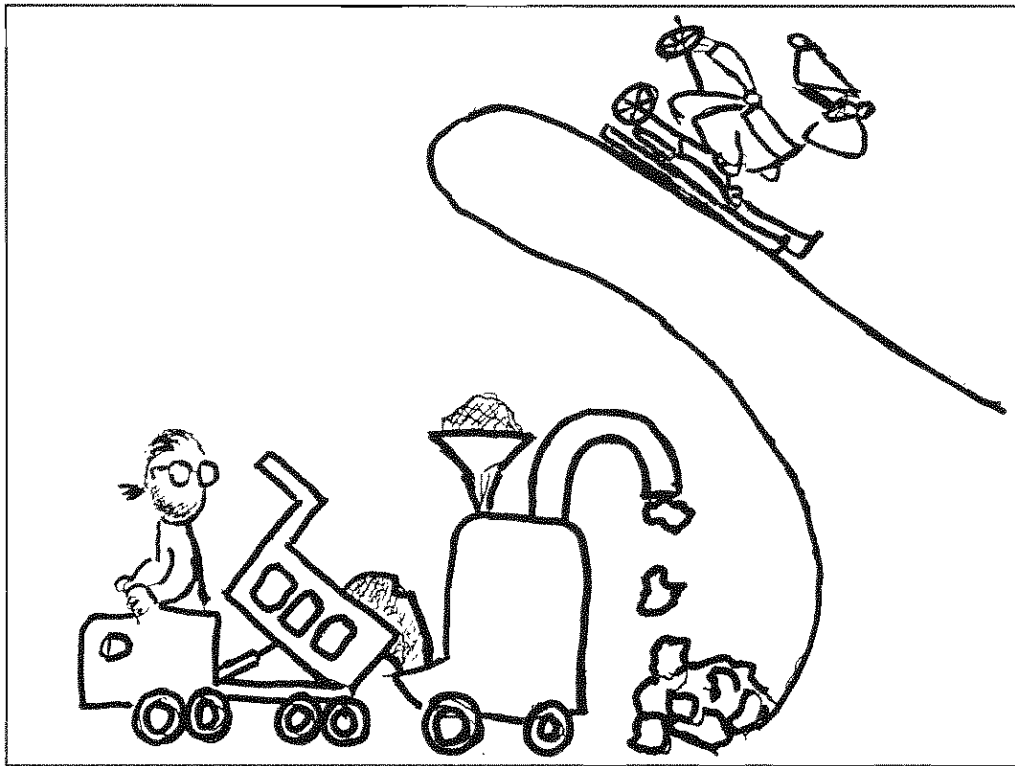


NÄYTEKAPPALE

AINUT, ÄLÄ VIE POIS



YLIJÄÄMÄSAVIEN MASSASTABILOINTI

Paul Karlstedt • Hannu Halkola



HELSINGIN KAUPUNKI

KIINTEISTÖVIRASTO

GEOTEKNINEN OSASTO

ALKULAUSE

Rakennustoiminnan Helsingissä keskittyessä pohjasuhteiltaan heikoille alueille, on täyttöalueille ajettujen ylijäämämassojen määrä noussut. Rakentamisen lamasta huolimatta läjitysalueille vastaanotettiin vuonna 1991 yli 100000 m³ savea. Myöskin ongelmaksi on muodostunut kivihiilivoimalaitosten rikinpoistossa vapautuva lopputuote, jolle ei ole keksitty hyötykäyttöä.

Rakennusviraston aloitteesta käynnistettiin geoteknisellä osastolla tutkimustyö ylijäämäsaveen ominaisuuksien muuttamiseksi stabiloimalla siten, että läjitystilan tarve vähenisi oleellisesti. Lisäksi selvitettiin rikinpoiston lopputuotteen vaikutusta stabilointiprosessiin.

Tiedotteessa esitetty massastabilointimenetelmä tarjoaa ongelmamassojen käsittelyyn erittäin lupaavan uuden vaihtoehdon, joka taloudellisuuden lisäksi vähentää luonnonkiviainesten tarvetta rakentamisessa.

