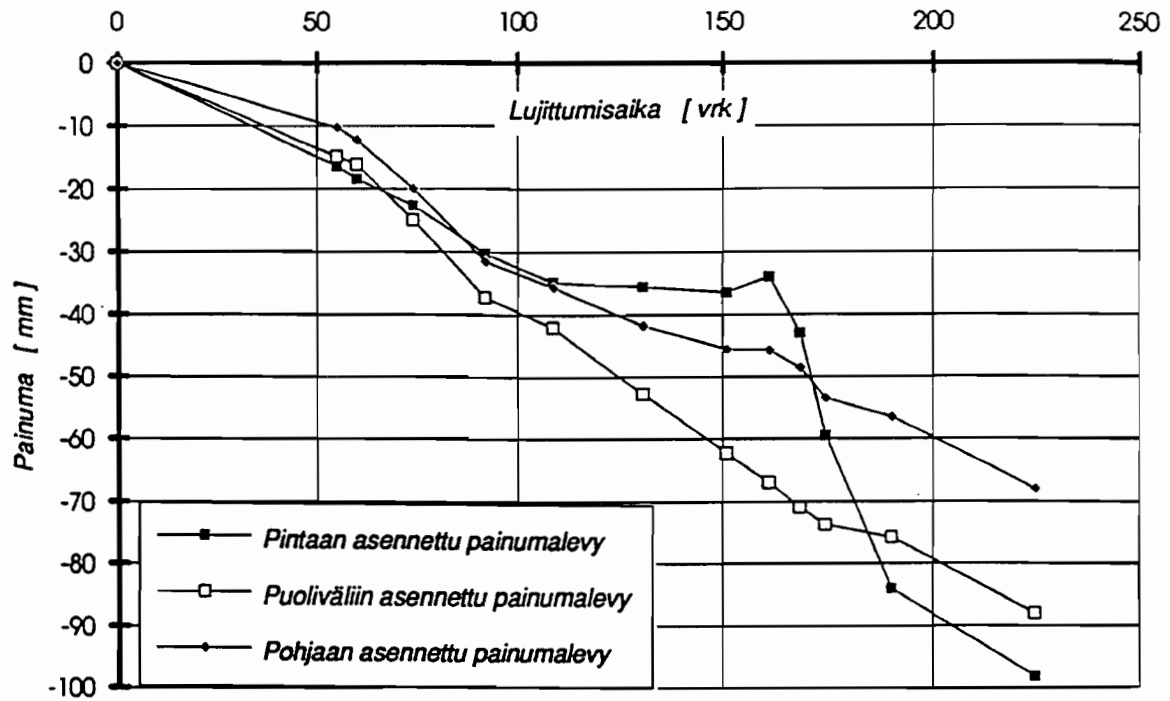
6.3 Tattarisuon kenttäkokeiden tulokset

Tattarisuon savesta stabiloimalla tehtyjen koepenkereiden (kuvaus kappaleessa 5.2.1) painumista ja mahdollista routanousua seurattiin painumalevyjen ja lämpötila-antureiden avulla yhden talven ajan. Painumalevyt sijaitsivat penkereiden pohjalla, pinnassa ja puolella välissä. Painumaa mitattiin penkereestä 1 neljästä eri kohdasta ja penkereestä 2 kolmesta eri kohdasta.

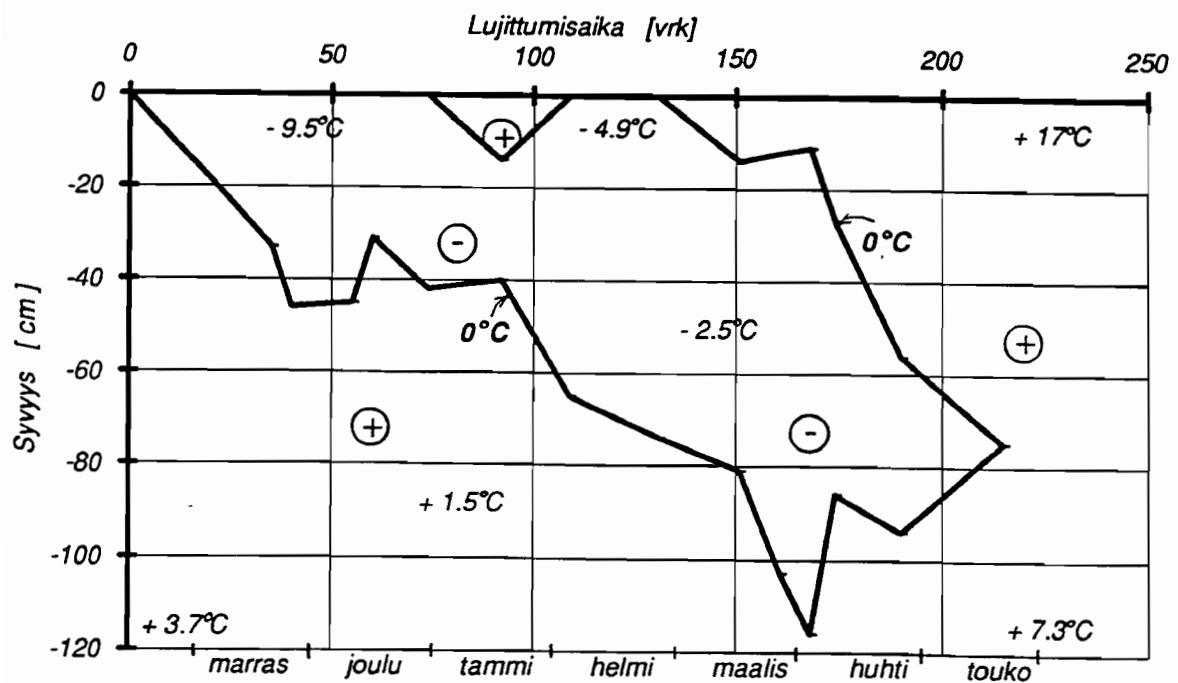
Eri sideaineilla stabiloitujen penkereiden routanousussa oli havaittavissa eroja. Seoksella 14 stabiloidusta penkereestä 2 mitattiin suurempia routanousun arvoja kuin seoksella 4 stabiloidusta penkereestä 1, vaikka penger 2 oli lujittunut siipikairausten mukaan paremmin. Laboratoriossa tehdyt routanousukokeet (kohta 6.2.1) osoittivat myös seoksella 14 (10 %) stabiloidun penkereen routivammaksi kuin seoksella 4 (25 %) stabiloidun.

Penger 1 painui lokakuusta maaliskuuhun asti, ja vasta maaliskuun loppupuolella oli havaittavissa pientä routanousua. Talven kovimmat pakkaset ajoittuivat helmikuun loppupuolelle. Huhtikuun alusta alkaen penger jatkoi painumistaan. Penkereen pohjalle ja puoliväliin asennetut painumalevyt painuivat melko tasaisesti kokoajan, routanousua oli havaittavissa ainoastaan pintaan asennetussa painumalevyssä. Kahdeksan kuukauden aikana penkereen pinta painui kaikkiaan 100 mm, kun penkereen alkuperäinen korkeus oli 1,2 m. Painumakäyrä ja penkereessä vallinneet lämpötilat on esitetty kuvissa 11a) ja b).

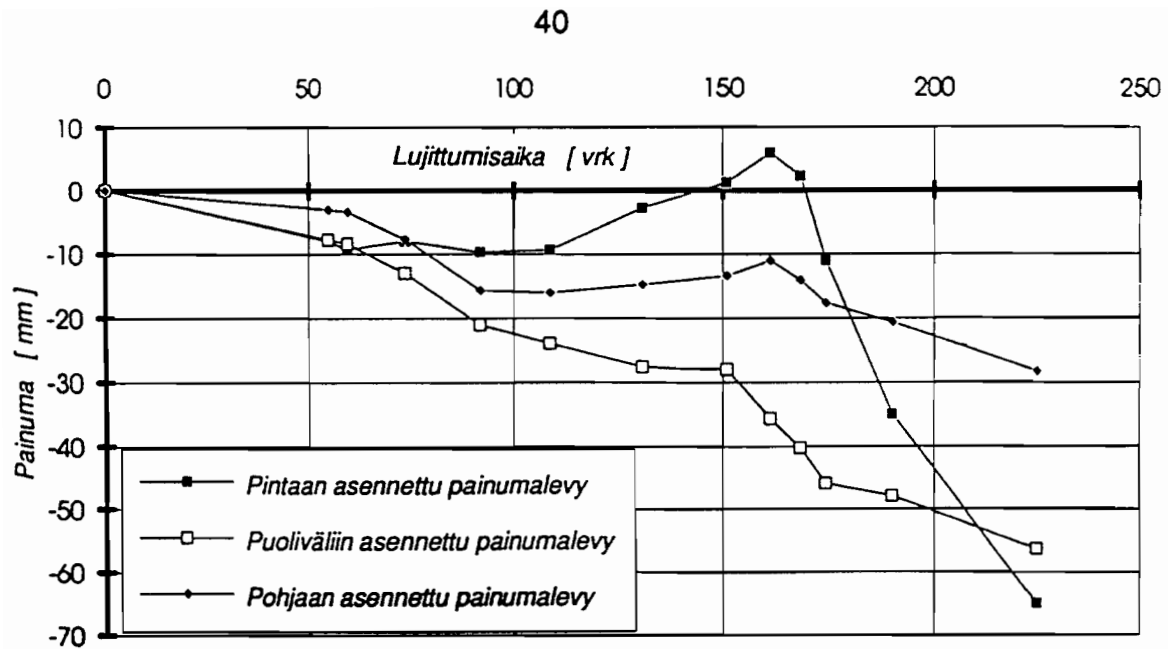
Penger 2 painui lokakuusta tammikuuhun, ja routanousua oli havaittavissa tammikuun puolesta välistä maaliskuun loppuun asti, jonka jälkeen penger jatkoi painumistaan. Routanousua oli havaittavissa kaikissa tasoissa, eniten kuitenkin pinnassa. Kaikenkaikkiaan penkereen 2 pinta painui 65 mm, kun penkereen alkuperäinen korkeus oli 1,0 m. Painumakäyrä ja penkereessä vallinneet lämpötilat on esitetty kuvissa 12a) ja b).



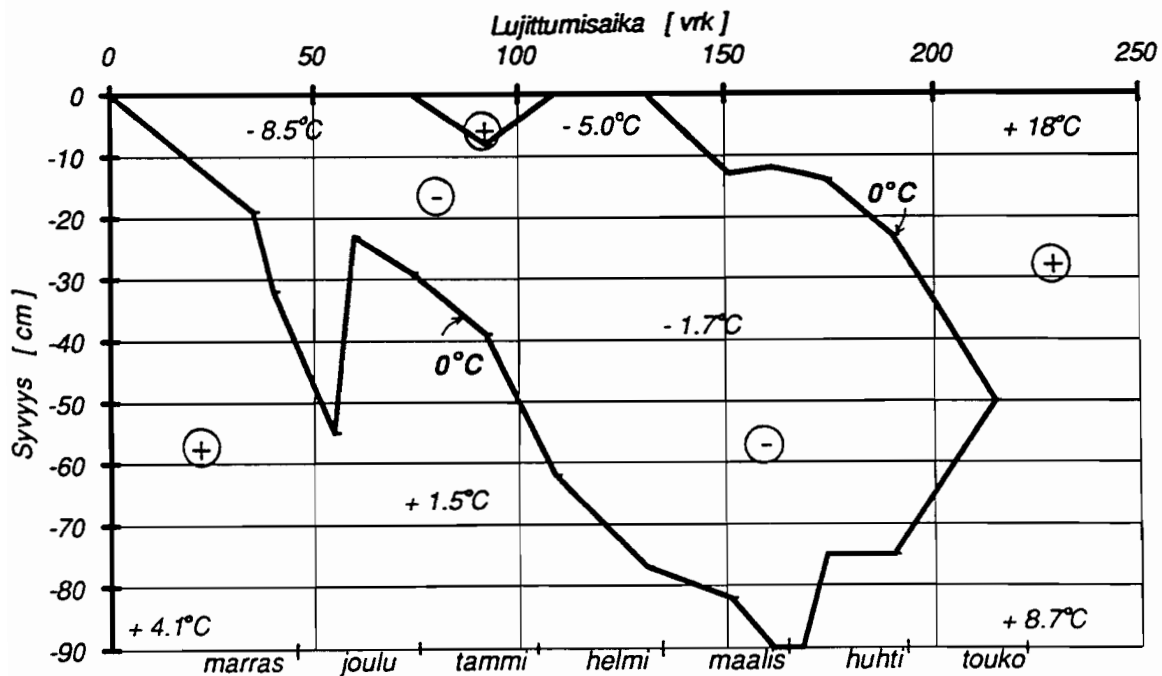
Kuva 11a). Tattarisuon penkereen 1 painuminen ja routanousu.



Kuva 11b). Tattarisuon penkereen 1 lämpötilat ja lämpötilan nollakäyrä.



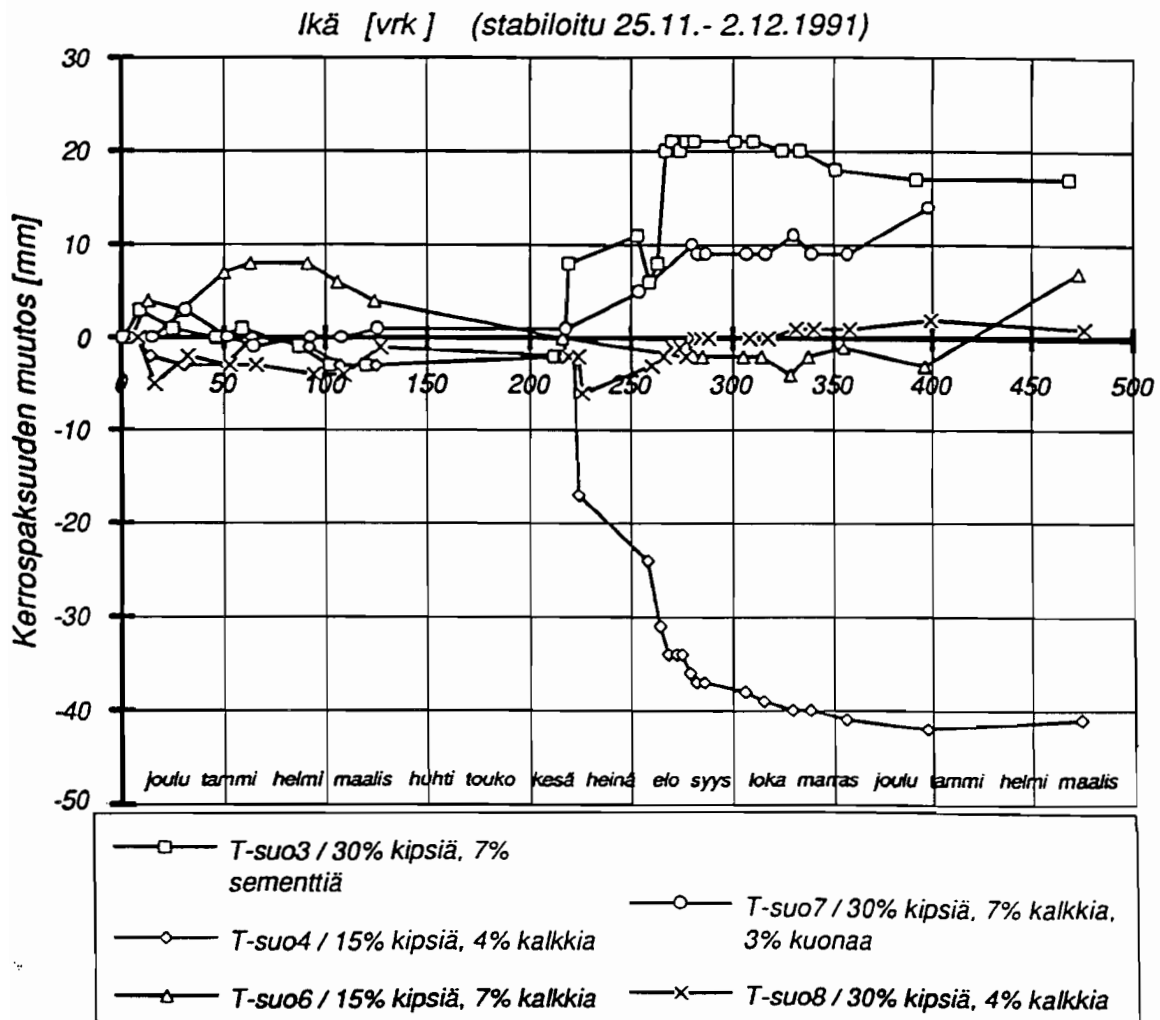
Kuva 12a). Tattarisuon penkereen 2 painuminen ja routanousu.



Kuva 12b). Tattarisuon penkereen 2 lämpötilat ja lämpötilan nollakäyrä.

Tattarisuolla toteutettiin aikaisemmin stabilointikokeilu /11/, jossa käytettiin viittä erilaista sideaineyhdistelmää, jotka poikkesivat tässä tutkimuksessa käytetyistä

seoksista. Kahden metrin paksuisten koemassojen painumia tarkkailtiin kaikenkaikkiaan kahden talven ajan. Koska talvet olivat poikkeuksellisen leutoja, jää epäselväksi, miten koemassat olisivat käyttäytyneet kylmempinä talvina. Koemassat T-suo3, T-suo4 ja T-suo7 kuormitettiin kesäkuussa 1992 tekemällä niiden päälle 1,5 metrin korkuiset sorapenkereet. Massan T-suo4 painumalevyt ovat todennäköisesti kyseisenä ajankohtana häiriintyneet. Kuvassa 13 on esitetty koemassojen kerrospaksuuden muutokset.



Kuva 13. Tattarisuon koemassojen painumat /11/.

7. STABILOINNIN KÄYTTÖKOhteITA

7.1 Pintastabilointi

Pintastabiloinnilla on perinteisesti tarkoitettu maakerroksen pintaosien stabilointia 0,15 - 0,30 metrin syvyydeltä. Maan pintakerros on stabiloitaessa rikottu ja muokattu ja sideaineen sekoittamisen jälkeen maakerros on tiivistetty. Pintastabilointia on käytetty varsinkin vähäliikenteisten teiden ja katujen pohjanvahvistustoimenpiteenä /23/.

Kaluston kehittymisen myötä on pintastabiloinnilla nykyisin mahdollista päästä 4 - 5 metrin syvyyteen. Pintastabiloinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä maan stabilointia paikallaan ilman, että sitä tarvitsee kaivaa ylös sideaineen sekoittamista varten. Käsittelyn jälkeen stabiloitu massa sensijaan voidaan kaivaa pois ja kuljettaa muualle tai vaihtoehtoisesti tiivistää paikoilleen ja muotoilla. Saven kuljettaminen ja läjitys onnistuu helpommin stabilointikäsittelyn jälkeen kuin ilman stabilointia. Pintastabilointiin soveltuvaa kalustoa on esitelty kappaleessa 9.

7.2 Kaivumassojen stabilointi

Kaivumassojen stabiloinnilla tarkoitetaan kaivettujen maamassojen, esimerkiksi savi- ja ruoppausmassojen ominaisuuksien parantamista sekoittamalla niihin sideaineita. Kuljetusominaisuuksien paranemisen johdosta stabiloitu massa voidaan kuljettaa muualle tai käyttää kaivupaikan lähistöllä. Stabiloimisen jälkeen massalla on lukuisia käyttökohteita, jolloin vältetään sen sijoittaminen maksullisille läjitysalueille. Kappaleessa 8 on esitetty stabiloidun massan käyttökohteita rakenneratkaisuineen ja kappaleessa 9 stabilointiin soveltuvaa kalustoa.

7.3 Saastuneiden maamassojen kunnostaminen

7.3.1 Maaperän saastuminen

Maaperän saastumisella tarkoitetaan haitallisen aineen pitoisuuden huomattavaa ylittymistä luontaiseen pitoisuuteen verrattuna. Luontaisena pitoisuutena voidaan pitää lähiympäristön taustapitoisuutta tai ympäristölle ja terveydelle vaaratonta pitoisuutta. Maaperän saastuminen saattaa olla peräisin teollisuus- tai jätteenkäsittelylaitoksista, kaatopaikoista, öljy- tai kemikaalionnettomuuksista, vuotavista säiliöistä tai muusta toiminnasta (esim. ampumaradat). Maaperän saastumista aiheuttavia aineita ovat raskasmetallit, epäorgaaniset yhdisteet, aromaattiset yhdisteet, polyaromaattiset yhdisteet, klooratut hiilivedyt, torjunta-aineet sekä muut epäpuhtaudet.

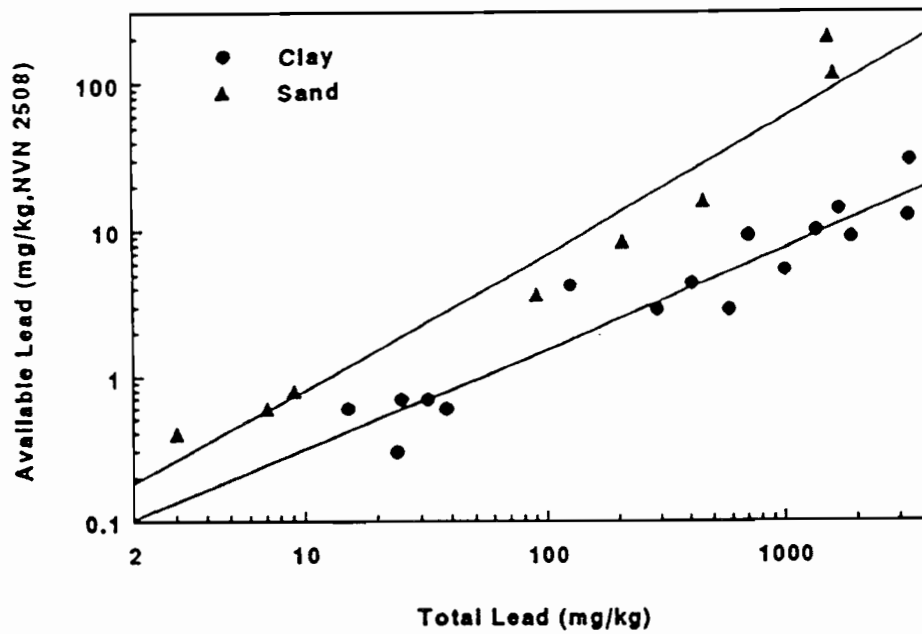
Saastuneen maaperän aiheuttamaa ympäristö- tai terveyshaittaa arvioitaessa on pitoisuuksien lisäksi otettava huomioon haitallisten aineiden leviämismahdollisuudet ja -reitit, ympäristön olosuhteet ja maankäyttö sekä ihmisen altistumismahdollisuus ko. aineille /22,27/. Tässä yhteydessä keskitytään maaperään joutuneiden raskasmetallien aiheuttamiin ympäristöriskeihin ja niiden ehkäisemiseen tapauksissa, joissa stabiloidaan saastunutta maa-ainesta, tai kun stabiloinnissa käytettävät sideaineet sisältävät raskasmetalleja (lentotuhka ja rikinpoiston lopputuote).

Raskasmetalleiksi lasketaan metallit, joiden kiintotiheys on yli 5000 kg/m³. Maahan joutuneet raskasmetallit sitoutuvat yleensä tiukasti maa-ainekseen. Ne absorboituvat erilaisiin yhdisteisiin, kuten orgaaniseen ainekseen, savimineraaleihin, raudan ja mangaanin oksihydroksideihin ja kalsiumkarbonaatteihin. Suuri osa raskasmetalleista jää pitkäksi aikaa maan pintakerrokseen, jossa ne suurina pitoisuuksina esiintyessään saattavat aiheuttaa terveydellisen riskin /28/. Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti lyijyllä saastuneen maan ympäristöhaittojen minimoimiseen, sillä Helsingin alueella lyijy aiheuttaa monin paikoin ympäristöriskin.