Tiedote perustuu tekn. yo. Paul Karlstedtin diplomityöhön, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkolan ohjauksessa. Työtä valvoneeseen projekti-ryhmään ovat lisäksi kuuluneet toimistopäällikkö Eero Sipilä ja toimistopäällikkö Aimo Oksanen Rakennusvirastosta sekä toimistopäällikkö Aarno Ahti Satamalaitokselta. Työn valvoja oli professori Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta .

Helsingissä helmikuun 9. päivänä 1993

Usko Anttikoski
osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla tavoitteena selvittää mahdollisuuksia pienentää rakennustoiminnassa syntyvistä ylijäämäsavista aiheutuvia kustannuksia parantamalla saven geoteknisiä ominaisuuksia massastabiloinnilla. Lisäksi tutkittiin erilaisten jätetuotteiden vaikutuksia stabiloidun massan ominaisuuksiin.

Tutkimus jakaantui valmisteleviin laboratoriokokeisiin, joissa selvitettiin tutkittavalle savelle soveltuvat sideaineyhdistelmät ja -pitoisuudet, sekä koerakentamiseen ja koerakennusmassojen ominaisuuksien tutkimiseen. Valmistelevissa laboratoriokokeissa valittiin 7 ja 14 vuorokauden yksiaksiaalisten puristuslujuuksien perusteella koerakennuskohteessa käytettäviksi side- ja lisäaineiksi sementti, poltettu kalkki, terästeollisuuden masuunikuona sekä kivihiilivoimalan rikinpoistolaitoksen lopputuote.

Koerakennuskohteessa sekoitettiin side- ja lisäaineet saveen pinta-stabilointikalustolla. Koemassat läjitettiin tiivistämättä tarkoitusta varten kaivettuihin kuoppiin. Koemassojen stabiloitumista seurattiin lämpötilamittauksin ja kairauksin. Laboratoriossa tutkittiin lisäksi koemassojen painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuuksia, routivuutta sekä niiden ympäristölle aiheuttamaa kemiallista kuormitusta.

Pääosa useimpien massojen lujittumisesta tapahtui 60 vrk:n kuluessa massan sekoittamisesta, jolloin massojen leikkauslujuus oli keskimäärin 9-kertainen alkuperäisen saven leikkauslujuuteen nähden. Eniten poltettua kalkkia ja rikinpoistolaitoksen lopputuotetta sisältävät massat jatkoivat lujittumista aina sadan vrk:n ikään asti.

Laboratoriossa todettiin stabiloidun massan konsolidaatiopainuman olevan kymmenesosa alkuperäisen saven konsolidaatiopainumasta. Stabiloidun massan vedenläpäisevyys vastasi hienon siltin vedenläpäisevyyttä. Routanousukokeissa osoittautui kaksi koemassaa lievästi routiviksi, yksi routivuudeltaan kohtalaiseksi ja yksi merkityksettömäksi.

Stabiloitu massa ei sovellu kasvualustaksi korkean emäksisyytensä ja johtolukunsa puolesta. Sen sijaan ympäristölle haitallisten aineiden liukoisuuden havaittiin olevan stabiloidussa massassa jopa pienempi kuin alkuperäisessä savessa.

Alustavien kustannustietojen perusteella massastabiloinnin kustannukset ovat neljänneksen pienemmät kuin saven kuljettamisen ja läjittämisen kaupungin läjitysalueelle. Syntyvää materiaalia voidaan käyttää esimerkiksi melupenkereissä, maisemointi- ja pihatäytöissä, massanvaihdoissa sekä kunnallisteknisten kaivantojen täytöissä. Lisäksi massastabilointia käyttämällä voidaan läjitysalueilla luopua saven läjityksestä louhealtaisiin.

ABSTRACT

This research project was conducted at geotechnical department of the real estate office of the City of Helsinki. The study was aimed at investigating possibilities for reducing construction costs incurred through transportation and disposal of surplus clays by means of bulk stabilization. The effect of several types of waste products on stabilized clay was also investigated.