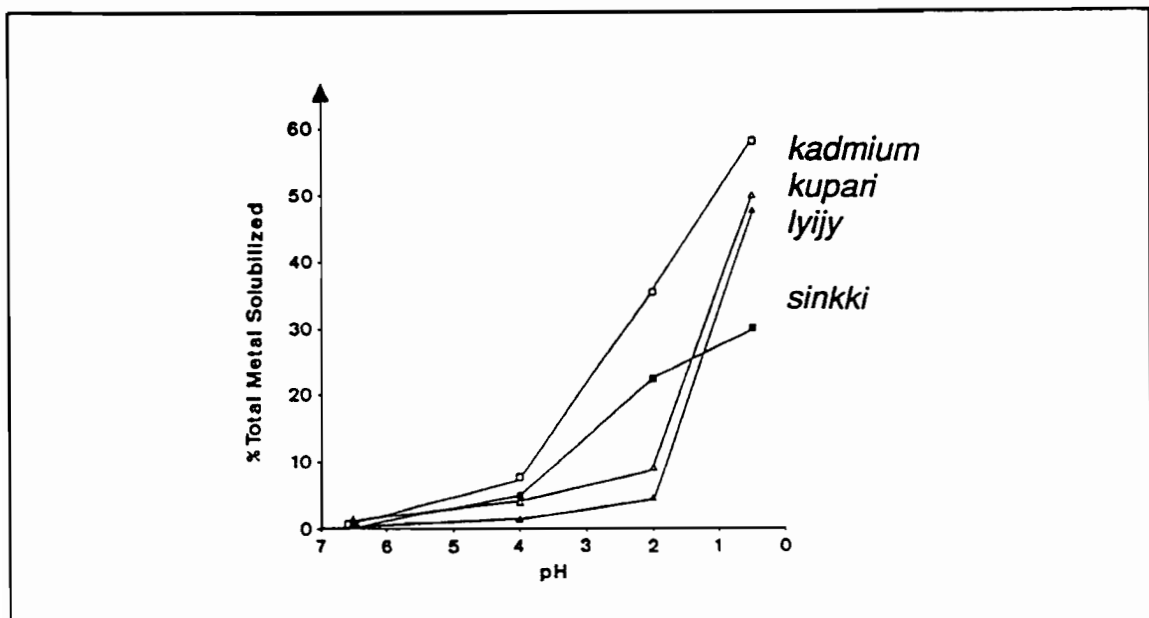
Lyijyn kohonneita pitoisuuksia maaperässä on havaittu mm. liikennealueilla, ampumaradoilla sekä teollisuus- ja varastoalueilla. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen tekemän tutkimuksen /21/ perusteella on lyijyn pitoisuudeksi saatu esimerkiksi liikennealueella Lahdentie-Kehä I 48 - 80 mg/kg ja Tattarisuon teollisuus- ja varastoalueella 4 - 9200 mg/kg. Asuin- tai virkistysalueiden suunnitteleminen lyijystä saastuneille alueille edellyttää saastuneen maan puhdistamista tai saattamista terveydelle vaarattomaan muotoon.

Hollantilaisen tutkimuksen /30/ mukaan lyijyn liikkuvuus maassa on todettu pieneksi ja altistumisriski vähäiseksi. Tutkimuksessa todetaan, että lyijyllä kohtuullisesti saastuneen maan käyttäminen kaupunkiympäristön rakennustöissä ei välttämättä edellytä suurempia eristystarpeita, vaan maan peittäminen puhtaalla maakerroksella voi olla riittävä toimenpide. Tutkimuksessa nojaututaan lyijyn pieneen liukoisuuteen, jonka todetaan olevan savimailla noin 1 - 4 % ja hiekkamailla noin 4 - 13 % lyijyn kokonaispitoisuudesta (kuva 14) /30/. Toisen hollantilaisen tutkimuksen mukaan lyijyn liukoisuus lisääntyy merkittävästi vasta pH:n laskiessa alle 2 (kuva 15) /17/. Tässä yhteydessä tutkittujen stabiloitujen massojen pH oli 9,5 - 10,5 , joten liukoisuuden arvioiminen kuvan 15 mukaan johtaa epäluotettavaan lopputulokseen.

Kasvit ottavat maasta verrattain vähän lyijyä, ja kasvien sisältämä lyijy onkin pääosin peräisin ilmalaskeumasta. Ihmisen elimistöön joutuessaan lyijy kulkeutuu ja kertyy luustoon /25,28/. Saastumisen ollessa runsasta on tarvittaviin kunnostamistoimenpiteisiin ryhdyttävä. Kappaleessa 8.2 on esitetty stabiloidun saastuneen maan eristämiskäytäntöjä.



Kuva 14. Lyijyn liukoisuuden ja kokonaispitoisuuden suhde saastuneessa maassa hollantilaisen tutkimuksen mukaan /30/.



Kuva 15. Lyijyn liukoisuus pH:n funktiona hollantilaisessa uuttokokeessa /17/.

7.3.2 Kunnostamisen periaatteet

Maaperän kunnostamisen peruseriaatteina voidaan pitää saastumisen aiheuttamien riskien lopullista poistamista, mahdollisimman vähäisiä jälkitoimenpiteitä sekä kunnostetun maa-alueen rajauksetonta käyttömahdollisuutta. Toisaalta maaperä voidaan kunnostaa ottaen huomioon alueen tuleva käyttötarkoitus siten, että sovelletaan erilaisia kriteereitä esimerkiksi lasten leikkipuistoille ja teollisuusalueille. Kunnostaminen voi tapahtua poistamalla saastuttava aine tai tekijä tai käsittelemällä se luonnonilmiöitä ja maankäyttöä vastaan pysyvään ja reagoimattomaan muotoon. Maaperän kunnostamismenetelminä on käytetty polttamista, kiinteytystä, stabilointia, huuhtomista, biologista ja kemiallista käsittelyä /27/.

Stabiloimista voidaan käyttää lievästi saastuneen maaperän kunnostamiseen. Tällöin tavoitteena on muuttaa likaantunut maamassa lujitetuksi tuotteeksi, joka mekaanisten ominaisuuksiensa ja ympäristövaikutustensa puolesta soveltuu käytettäväksi maarakenteissa. Stabiloinnissa maamassan joukkoon sekoitetaan maalajista riippuen sideaineita, joilla on todettu olevan suotuisin vaikutus ko. maalajin lujittumiseen ja haitallisten aineiden sitoutumiseen. Varsinkin raskasmetallien on aikaisempien tutkimusten mukaan /11/ havaittu sitoutuvan stabiloinnissa vaikeammin liukoiseen muotoon. Sideaineet, pitoisuudet ja tarvittavat eristysrakenteet määritetään stabiloidulta massalta vaadittavien ominaisuuksien (lujuustaso, kantavuus ja ympäristökuormitus) ja sijoituspaikan mukaan. Eri sideaineilla ja -yhdistelmillä on havaittu olevan erilaisia kemiallisia vaikutuksia. Stabiloidun saastuneen maan eristämistapoja on esitetty kappaleessa 8.2.

Saastuneita maamassoja voidaan kunnostaa myös betonoimalla. Tällaista nk. ekobetonoitua massaa voidaan käyttää mm. teiden tai kaatopaikkojen alusrakenteena /18/. Stabilointiin nähden suurten kustannusten takia ekobetonoinnilla kannattaa kunnostaa sellaisia saastuneita maamassoja, joissa massastabilointi ei takaa riittävän tyydyttävää lopputulosta.

Eri maissa on esitetty erilaisia raja-arvoja raskasmetallien pitoisuuksille maaperässä. Esimerkkinä mainittakoon hollantilainen ABC-luokitus, jossa pitoisuusluokkia on kolme. A-arvo on saastumaton taustapitoisuus, B-arvo on lisätutkimuksia edellyttävä pitoisuus, ja C-arvo kunnostusta vaativa pitoisuus. Taulukossa 15 on esitetty A-, B- ja C-arvot vuodelta 1983 /29/ ja uudet ehdotukset C-arvoiksi vuodelta 1993 /3/.

Taulukko 15. Hollantilaiset ABC-raja-arvot raskasmetalleille maaperässä /3,29/.

Pitoisuus [mg/kg] Metalli	A-arvo /29/	B-arvo /29/	C-arvo /29/	C-arvo [ehdotus /3/]
arseeni As	10	30	50	55
barium Ba	200	500	2000	625
elohopea Hg	0,2	2	10	10
hopea Ag	2	20	40	-
kadmium Cd	1,5	5	20	12
koboltti Co	15	50	300	240
kromi Cr	75	250	800	380
kupari Cu	50	100	500	190
lyijy Pb	50	200	600	530
molybdeenin Mo	2	10	40	200
nikkeli Ni	50	100	500	210
seleeni Se	1	3	10	-
sinkki Zn	100	500	1500	720
tina Sn	5	50	300	-

Luokituksessa voidaan ottaa huomioon myös maan käyttötarkoitus. Saksalaisten tutkijoiden (Eikmann & Klope /4/) esittämässä luokituksessa on kolme raja-arvoluokkaa. BW1 on saastumaton taustapitoisuus, BW2 on toleranssipitoisuus, joka ei normaaliolosuhteissa aiheuta haittaa, ja BW3 on toksisuuspitoisuus. Käyttötarkoitusluokkia on yhdeksän (taulukko 16).

Taulukko 16. Saksalaiset raja-arvot raskasmetalleille maan käyttötarkoituksen mukaan (Eikmann & Kloke /4/). Pitoisuudet mg/kg.

Nr.	Nutzungsarten	Elemente	As	Be	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Tl	Zn
0	Multifunktionale Nutzungsmöglichkeit	BW I	20 ³⁾	1	1	50	50	0,5	40	100	1	0,5	150
1	Kinderspielplätze ¹⁾	BW II	20 ³⁾	1	2	50	50	0,5	40	200	5	0,5	300
		BW III	50	5	10	250	250	10	200	1000	20	10	2000
2	Haus- und Kleingärten	BW II	40 ³⁾	2	2	100	50	2	80	300	5	2	300
		BW III	80	5	5	350	200	20	200	1000	10	20	600
3	Sport- und Bolzplätze ²⁾	BW II	35	1	2	150	100	0,5	100	200	5	2	300
		BW III	90	2,5	5	350	300	10	250	1000	20	20	2000
4	Park- und Freizeitanlagen unbefestigte, vegetationsarme Flächen	BW II	40	5	4	150	200	5	100	500	10	5	1000
		BW III	80	15	15	600	600	15	250	2000	50	30	3000
5	Industrie-, Gewerbe- und Lagerflächen, unversiegelt	BW II	50	5	10	200	300	10	200	1000	15	10	1000
		BW III	150	20	20	800	1000	20	500	2000	70	30	3000
6	Industrie-, Gewerbe- und Lagerflächen, versiegelt oder bewachsen	BW II	50	10	10	200	500	10	200	1000	15	10	1000
		BW III	200	20	20	800	2000	50	500	2000	70	30	3000
7	Landwirtschaftliche Nutzflächen Obst- und Gemüseanbau	BW II	40 ³⁾	10	2	200	50	10	100	500	5	2	300
		BW III	50	20	5	500	200	50	200	1000	10	20	600
8	nicht-agrarische Ökosysteme	BW II	40 ³⁾	10	5	200	50	10	100	1000	5	2	300
		BW III	60	20	10	500	200	50	200	2000	10	20	600

1) Bei den Metallen As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl sind BW II und BW III identisch mit den Richtwerten I und II des NRW-Kinderspielplatz-Lasses.

2) Die BW II der Metalle As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Tl entsprechen den Vorschlägen des Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets/Gelsenkirchen

3) Identisch mit Vorschlägen der VDI-Arbeitsgruppe „Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Böden – Arsen –“.

Käyttötarkoituksluokat ovat:

- | | |
|------------------------|--------------------------------------|
| 0. moninaiskäyttö | 4. puistot ja virkistysalueet |
| 1. lasten leikkipaikat | 5. tiivistämättömät teollisuusalueet |
| 2. puutarhat | 6. tiivistetyt teollisuusalueet |
| 3. urheilualueet | 7. viljelysalueet |
| | 8. ei-maanviljelysalueet |

Suomessa ei ole aikaisemmin ollut käytettävissä omia raja-arvoja kiinteiden materiaalien sijoittamisesta aiheutuvalle ympäristökuormitukselle, vaan käytetyt ohjearvot ovat olleet peräisin Yhdysvaltojen, Kanadan ja Hollannin normeista. Tämän johdosta Suomen ympäristöministeriö on asettanut toimikunnan selvittämään saastuneet maa-alueet Suomessa sekä saastumista ja kunnostamista koskevat ohjearvot (SAMASE-projekti) /36/. Lisäksi VTT:n kemian laboratoriossa on yhteistyössä muiden osapuolten kanssa selvitetty likaantuneiden maamassojen käsittelystä aiheutuvaa ympäristöriskiä hollantilaisen diffuusiotestin perusteella (LIMEKO-projekti) /38/.

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei stabiloiduista koekappaleista liukenevien raskasmetallien pitoisuuksia määritetty. Edellisessä massastabilointia käsittelevässä tutkimuksessa /11/ määritettiin Tattarisuon ja Herttoniemen stabiloitujen savimassojen kromi-, kupari-, lyijy-, nikkeli- ja sinkkipitoisuudet vesiuutoksesta, lievästi happamasta ammoniumasetaatti-etikkahappo-EDTA -uutoksesta ja typpihappouutoksesta. Tulokset osoittivat, että lyijyn, kromin, sinkin ja nikkelin liukoisuus pääsääntöisesti pieneni massastabiloinnilla ja kuparin liukoisuus kasvoi. Liuenneiden raskasmetallien määrät riippuivat käytettyjen sideaineiden koostumuksista /11/.

8. MAARAKENNERATKAISUJA

8.1 Stabiloitujen massojen käyttö

Luonnontilaisen saven ominaisuuksista ja sideainevalinnasta riippuen saven lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia saadaan muutettua siten, että sen käyttömahdollisuudet maarakenteissa lisääntyvät. Stabiloidun saven raekoko suurenee, painumat pienenevät ja leikkauslujuus kasvaa. Tämän vuoksi stabiloitua massaa voidaan käyttää kitkamaalajien sijaan maarakenteissa, kuten nurmetettavissa piha- ja maisemointitäytöissä, liikennealueiden maaluiskien muotoilussa, melupenkereissä, tiepenkereissä, putkikaivannoissa ja rakennustäytöissä. Stabiloidun saven määrääviä ominaisuuksia ovat routivuuden lisäksi kantavuus, vakavuus ja kokoonpuristuminen. Lisäksi sideaineyhdistelmän ja -määrän valintaan vaikuttaa vaaditun lujuustason saavuttamiseen kuluva lujittumisaika.

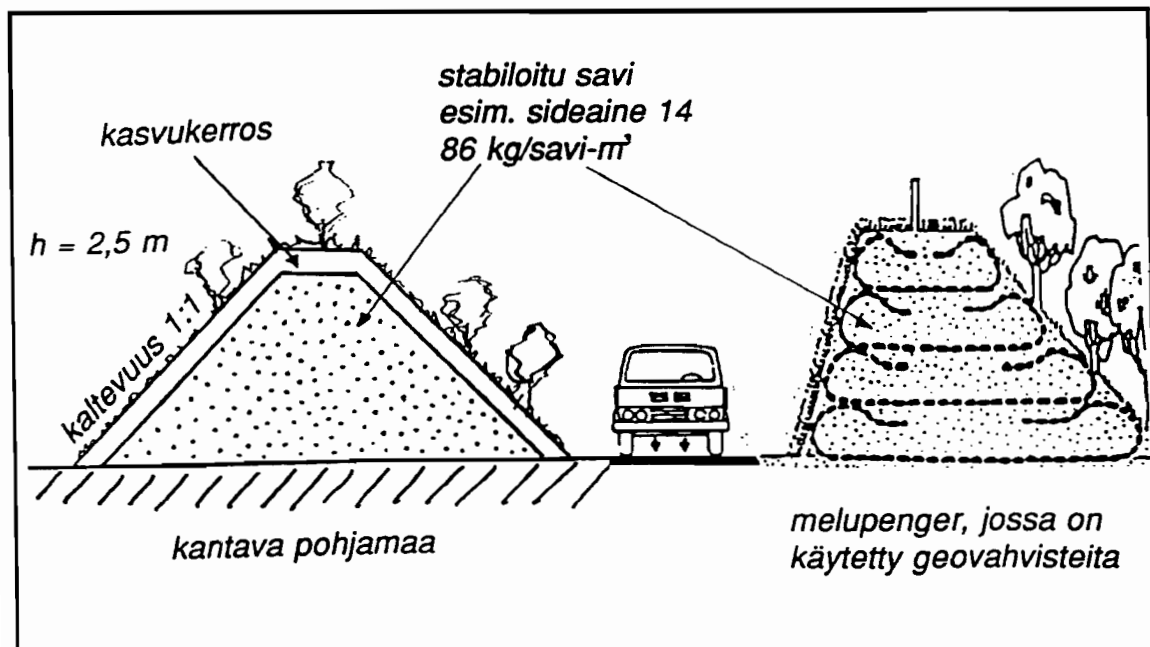
Piha- tai maisemointitäyttöjen tekeminen viheralueille ei yleensä edellytä stabiloidun savimassan routimattomuutta. Pienet painumat voidaan tällöin myös sallia. Alueen käyttötarkoitus tulee kuitenkin ottaa huomioon massan lujuustasoa määrättäessä. Erityistä huomiota tulee kiinnittää maaston muotoiluun ja pintarakenteen valintaan. Eriaisia vaihtoehtoja täytön verhoilulle ovat esimerkiksi nurmetus, kasvillisuuden istutus tai kitkamaaverhoilu. Koska stabiloitu massa ei sellaisenaan sovellu kasvualustaksi, se on peitettävä kasvukerroksella. Nurmikon istuttamista varten riittää 0,2 metrin paksuinen kasvukerros, mutta pensaiden ja puiden vaatima 0,3 - 0,8 metrin kasvukerros voidaan toteuttaa kaivamalla kuoppa erikseen jokaiselle istutettavalle taimelle.

Liikennealueilla ajoluiskien pientareita voidaan muotoilla stabiloidun massan avulla. Routiminen tai pienet painumat eivät tällöin aiheuta ongelmia, mutta massan vakavuuteen tulisi kiinnittää huomiota.

Eräs stabiloidun saven käyttökohteista ovat melu- tai muut penkereet. Stabiloidulta savelta vaadittu lujuustaso määräytyy penkereen korkeuden ja luiskan kal-

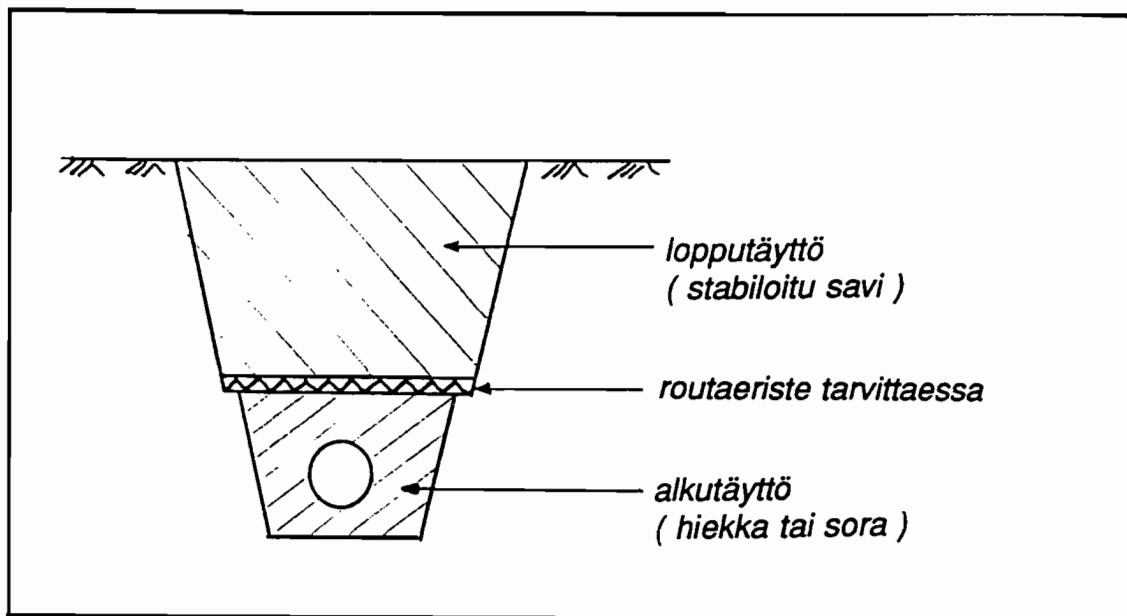
tevuuden mukaan. Tarpeen vaatiessa voidaan penkereen muotoilussa käyttää apuna geovahvisteita massan koossapysymisen varmistamiseksi. Geovahvisteiden avulla voidaan myös tehdä luiskat jyrkemmiksi. Vahvisteita käytettäessä tulee ottaa huomioon vahvisteiden kestävyys emäksisessä massassa. Kuvassa 16 on esimerkki stabiloidun saven käyttämisestä melupenkereissä. Penkereen perustamistapa riippuu pohjamaan kantavuudesta. Perustettaessa penger esimerkiksi syvästabiloinnilla voidaan samoja sideaineita käyttää pengermateriaalin stabilointiin ja syvästabilointiin. Pengermateriaalina voidaan esimerkiksi suurten tiehankkeiden yhteydessä käyttää rakennuskaivannosta saatavaa savea. Tällöin vältetään saven kuljettamiselta maksullisille läjitysalueille, jotka saattavat sijaita hyvinkin kaukana rakennuspaikasta.

Tiepenkereissä stabiloidulla massalla on kaksi käyttömahdollisuutta. Tiepenger voidaan perustaa massastabiloinnilla vahvistetun maan varaan, jolloin tien rakennekerrosten paksuudet määräytyvät pohjamaan kantavuuden ja liikennekuormien mukaan. Toisaalta stabiloitua massaa voidaan käyttää kitkamaalajin sijasta tiepenkereen jakavassa kerroksessa, jolloin massan kantavuus, vakaavuus, routivuus ja kokoonpuristuminen on tarkoin selvitettävä.



Kuva 16. Esimerkkejä stabiloidun saven käyttämisestä melupenkereissä.

Rakennusten vierus- ja alustäyttöjen tai putkikaivantojen täyttäminen stabiloidulla savella vaatii riittävää routasuojausta. Massalla tulisi olla riittävä lujuus, mutta toisaalta tulisi ottaa huomioon myös massan kaivettavuus lujittumisen jälkeen. Lisäksi on huomattava, että emäksisyydestä huolimatta stabiloidut massat saattavat aiheuttaa terästen korroosiota /11/. Kuvassa 17 on esimerkki stabiloidun saven käyttämisestä putkikaivannon täytteenä.



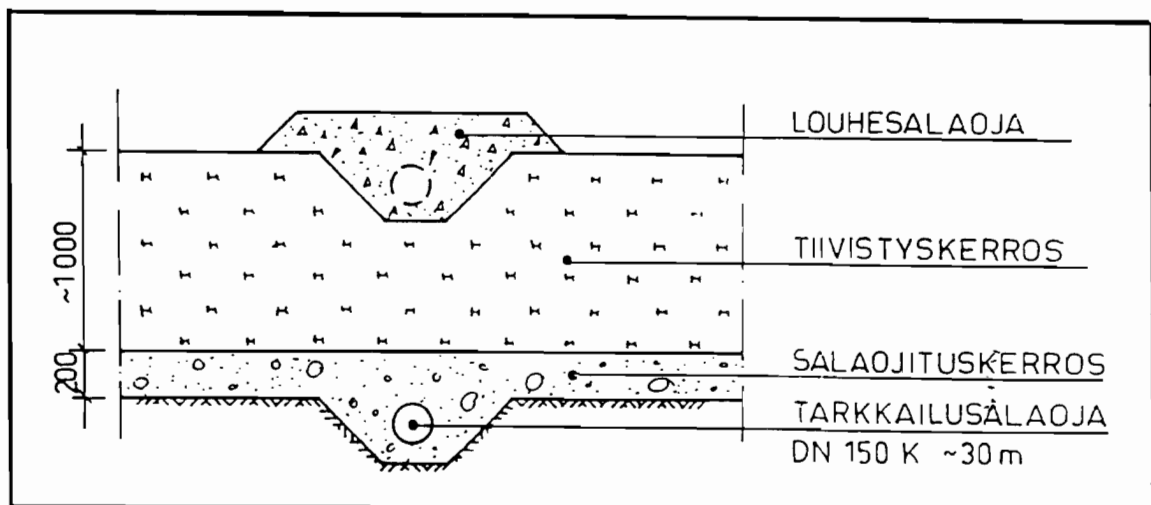
Kuva 17. Stabiloidun saven käyttäminen putkikaivannoissa.