The project consisted of preliminary laboratory tests and a full-scale field test. Suitable types and quantities of additives for the clay used in this research were determined by mixing test samples in laboratory and testing them by the unconfined compression test after a curing period of 7 and 14 days. The additives chosen were quick lime, cement, blast-furnace slag and desulphurization product from coal-fired power plant.

In the field test clay and additives were mixed together using surface stabilization machinery. The mixed stabilates were deposited in pits without compaction. Curing of the stabilates was monitored by following temperatures in the masses and by vane and cone penetration tests. Additionally, consolidation properties, permeability, frost susceptibility and environmental impact of stabilates were investigated in laboratory tests.

For most of the stabilates curing took place during the first 60 days after mixing after which average shear strength of the masses was nine times the shear strength of the original clay. The stabilates containing most quick lime and desulphurization product continued curing up to 100 days after mixing.

In laboratory tests consolidation settlement of stabilates was found to be one tenth of settlement of the original clay and coefficient of permeability corresponds to the value of silt. In frost heave tests two of the stabilates were determined to have low frost susceptibility, one to have medium and one to have negligible frost susceptibility.

Stabilates were found to be unsuitable substrates due to high alkalinity and conductivity value. As for environmental impact the leachates from stabilate proved to be less hazardous than the ones from the original clay.

According to preliminary information, costs of handling surplus clay with bulk stabilization are three quarters of the costs of transporting and disposing of the clay in soil landfill, and the material is utilizable for e. g. noise abatement embankments, landscaping in parks, soil exchange and filling of pipeline excavations. Additionally, depositing surplus clay into pits made of broken stone in soil landfills becomes unnecessary when using bulk stabilization.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	I
TIIVISTELMÄ.....	II
ABSTRACT.....	III
SISÄLLYSLUETTELO.....	IV
1 JOHDANTO.....	1
2 YLIJÄÄMÄMASSAT	3
2.1 Kaivumassat	3
2.2 Ruoppausmassat.....	6
2.3 Saastuneet maamassat.....	6
2.4 Kivihiilivoimalaitoksissa syntyvät jätetuotteet.....	7
3 MAAN STABILOINTI.....	8
3.1 Stabilointimenetelmät	8
3.1.1 Syvästabilointi.....	8
3.1.2 Pintastabilointi.....	10
3.1.3 Massastabilointi	10
3.2 Stabilointiaineet ja -reaktiot.....	11
3.2.1 Poltettu kalkki.....	11
3.2.2 Sementti	13
3.2.3 Kivihiilivoimalaitoksen rikinpoiston lopputuote	14
3.2.4 Kivihiilivoimalaitoksen lentotuhka	16
3.2.5 Lannoiteteollisuuden jätetehärsi.....	17
3.2.6 Terästeollisuuden masuunikuona.....	17
4 LABORATORIOKOKKEET	18
4.1 Valmistelevat stabiloitumiskokeet laboratoriossa.....	18
4.1.1 Valitut seossuhteet	18
4.1.2 Kokeissa käytetty savi	19
4.1.3 Koemenettely.....	20
4.1.4 Tulokset.....	21
4.2 Täydentävät stabiloitumiskokeet laboratoriossa	22
4.3 Stabiloidun massan ominaisuuksien tutkimukset laboratoriossa.....	24
4.3.1 Stabiloidun massan painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuudet.....	25
4.3.2 Stabiloidun massan routivuus.....	29