8.2 Saastuneiden maamassojen eristäminen

Kun stabilointia käytetään saastuneiden maamassojen kunnostamiseen, tulee erityistä huomiota kiinnittää stabiloidun massan sijoituspaikkaan ja tarvittaviin eristystoimenpiteisiin. Sijoituspaikkaa valittaessa tulisi etusijalle asettaa pohja-suhteiltaan luontaisesti tiiviit alueet kuten yhtenäiset savi-, siltti- ja moreenialueet. Muissa tapauksissa voi pohjan tiivistäminen olla välttämätöntä, jotta voidaan varmistua siitä, että saasteet eivät leviä käsitellyn alueen ulkopuolelle. Lisäksi stabiloidun massan päälle voidaan tehdä eristyskerros estämään sade- ja sulamisvesien suotautumista rakenteen läpi /1,20/.

Maaperän ja pohjaveden suojaamiseksi on tarjolla useita tiivistämis- ja eristämismenetelmiä. Tiivistysmateriaalin valintaan vaikuttavat vedenläpäisevyys, kestävyys, maapohjan painuminen, kustannukset sekä tiivistämistyön suoritusajankohta. Tiivistäminen voidaan tehdä maakerroksella, tiivistekalvolla, bentoniitillä tai injektoinnilla. Rakenteen huonosti vettäläpäiseväksi tekevän tiivistysmateriaalin lisäksi tiivistysrakenteeseen voivat kuulua esimerkiksi tasauserros, suojakerros, salaojarakenteet ja tiiviiden tarkkailujärjestelmä /1/.

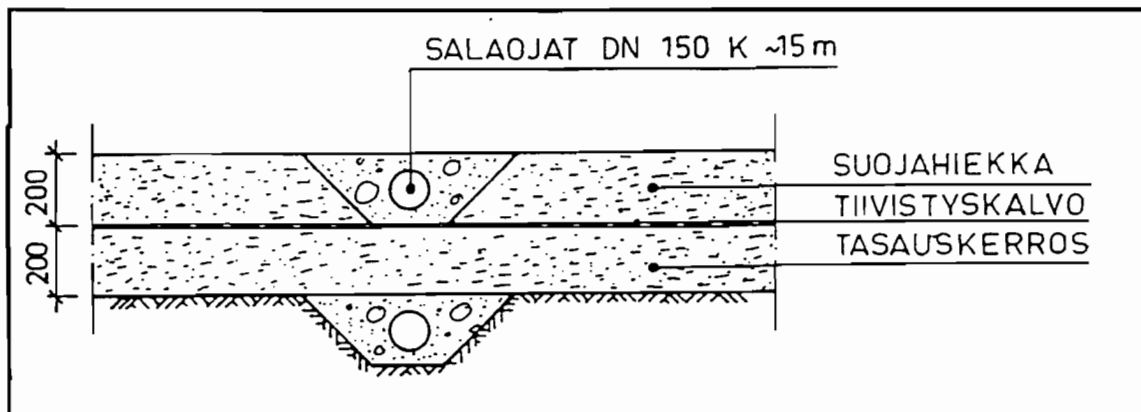
Maa-aineksen käyttämisessä tiivistysrakenteena tulevat kysymykseen lähinnä savinen siltti ja silttimoreeni. Maa-aineksen tavoiteltava tiiviysaste ja vedenläpäisevyys on syytä määrittää laboratoriokokein. Työnaikaisella valvonnalla ja tiiviiden seurannalla varmistetaan rakenteen suunnitelmanmukainen onnistuminen. Kuvassa 18 on esitetty maa-ainestiivistyksen rakennepoikkileikkaus /1/.



Kuva 18. Maa-ainestiivistyksen rakennepoikkileikkaus /1/.

Tiivistekalvon eli geomembraanin käyttämistä tiivistysrakenteena suositellaan silloin, kun halutaan mahdollisimman suuri varmuus rakenteen tiivydelle. Kalvoja käytettäessä maapohjalta edellytetään riittävää kantavuutta kalvon repeämisvaaran välttämiseksi. Kalvolta edellytetään hyvän pakkasenkestävyyden lisäksi mekaanista, kemiallista ja biologista kestävyyttä sekä tiiviitä saumoja. Erään-

laisiksi geomembraaneiksi voidaan luonnehtia savimattoja, joissa kankaiden väliin asennetaan valmistusvaiheessa bentoniittijauhetta. Bentonitiin paisumisominaisuuksista johtuen mm. mattoon tulevat pienet reiät korjaantuvat itsestään. Kuvassa 19 on esitetty kalvotiivistyksen rakennepoikkileikkaus /1,24/.



Kuva 19. Kalvotiivistyksen rakennepoikkileikkaus /1/.

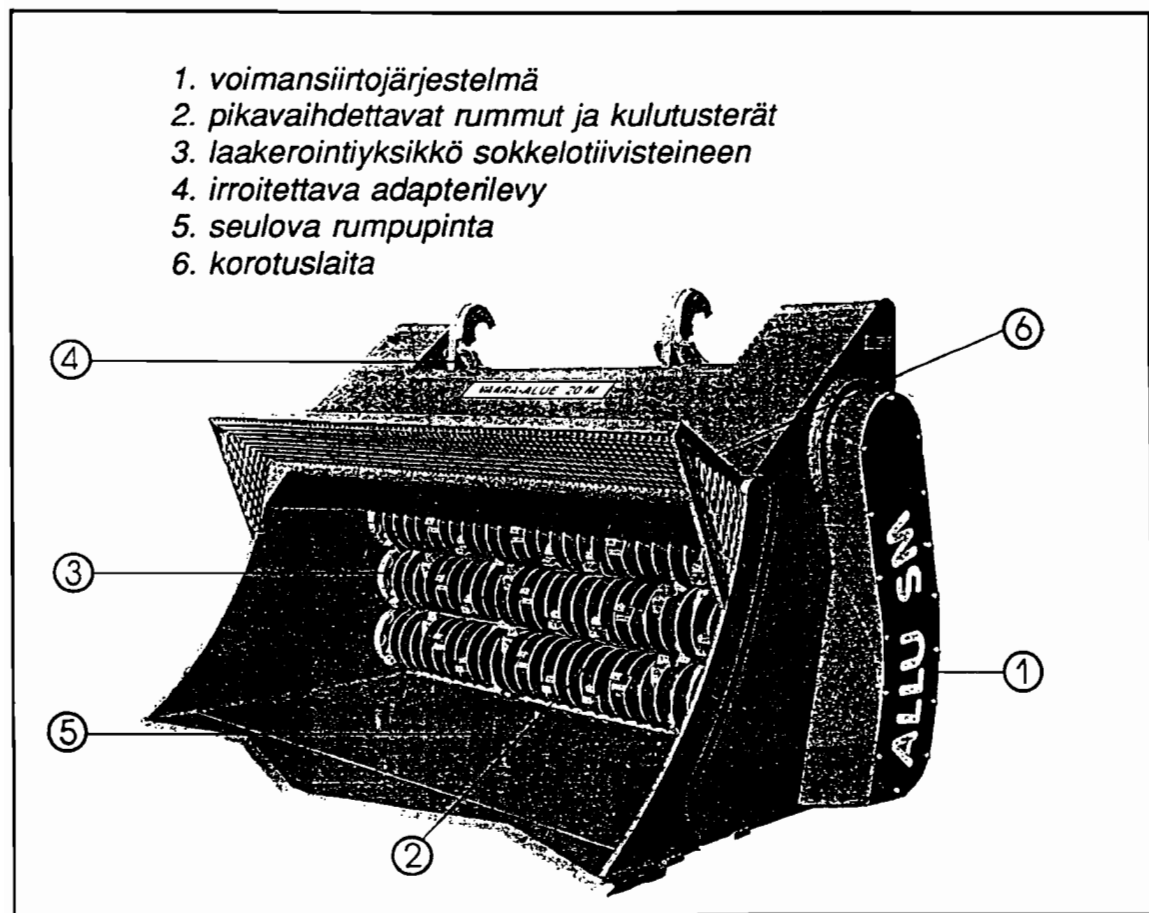
Bentoniittiä voidaan käyttää tiivistysmateriaalina myös sekoittamalla se maan aineksen sekaan. Bentonitiin käyttö maaperän tiivistysaineena perustuu sen kykyyn paisua kostuessaan voimakkaasti. Bentonitti on hienojakoista luonnon-savea, joka sisältää pieniä pitoisuuksia vulkaanista tuhkaa /1/.

Maaperän injektoinnissa täytetään maassa olevat huokoset injektointiaineella, joka pumpataan maaperään suurella paineella. Injektointiaineena voidaan käyttää bentoniitti-, sementti- tai savilaasteja, kolloidisia tai polymeerisiä liuoksia. Injektointiaineen valintaan vaikuttavat mm. sen viskositeetti, sitoutumisaika ja myrkyllisyys sekä maalajin rakeisuus. Injektoinnin vaikutus maan veden-läpäisevyyteen on helposti todettavissa. Niiden maakerrosten, joihin injektointi-ainetta on mennyt, tiiviys on parantunut ja ne maakerrokset, joihin ainetta ei ole saatu menemään, ovat jo ennestään tiiviitä /1,31/.

9. STABILOINTIKALUSTO JA KUSTANNUKSET

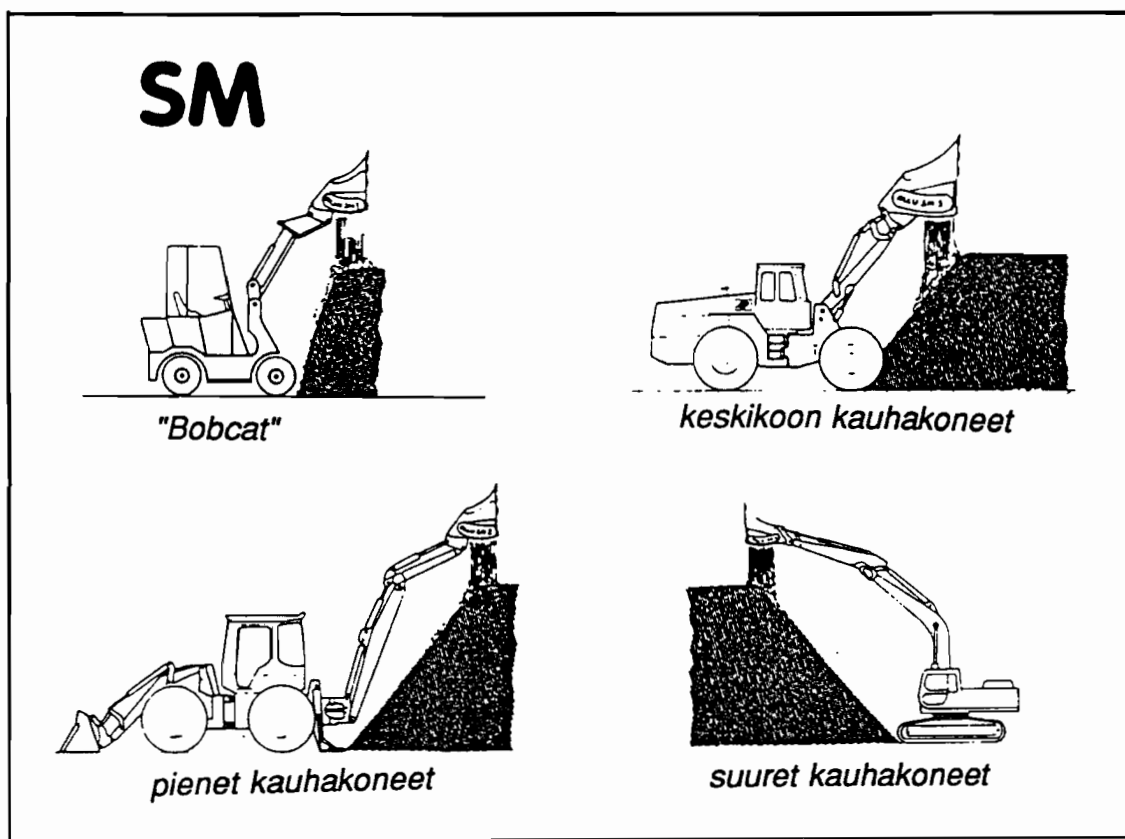
9.1 Seulamurskain

Seulamurskaimella tarkoitetaan kauhakoneen (esim. kaivinkone tai pyöräkuormaaja) lisälaitetta, joka kiinnitetään kauhan tilalle. Seulamurskain on eräänlainen kauha, jonka pohjaosa on varustettu rumpupinnalla. Rumpupinnassa vuorottelevat murskausterät ja seulontakiekot, jotka pyöriessään murskaavat ja seuloivat kauhassa olevan materiaalin. Seulamurskaimessa voidaan käyttää erilaisia murskausteriä käsiteltävän materiaalin ja halutun murskausasteen mukaan. Kuvassa 20 on esitetty Allu SM -tyyppisen seulamurskaimen periaatepiirros /7/.



Kuva 20. Allu SM 3-220 -tyyppisen seulamurskaimen periaatepiirros /7/.

Seulamurskain on monipuolinen työkalu maarakennustöissä, ja sen käyttökohteita maamassojen stabiloinnin lisäksi ovat mm. jätemaiden seulonta, turpeen hienonnus, kantojen erottelu, kompostin sekoitus, tiiviin maa-aineksen kuohkeutus ja seulonta, kivihiilen seulonta ja murskaus ja mullan kuorinta. Seulamurskain soveltuu sekä kuiville että märille materiaaleille. Edellämainittujen toimenpiteiden lisäksi käsiteltävät materiaalit pystytään samanaikaisesti lastaamaan esimerkiksi kuorma-auton lavalle. Kohteen laajuuden mukaan on valittavissa erikokoisia seulamurskaimia, jotka sopivat erilaisiin hydraulisiin kauhakoneisiin (kuva 21) /7/.



Kuva 21. Seulamurskaimen soveltuvuus erikokoisiin hydraulisiin kauhakoneisiin /7/.

Saven stabiloinnissa seulamurskain soveltuu sekä pinta- että massastabilointiin. Seulamurskaimella voidaan sekoittaa kuopassa olevaa tai penkereeksi muotoiltua savea, johon on kauhalla annosteltu tarvittava määrä sideainetta.

57



Kuva 22. Tattarisuon saven stabilointikokeilu Allu SM -tyyppisellä seulamurskaimella.

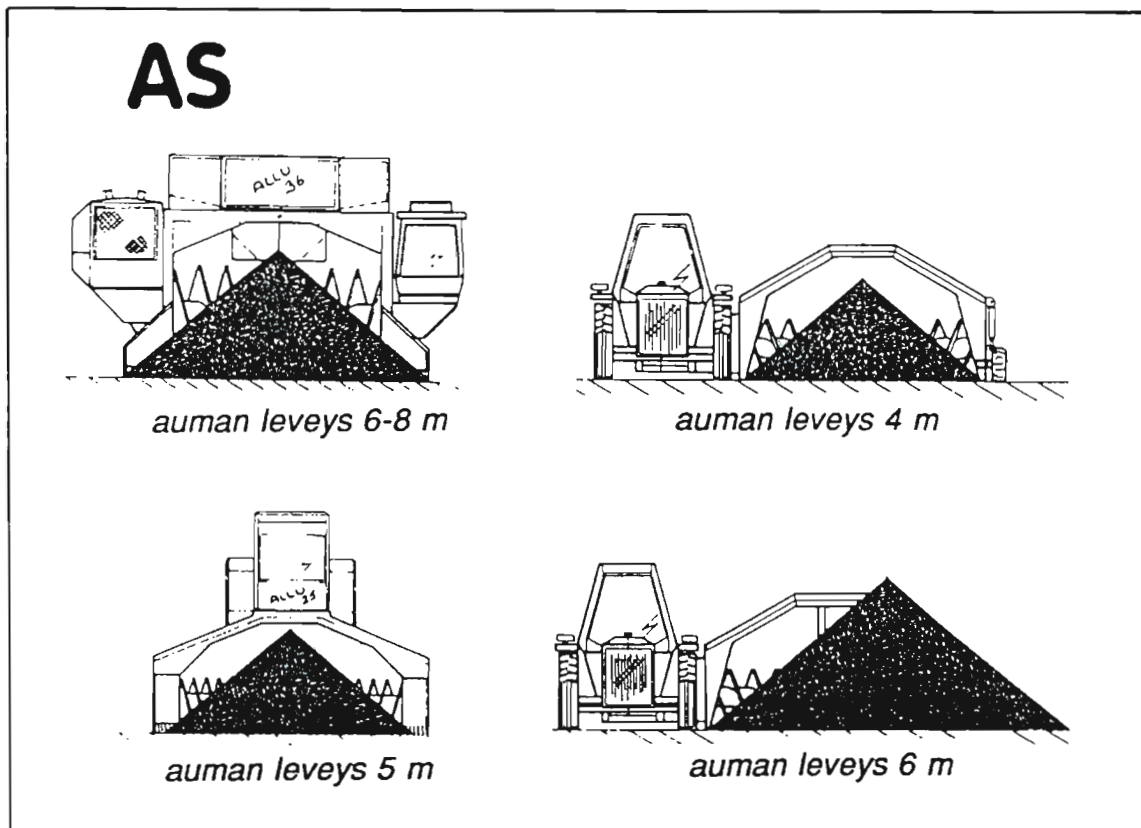


Kuva 23. Lähikuva saven ja sideaineen sekoittamisesta seulamurskaimella.

Saven ja sideaineen sekoituskertoja on oltava vähintään kolme. Tavanomainen kauha on vaihdettavissa vaivattomasti seulamurskaimen tilalle, jolloin koneen normaalikäyttö on mahdollista. Saven stabiloinnissa seulamurskaimen teho on 30 - 100 m³/h sekoituskerroista riippuen /7/. Kuvissa 22 ja 23 on esitetty seulamurskaimen työskentelyä Tattarisuon varalumenkaatopaikalla.

9.2 Aumasekoitin

Aumasekoitin on alunperin kehitetty kompostiaumojen sekoitukseen ja ilmastukseen. Aumasekoitin on itsekulkeva tai traktorin vetämä laite, joka sekoittaa aumassa olevan materiaalin ajaessaan sen yli. Ennen sekoittamista käsiteltävä massa on valmiiksi aumattava 4 - 8 metriä leveään ja 2 - 3 metriä korkeaan aumaan, joten aumasekoitin ei sovellu sensitiiviselle savelle /7/.



Kuva 24. Erikokoisia Allu AS -tyyppisiä aumasekoittimia /7/.



Kuva 25. Saven stabilointikokeilu Allu AS -tyyppisellä aumasekoittimella Vantaan Pitkäsuolla.



Kuva 26. Lähikuva Allu AS -tyyppisestä aumasekoittimesta.

Aumasekoittimeen on lisälaitteena saatavissa säiliö, josta esimerkiksi sideaineen syöttäminen aumaan onnistuu sekoituksen aikana. Riittävän sekoittumisen varmistamiseksi auma on saven stabiloinnissa ajettava useamman kerran päästä päähän. Kohteen laajuuden mukaan on valittavissa erikokoisia aumasekoittimia. Kuvassa 24 on esitetty Allu AS -tyyppisiä aumasekoittimia /7/.

Saven stabiloinnissa aumasekoittimella saavutetaan hyvä tehokkuus, joskin savi on kaivettava ja muotoiltava aumaan ennen sekoituksen aloittamista. Sekoittamisen jälkeen on mahdollista antaa stabiloidun saven lujittua jonkin aikaa ennenkuin se kuljetetaan käyttökohteeseen tai muotoillaan esimerkiksi melupenkereeksi. Kuvissa 25 ja 26 on esitetty aumasekoittimen työskentelyä Pitkäsuon maanlajitusalueella.

9.3 Aktivaattori

Aktivaattori eroaa perinteisestä syvästabilointilaitteistosta täysin kärkensä osalta. Maan sekoittaminen voidaan suorittaa joko pysty- tai vaakasuunnassa. Aktivaattori soveltuu ensisijaisesti pintastabilointiin, ja sillä on mahdollista päästä aina 4 - 5 metrin syvyyteen asti. Sideaineen syöttö tapahtuu kärkeen asennettua putkea pitkin, ja syötön aikana kärkeä liikutellaan pystysuunnassa sideaineen tasaisen jakautumisen varmistamiseksi. Varsinaisessa sekoitusvaiheessa kärkeä liikutellaan vuoroin pysty- ja vaakasuunnassa /39/.

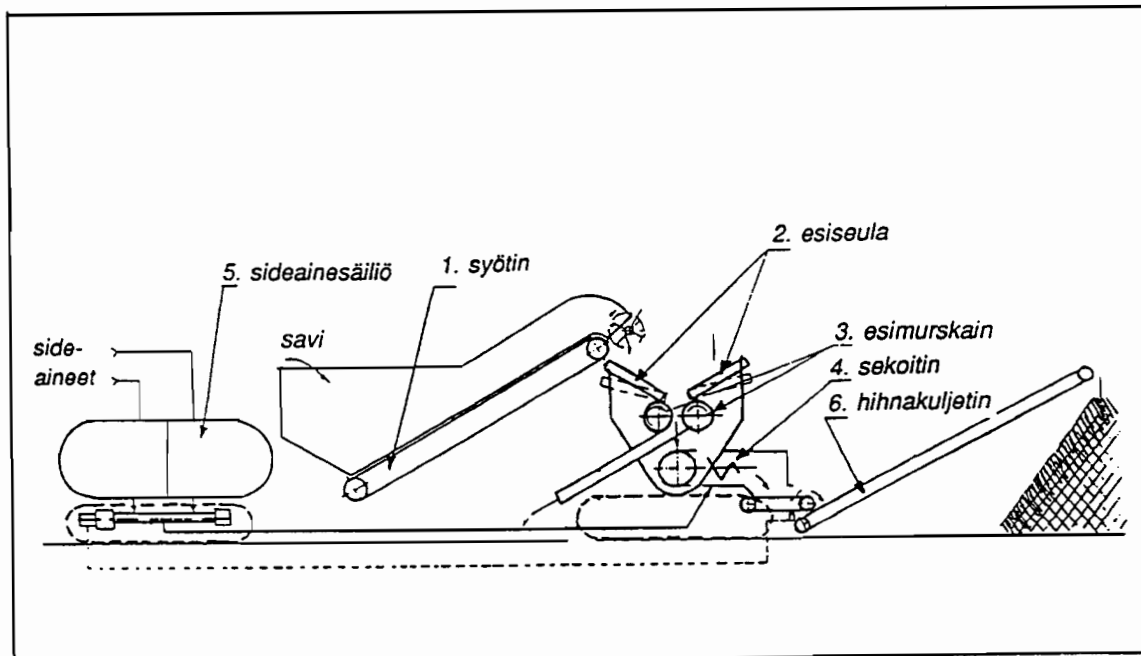
Esimerkiksi saven stabiloinnissa aktivaattorilla voidaan päästä tehokkuuteen 400 - 800 m³/työvuoro. Stabiloitavan savikerroksen päällä mahdollisesti oleva kitka- maakerros on pelkästään eduksi, sillä aktivaattori sekoittaa sen massan sekaan /39/. Kuvassa 27 on esitetty aktivaattorin työskentelyä Pikku-Huopalahdessa.



Kuva 27. Saven stabilointikokeilu aktivaattorilla Pikku-Huopalahdessa.

9.4 Saven sekoittaja

Saven sekoittaja on massastabilointilaitteisto, joka koostuu sekoitus- ja sideaineyksiköistä, jotka liikkuvat työmaalla omien telojensa avulla. Käsiteltävä savi voidaan kipata kuorma-autosta tai lastata kaivinkoneella sekoitusyksikön syöttömeen, jossa esiseula ja esimurskain hienontavat maa-aineksen. Tämän jälkeen sideaine ja savi sekoitetaan keskenään sekoittimessa. Sekoituksen aikana on koneiden hidas eteneminen mahdollista. Sekoitettu massa voidaan hihnakuljettimessa punnita ja samalla muotoilla kasaksi tai noin neljä metriä leveäksi kaistaleeksi. Koneella pystytään käsittelemään savea noin $200 \text{ m}^3/\text{h}$ /6/. Kuvassa 28 on esitetty sekoittajan periaatepiirros. Sekoittaja on käytössä pääasiassa Ruotsissa, eikä sitä näin ollen käytetty tämän tutkimuksen yhteydessä.