4.3.3	Stabiloitu massa kasvualustana	33
4.3.4	Ympäristölle haitallisten aineiden liukoisuudet	34
5	MAASTOKOKEET	38
5.1	Koealueet.....	38
5.2	Sideaineseokset	39
5.3	Sekoituskalustot ja -menetelmät.....	40
5.3.1	Betoniautosekoitus	40
5.3.2	Pintastabilointi.....	41
5.4	Kenttätutkimukset	43
5.4.1	Lämpötilamittaukset.....	44
5.4.2	Kairaukset.....	47
5.4.3	Painuma- ja huokospainemittaukset.....	49
5.4.4	Ruuvilevykokeet.....	49
6	TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU.....	54
6.1	Stabiloidun massan geotekniset ominaisuudet.....	54
6.1.1	Painumaparametrit	54
6.1.2	Vedenläpäisevyys.....	54
6.1.3	Leikkauslujuus	55
6.1.4	Routivuus.....	56
6.2	Massastabilointikalusto.....	56
6.3	Massastabiloinnin käyttäminen maanrakennuksessa.....	57
6.3.1	Käyttökohteita	57
6.3.2	Kustannukset.....	58
6.4	Stabiloidun massan ympäristövaikutukset.....	59
6.4.1	Ympäristölle haitalliset yhdisteet.....	59
6.4.2	Korroosiovaikutus	60
6.4.3	Ympäristövaikutusten pienentäminen suunnittelun avulla	61
7.	YHTEENVETO.....	64
	LÄHDELUETTELO	68

Liite 1: Tattarisuon koealue

Liite 2: Herttoniemen koealue

1 JOHDANTO

Vaikka rakennustuotanto on pääkaupunkiseudulla supistunut lähes koko 80-luvun ajan, ovat rakennustoiminnassa syntyvät ylijäämämäämäärät samanaikaisesti kasvaneet. Kasvu selittyy toisaalta rakennushankkeiden painottumisella täydennysrakentamiseen ja toisaalta tonttien hintojen nousulla. Kaukana keskustasta sijaitsevien satelliittiasuinalueiden rakentaminen on vähentynyt. Sen sijaan on tihennetty kaupunkirakennetta kantakaupungissa. Tontit on rakennettu pääsääntöisesti taloudellisessa edullisuusjärjestyksessä ja nyt on jouduttu ottamaan käyttöön pohja-suhteidensa ja massatasapainonsa puolesta epäedulliset tontit. Valmiiksi rakennetun ympäristön katuverkosto ja kunnallistekniikka määräävät rakennettavan tontin tai alueen tasauksen, mutta eivät anna mahdollisuutta sijoittaa ylimääräisiä leikkausmassoja hyötykäyttöön - täyttöihin kelpaamattomien maa-ainesten sijoittamisesta puhumattakaan. Tonttien hintojen kohoaminen painostaa hyödyntämään kaavassa sallitun tonttitehokkuuden äärimmilleen. Mahdollisimman paljon teknisiä, varasto- ym yhteistiloja sijoitetaan kellarikerrokseen, jolloin kaikki sallitut kerrosneliöt voidaan rakentaa varsinaisiksi huonetiloiksi.

Ylijäämämäärat on pyritty sijoittamaan kaupungin rajojen sisäpuolelle, useimmiten viranomaisten osoittamalle täyttöalueelle. Täyttöalueista on kuitenkin jatkuva pula, ja niiden ylläpidosta - erityisesti liettyvien maa-ainesten osalta - sekä massojen kuljetuksista aiheutuu merkittävä kustannus rakennustoimintaan. Täyttöalueita kuormittavat myös ne kivihiilivoimalaitosten jätetuotteet, joille ei ole löytynyt hyötykäyttöä.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko ylijäämäsavimassojen geoteknisiä ominaisuuksia parantaa riittävän tehokkaasti ja edullisesti siten, että läjitysalueiden ylläpitokustannuksia voidaan oleellisesti vähentää tai stabiloitua massaa voidaan käyttää jopa täyttömateriaalina. Mikäli stabiloitu savi voitaisiin muuttaa täyttöihin kelvolliseksi, saavutettaisiin alueellisen massatasapainon paranemisen kautta useita etuja:

- ylijäämäsaven ajo vähenee, kun stabiloitua savea voidaan käyttää täyttöihin kaivupaikan lähellä,
- luonnonkiviainesten käyttö- ja kuljetustarve vähenee niiltä osin kuin ne ovat korvattavissa stabiloidulla savella ja
- läjitysalueiden tarve vähenee.