Kuva 28. Saven sekoittaja -laitteiston periaatepiirros /6/.

9.5 Kustannukset

Stabiloidun ylijäämäsavien hyötykäytön esimerkiksi täytöissä ja penkereissä on aikaisemmin tehdyssä tutkimuksessa /11/ todettu olevan noin neljänneksen edullisempaa kuin ko. saven kuljettamisen maksulliselle läjitysalueelle. Kun Tattari-suon saven massastabiloinnissa käytettiin sideaineena poltettua kalkkia 4% ja rikinpoiston lopputuotetta 30 %, tuli stabiloinnin kustannukseksi 38 mk/savi-m³ hintatason 17.3.1993 mukaan. Sen sijaan saven kaivu, kuljetus läjitysalueelle ja kaatopaikkamaksu olisivat aiheuttaneet kustannuksia 50 mk/savi-m³ /11/.

Massastabiloinnin kustannuksia laskettaessa tulee ottaa huomioon, että esimerkiksi korvaamalla massanvaihto stabiloinnilla vältetään suurimmaksi osaksi kaivu-, kuljetus-, läjitys- ja korvaavan massan hankintakustannuksilta. Stabiloinnin kustannuksista noin puolet syntyvät sideaineesta ja puolet stabilointikaluston työskentelystä.

Sideaineesta aiheutuviin kustannuksiin voidaan vaikuttaa käyttämällä entistä enemmän teollisuuden sivutuotteita perinteisten sideaineiden sementin ja poltetun kalkin ohella. Vähentämällä sementin ja kalkin osuutta ja lisäämällä lentotuhkaa, rikinpoiston lopputuotetta tai masuunikuonaa vaaditun lujuuden edellyttämä määrä, voidaan sideainekustannuksia vähentää huomattavasti.

Esimerkinomaisesti voidaan mainita Lohja Oy:n ilmoittamat hintatason 1.11.1993 mukaiset hinnat, jotka sisältävät sideaineen kuljetuksen :

portlandsementti 450 mk/tonni,	poltettu kalkki 550 mk/tonni,
lentotuhka 58 mk/tonni,	rikinpoiston lopputuote 38 mk/tonni,
seos 14 250 mk/tonni,	seos 4 150 mk/tonni,
Lohjamix A 360 mk/tonni ja	Lohjamix B 350 mk/tonni.

Sideaineiden hinnat saattavat vaihdella kausiluontoisesti sekä kerralla tilattavan määrän mukaan. Sivutuotteiden käyttämiseen vaikuttaa kuljetusetäisyys ja saatavuus, joka riippuu mm. vuodenajasta.

Stabilointikalustosta aiheutuviin kustannuksiin voidaan vaikuttaa valitsemalla kulloiseenkin kohteeseen teholtaan sopivimmat työkoneet, kun otetaan huomioon kohteen laajuus ja työskentelyolosuhteet.

10. YHTEENVETO

Ylijäämäsavien stabiloiminen on erittäin kilpailukykyinen vaihtoehto saven sijoittamiselle maksullisille maanlajitusalueille. Saven kaivu, läjitys ja kuljetus helpottuvat huomattavasti stabiloinnin myötä. Stabiloitua massaa voidaan muuttuneiden geoteknisten ominaisuuksiensa ansiosta käyttää kitkamaalajien sijasta piha- ja maisemointitäytöissä, liikennealueiden maaluiskien muotoilussa sekä tapauskohtaisten selvitysten jälkeen melu- tai tiepenkereissä, kunnallisteknisissä kaivannoissa ja rakennusten vierus- tai alustätäytöissä.

Käyttämällä saven stabiloinnissa sideaineena teollisuuden sivutuotteita kuten lentotuhkaa, rikinpoiston lopputuotetta ja masuunikuonaa, jotka niinkään lasketaan jätetuotteiksi, voidaan vähentää myös niiden sijoittamista läjitysalueille. Vähentämällä perinteisten sideaineiden, sementin ja poltetun kalkin osuutta stabiloinnissa ja lisäämällä sivutuotteita vaaditun lujuuden edellyttämä määrä, löydetään hinnaltaan hyvin kilpailukykyiset sideainesekoitukset, kun määritetään tapauskohtaisesti sideaineiden seossuhteet ja pitoisuudet.

Stabiloitaessa savea erilaisilla sideainesekoituksilla saadaan massan raekoko muuttumaan lujittumisen myötä karkeammaksi. Kun käytettiin sideainepitoisuuksia 10 - 33 % saven kuivapainosta laskettuna muuttui lihava savi pääsääntöisesti rakeisuudeltaan silttiä vastaavaksi. Vastaavasti muuttuivat massan vedenläpäisevyys- ja konsolidaatiokerroin siltin arvoja vastaaviksi, jolloin massan kokoonpuristuminen on huomattavasti nopeampaa kuin alkuperäisen saven.

Stabiloinnilla saadaan massan leikkauslujuus moninkertaiseksi alkuperäisen saven leikkauslujuuteen nähden. Massan tehokas kitkakulma kasvaa lujittumisen myötä. Massan leikkauslujuus muodostuu pehmeillä, plastisilla massoilla pääosin tehokkaasta koheesiosta ja kovilla, haurailla massoilla tehokkaasta kitkakulmasta.

Stabiloinnin jälkeen massan pH on alkuperäistä suurempi. Tässä tutkimuksessa stabiloitujen massojen pH oli 9,5 - 10,5 , jolloin kasvukerroksen rakentaminen massan päälle on ehdoton edellytys verhoiltaessa massoja kasvillisuudella.

Sideaineiden tai saastuneiden maamassojen sisältämien raskasmetallien sitoutumisesta on saatu ympäristökuormituksen kannalta suotuisia tuloksia. Stabilointi sitoo raskasmetalleja vaikeammin liukoiksi yhdisteiksi siten, että stabiloidusta massasta liukenee vähemmän haitallisia aineita kuin alkuperäisestä savesta.

Kenttäkokeissa käytetty kalusto soveltui erinomaisesti saven stabilointiin, eikä sekaan joutuneesta kitkamaasta ollut työteknisesti haittaa. Stabiloitavan massan seassa kitkamaa on pikemminkin hyödyksi toimiessaan jonkinlaisena runko-aineena. Ympäristövaikutusten kannalta suotuisien koetulosten pohjalta voitaisiin stabiloitavan massan sekaan lisätä tarkoituksella esimerkiksi raskasmetalleja sisältävää hiekkaa, jolloin tulisi kuitenkin huolehtia riittävästä savi- ja vesimäärästä haitallisten aineiden "kapseloitumisen" varmistamiseksi. Tällöin haitallisten aineiden liukoisuus olisi kuitenkin selvitettävä etukäteen tehtävin tutkimuksin.

Seulamurskain, joka on eräänlainen seulova ja murskaava kauha, soveltuu hyvin pienehköihin stabilointikohteisiin kokonsa ja kätevyytensä ansiosta. Seulamurskainkauha on vaivattomasti vaihdettavissa tavallisen kauhan tilalle, jolloin kaivinkoneen normaalikäyttö on tarpeen vaatiessa mahdollista. Seulamurskainkauhalla voidaan massa myös suoraan lastata esimerkiksi kuorma-auton lavalle. Seulamurskaimella voidaan stabiloida kuopassa tai penkereessä olevaa savea.

Aumasekoitin, joka sekoittaa auman muotoon läjitetyn massan ajaessaan sen yli, soveltuu laajoihin kohteisiin. Ennen sekoitusta on massa muotoiltava aumoiksi, joten maalajin on oltava jo valmiiksi koossapysyvää. Aumasekoitin on tehokas ja vaatii melko suuren työskentelyalueen.

Aktivaattori, joka puomin päässä olevan kärkensä avulla sekoittaa maassa olevan saven jopa 4 - 5 metrin syvyydeltä, soveltuu kokonsa ansiosta pieniin kohteisiin ja tehokkuutensa ansiosta laajoihin kohteisiin. Aktivaattorilla voidaan savi-kerros stabiloida poistamatta sen päällä olevaa kitkamaa- tai kuivakuorikerrosta.

Saven sekoittaja soveltuu tehokkuutensa ansiosta laajoihin kohteisiin, mutta se vaatii hyvin kantavan maaperän. Savi voidaan kipata kuorma-autolla tai lastata kaivinkoneella syöttimeen. Sekoittajan hihnakuuljettimella stabiloitu massa punnitaan, ja se voidaan läjittää joko kasaksi tai levittää neljän metrin kaistaleeksi.

Kesällä suoritettavien stabilointitöiden yhteydessä on huolehdittava massan kastelusta tai peittämisestä, sillä kuivuminen voi estää lujittumisreaktioiden tapahtumisen. Stabiloitu massa ei liety vedessä, joten stabilointityö voidaan suorittaa sateisissa olosuhteissa tai massa voidaan läjittää veteen.

Saven routivuusominaisuudet saattavat stabiloitaessa muuttua. Tehdyissä routauskokeissa oli viisi lievästi routivaa, neljä keskinkertaisesti routivaa ja kolme erittäin routivaa massaa, kun kaikki savet ilman stabilointia ovat todennäköisesti lievästi routivia.

Ennen laajamittaista stabilointia tulisi saven lujittumisominaisuudet selvittää laboratoriossa riittävän tarkasti ottaen huomioon maakerrosten todennäköisen epähomogeenisuuden. Erityisiä ongelmakohtia ovat sideaineen annostelu, sekoittaminen ja massan tiivistäminen, jotka laboratoriossa eivät aiheuta minkäänlaisia hankaluuksia. Sen sijaan työmaaolosuhteissa sideaineen samoin kuin saven määrän arvioiminen voi olla vaikeata. Sekoittuminen voi olla epätäydellistä sideaineen paakkuuntumisen ja pölyämisen johdosta.

Sideaineiden pölyämisen ja korkean emäksisyyden vuoksi on työsuojeluun kiinnitettävä asianmukaista huomiota.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Björn, E., Saasteiden leviämisen estäminen eristysrakenteilla. Ympäristö ja terveys 1992 : 2 - 3. s. 150-158.
- /2/ Chamberlain, E., CRREL Monograph 81-2. Frost susceptibility of soil. Review of index tests. Hanover 1981. 121 s.
- /3/ Contaminated Soil '93, Fourth international KfK/TNO conference on contaminated soil, 3. - 7. May 1993. Berlin 1993. s. 349-363.
- /4/ Eikmann, T., Kloke, A., Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-) Stoffe in Böden. Handbuch Bodenschutz, 3590. Berlin 1991. s. 1 - 19.
- /5/ Friberg, P., Slunga, E., Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu. Espoo Otaniemi 1989. 130 s.
- /6/ Fundator Oy, Massastabilointilaitteistoeste. 1993.
- /7/ Ideachip Oy, Insinööritoimisto, Ympäristötekniikka. Kaluston esittelykansio. 1993.
- /8/ ISSMFE Technical Committee on Frost, Work report 1985-1989. Frost in geotechnical engineering Vol. 1. International Symposium in Saariselkä, Finland 13.-15. March 1989. VTT Symposium 94. Espoo 1989. s.15-70.
- /9/ Jessberger, H.L, Jagow, R., Determination of frost susceptibility of soils. ISSMFE Technical Committee on Frost, Frost in geotechnical engineering Vol. 2. International Symposium in Saariselkä, Finland 13.-15. March 1989. VTT Symposium 94. Espoo 1989. s. 449-469.
- /10/ Kalkkipilariohjeet KPO-86. Helsinki 1986. 44 s.
- /11/ Karlstedt, P., Halkola, H., Ylijäämäsavien massastabilointi. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 61/1993. Helsinki 1993. 70 s.
- /12/ Konrad, J-M., Frost heave mechanics. Ph. D. Thesis. University of Alberta 1980. 472 s.
- /13/ Konrad, J-M., Morgenstern, N.R., Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19. 1982. s. 250-259.

- /14/ Korhonen, K-H., Gardemeister, R., Tamminrinne, M., Geotekninen maaluokitus. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. Espoo 1974. 205 s.
- /15/ Kujala, K., Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. Acta Universitatis Ouluensis C 58. Oulu 1991. 99 s.
- /16/ Lahtinen, P., Parkkinen, E., Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Tielaitoksen selvityksiä 46/1992. Helsinki 1992. 53 s.
- /17/ Lake, D.L., Chemical speciation of heavy metals in sewage sludge and related matrices. Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes, Vol. 1. Florida 1987. s. 125-153.
- /18/ Lohja Oy Ab:n Ympäristöteknologiayksikön tietokortisto. Vihreä kortti 11-30. 1992.
- /19/ Meyerhof, G.G., Brown, J.D., Mouland, G.D., Prediction of friction pile capacity in a till. Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 15.-19. June 1981. s. 777-780.
- /20/ Paatero, J., Saastuneiden maa-alueiden kunnostaminen stabiloimalla. Ympäristö ja terveys 1992 : 2 - 3. s. 144-149.
- /21/ Puntti, E., Helsingin maaperän epäpuhtauksista. Ympäristö ja terveys 1992 : 2 - 3, s. 178-182.
- /22/ Puolanne, J., Saastuneet maa-alueet Suomessa. Ympäristö ja terveys 1992 : 2 - 3. s. 84-88.
- /23/ Rantamäki, M., Tamminrinne, M., Pohjarakennus. Otakustantamo 465. Espoo 1984. 228 s.
- /24/ Rathmayer, H., Juvankoski, M., Geosynteettiset tuotteet georakentamisessa. SGY, Helsinki 1992. 105 s.
- /25/ Rudd, T., Scope of the problem. Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes, Vol. 1. Florida 1987. s. 1-24.
- /26/ Saarelainen, S., Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. Technical Research Centre of Finland. VTT Publications 95. Espoo 1992. 119 s.

- /27/ Seppänen, A., Saastuneiden maa-alueiden kunnostaminen. Ympäristö ja terveys 1992 : 2 - 3. s. 89-93.
- /28/ Seppänen, H., Ympäristönsuojelutekniikan perusteet. Otakustantamo 539. Helsinki 1991. 244 s.
- /29/ Siegrist, R.L., International review of approaches for establishing cleanup goals for hazardous waste contaminated land. Institute of georesources and pollution research. Norway 1989. 81 s.
- /30/ Sloot, H.A. van der, Wijkstra, J., Leeuwen, J. van, Potential for reuse of lead-contaminated urban soils. Proceedings of the international conference Waste Materials in Construction Wascon '91. 10.-14. November 1991. Maastricht 1991. s. 373.
- /31/ Solovjew, N., Maainjektointi. RIL 166, Pohjarakenteet. Helsinki 1986. s. 308-321.
- /32/ Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry, Geotekniset laboratorio-ohjeet, GLO-85, 1. Luokituskokeet. Helsinki 1985. 107 s.
- /33/ Suomen standardisoimisliitto. Standardi, rakennussementit. 1983. 8 s.
- /34/ Tie- ja vesirakennushallitus (TVH), Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita. Osa V. Helsinki 1980. 132 s.
- /35/ Tielaitos, Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. Tielaitoksen selvityksiä 15/1993. Oulu 1993.
- /36/ Vesi- ja ympäristöhallitus, Outi Pyy. Suullinen tiedonanto 28.5.1993.
- /37/ VTT, Geotekniikan laboratorio, Salmisaaren hiilivoimalaitoksen rikinpoistotuotteen käyttö. Merisijoitus, loppuraportti. 31 s.
- /38/ VTT, Kemian laboratorio, Esa Mäkelä. Suullinen tiedonanto 27.4.1993.
- /39/ YIT-Yhtymä Oy, Laite-esittely. 1993.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto
Liite 1. Stabiloidun Malminkaaren saven puristuskoetulokset.

STABILOIDUN MALMINKAAREN SAVEN KESKIMÄÄRÄISET PURISTUSKOETULOKSET:

SIDEAINE	KOESTUS-	PITOI-	PUR.LUJUUS	SIDEAINE	KOESTUS-	PITOI-	PUR.LUJUUS	SIDEAINE	KOESTUS-	PITOI-	PUR.LUJUUS		
nro	IKÄ [vrk]	SUUS %	[kN/m2]	nro	IKÄ [vrk]	SUUS %	[kN/m2]	nro	IKÄ [vrk]	SUUS %	[kN/m2]		
Seos 1	3	6	5	7	3	6	10	Seos 17	28	10	15		
		10	6			10	11			16	21		
		25	9			25	16			25	29		
	28	6	11		28	6	20		95	10	25		
		10	19			10	18			16	33		
		16	63			25	92			25	93		
		25	385		91	6	25	Seos 18	8	16	66		
	6	10	10			30	25			113			
	10	42	25			1583	10			35			
	91	16	178	8	3	6	13		28	16	87		
		25	417			10	13			25	174		
						25	62			10	39		
Seos 2		3	6		8	28	6	15	Seos 19	95	16	84	
	10		8		10		19	25			214		
	25		10		25		53	10			16		
	28	6	14	Polttu kalkki	91	6	22	9		25	63		
		10	25			10	30			10	134		
		16	29			25	116			16	40		
		25	207		3	6	27	28		16	77		
	91	6	23			10	35			25	142		
		10	35			25	91			10	38		
		16	87	Seos 9		16	99						
		25	478			25	216						
Seos 3	3	6	8	28	6	44	Seos 20	3	16	23			
		10	10		10	48			25	58			
		16	56		25	178			10	41			
		25	79	91	6	48		28	16	118			
	6	14	10		58	25			552				
	10	57	25		179	10			72				
	35	6	10	3	6	60		97	10	72			
		10	274		10	57			16	191			
		25	1003		25	236	25		631				
		28	6	18	Seos 10	28	6	102	Seos 21	3	16	26	
	10		90	10			149	25			44		
	16		405	25			366	10			23		
25	911		6	95		28	16	40					
Seos 4	3	6	6	91			6	305		91	16	96	
		10	7				25	597			25	18	
		25	28			10	39						
	28	6	11	3		6	6	28		16	119		
		10	32		10	18	25			28			
		16	147		25	92	10			75			
		25	429	28	6	14	Seos 22	28		16	31		
	91	6	14		10	51				25	57		
		10	35		25	176			10	176			
		16	172	91	6	13		91	16	35			
		25	298		10	45			25	67			
25	298	25	343		10	141							
Seos 5	3	6	8	Seos 14	3	6	11	Seos 24	3	16	15		
		10	10			10	28			25	37		
		25	43			25	56			10	12		
	28	6	13		28	6	25		28	16	37		
		10	26			10	56			25	149		
		16	105			25	210			10	12		
		25	377		91	6	31		91	16	40		
	6	14	10			61	25			128			
	10	45	25	229									
	Seos 6	3	6	4	15	3	6	63	Seos 26	3	16	8	
			10	6			10	88			25	13	
			25	14			25	284			10	14	
6			7	28		6	151	28		16	31		
10		9	10			236	25			80			
25		38	25			1082	10			14			
28		6	6	91		6	187	91		16	37		
		10	10			10	338			25	122		
		25	37		25	1390							
		Seos 7	3	6	10	3	3	6	167	Seos 28	29	10	19
10				18	10			278	28			16	41
16				22	25			940				25	145
25	35			6	211		91	10			25		
28	6		24	28	6			438	91		16	43	
	10		15		10			541			25	173	
	16		24		25		1931						
	25		46										

Seos 27	3	6	22
		10	58
		16	87
		25	109
	30	6	53
		10	129
		16	132
		25	404
	91	6	37
		10	163
		16	207
		25	563
Seos 29	29	10	24
		16	34
		25	134
	91	10	21
		16	24
		25	118
Seos 30	29	10	26
		16	88
		25	221
	91	10	28
		16	87
		25	165
Seos 31	3	6	16
		10	47
		16	104
		25	124
	28	6	33
		10	98
		16	129
		25	669
	91	6	27
		10	81
		16	321
		25	981
Seos 32	28	10	21
		16	82
		25	240
	91	10	17
		16	72
		25	183
Seos 33	28	10	13
		16	36
		25	138
	91	10	14
		16	22
		25	87
Seos 34	28	10	13
		16	55
		25	104
	91	10	17
		16	30
		25	84
Seos 36	3	10	112
		16	133
		25	250
	28	10	250
		16	368
		25	1105
	91	10	256
		16	180
		25	853
Seos 37	3	10	142
		16	275
		25	426
	28	10	276
		16	538
		25	662
	91	10	262
		16	738
		25	712

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

27.10.1994

1	Anttikoski, U.	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973
2	Anttikoski, U.	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973 *
3	Anttikoski, U.	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974 *
4	Mäkinen, R.	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974 *
5	Saarelma, M.	Melusojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974 *
6	Saarelma, M.	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976
7	Petäjä, J.	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977
8	Raudasmaa, P.	Metrotunneleiden injektointi	Suomi	1977 *
9	Anttikoski, U.	Kalliotunneleiden käyttö varastointiin	Suomi	1977 *
10	Tikkanen, H.	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978
11	Arkima, O.	Kluuvin ruhjeen jäädytys	Suomi	1978 *
12	Raudasmaa, P.	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979
13	Havukainen, J.	Voimalalaitostuhtan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979
14	Vähäaho, I.	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979 *
15	Raudasmaa, P.	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980
16	Anttikoski, U.	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979 *
17	Roinisto, J.	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	Suomi	1981
18	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	Suomi	1981 *
19	Roinisto, J.	Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981
20	Vuola, P.	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981
21	Havukainen, J. & Korhonen, O.	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981
22	Havukainen, J.	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981
23	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982
24	Latvala, A.	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	Suomi	1982
25	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Sulamäki, A.	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982
26	Halkola, H.	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparimäessä	Suomi	1982 *
27	Paavola, P.	Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys	Suomi	1982
28	Vähäaho, I.	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982 *
29	Gulin, K.	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982
30	Halkola, H.	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982
31	Havukainen, J.	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983
32	Havukainen, J.	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983
33	Havukainen, J.	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983
34	Salmelainen, J.	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983
35	Havukainen, J.	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983
36	Hytti, P.	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984
37	Leinonen, J.	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	Suomi	1984
38	Pirinen, J.	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984 *
39	Latvala, A.	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984
40	Korpela, J. & Schuller, M.	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennus selvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984
41	Lahtinen, E-R	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väli raportti)	Suomi	1985
42	Korpi, J.	In Situ-kuormituskoee painumien määrittämiseksi	Suomi	1985
43	Havukainen, J.	Esirakentamisen kehittäminen	Suomi	1985
44	Vähäaho, I.	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987
45	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Latvala, A.	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987
46	Julkunen, A.	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987
47	Hutri, K-L.	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988
48	Melander, K.	Puristin-beijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989
49	Leppänen, M.	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989
50	Vähäaho, I. & Ryhänen, H.	Sulamiskondolidaation vaikutukset savessa	Suomi	1989
51	Vähäaho, I.	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989
52	Koskela, P.	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	Suomi	1989
53	Saari, M. & Korhonen, O.	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990
54	Saari, M. & Volanen, N.	Ruoholahden koepaafutus	Suomi	1990
55	Yrjänä, J. & Korhonen, O.	Pystyöjitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991
56	Niinimäki, R. & Raudasmaa, P.	Viikimäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	Suomi	1992

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET JATKUU

27.10.1994

57	Nieminen, J. & Johansson, E. & Holopainen, P.	Viikinin keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	Suomi	1992
58	Ahola, J. & Viitala, R.	Lujitus- ja tiivistysnäärät Helsingin pientunneleissa	Suomi	1992
59	Ravea, T. & Korhonen, O	Helsingin tulvapaidon rakentamisen edellytykset	Suomi	1992
60	Taipale, H. & Korhonen, O	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	Suomi	1992
61	Karlstedt, P. & Halkola, H	Ylijäämäsavien massastabilointi	Suomi	1993
62	Leiskallio, A. & Lehtonen, J.	Maankäytön geotekninen suunnittelu	Suomi	1993
63	Anttikoski, U. & Kumar, S. & Saarelainen, S.	Kalliokaivanto jätehuollossa Esiraportti	Suomi	1993
64	Rekonen, Rita & Halkola, Hannu	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	Suomi	1994

*) painos loppuunmyyty

Hinnat: 1 kpl. 80 mk, 2-3 kpl 70 mk, 4-6 kpl 60 mk, 7- kpl 55 mk **

**) arvonlisävero 12 %