Lisäksi tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, voidaanko stabiloitavaan saveen sekoittaa kivihiilivoimalaitoksen jätetuotteita siten, että syntyvä tuote ei kuormita ympäristöä komponenttiensa mahdollisesti sisältämällä haitallisilla aineilla ja voidaanko halpoja jätetuotteita jopa käyttää korvaamaan kaupallisia sideaineita ts. sementtiä ja poltettua kalkkia. Näin vähennettäisiin edelleen täyttöalueiden tilantarvetta ja täyttöalueen ympäristön kemiallista kuormitusta sekä parannettaisiin stabiloidun massan käytön kustannusvaikutuksia. Tutkimuksessa selvitettiin myös stabiloidun savimassan soveltuvuutta meritäyttöihin.

Ylijäämämassojen stabilointia on Suomessa käytetty ainoastaan muutamassa koeluontoisessa kohteessa. Tästä johtuen ei käytettävissä ollut tarkoitukseen täysin soveltuvaa kalustoa. Yhtenä tutkimuksen tarkoituksena olikin hankkia kokemuksia ja tietoa jatkossa tapahtuvaa laitekehittelyä varten.

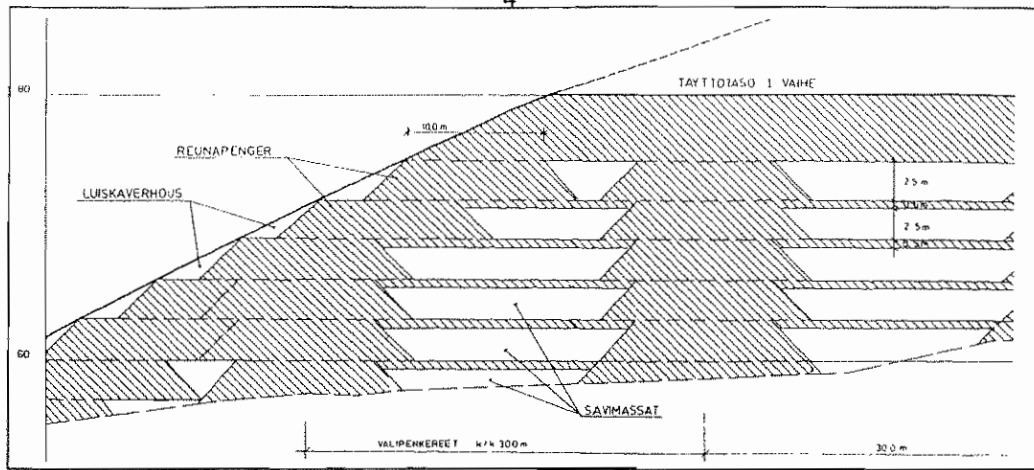
2 YLIJÄÄMÄMASSAT

2.1 Kaivumassat

Rakennustoiminnassa syntyy ylijäämämassoja joko alueellisen massataseen epätasapainon tai massanvaihdon seurauksena: Perustusten ja kellaritilojen syrjäyttämät maamassat sekä rakennusalueen yleistasausten aiheuttamat kaivumassat pyritään sijoittamaan hyötykäyttöön toisaalle rakennusalueelle tai sen läheisyyteen. Usein kaivumassat joudutaan kuitenkin käyttökohteiden puutteessa ajamaan pois ylijäämämassoina. Massanvaihtoa käytetään usein perustettaessa teitä, putkijohtoja tai rakennuksia maan varaan, jolloin heikosti kantava pohjamaakerros korvataan kokonaan tai osittain kantavammalla ja/tai keveämmällä materiaalilla, kuten luonnonsoralla, murskeella tai kevytsoralla. Korvattava materiaali kuljetetaan pois, mikäli lähistöltä ei löydy käyttöä heikosti kantavalle täyttömateriaalille.

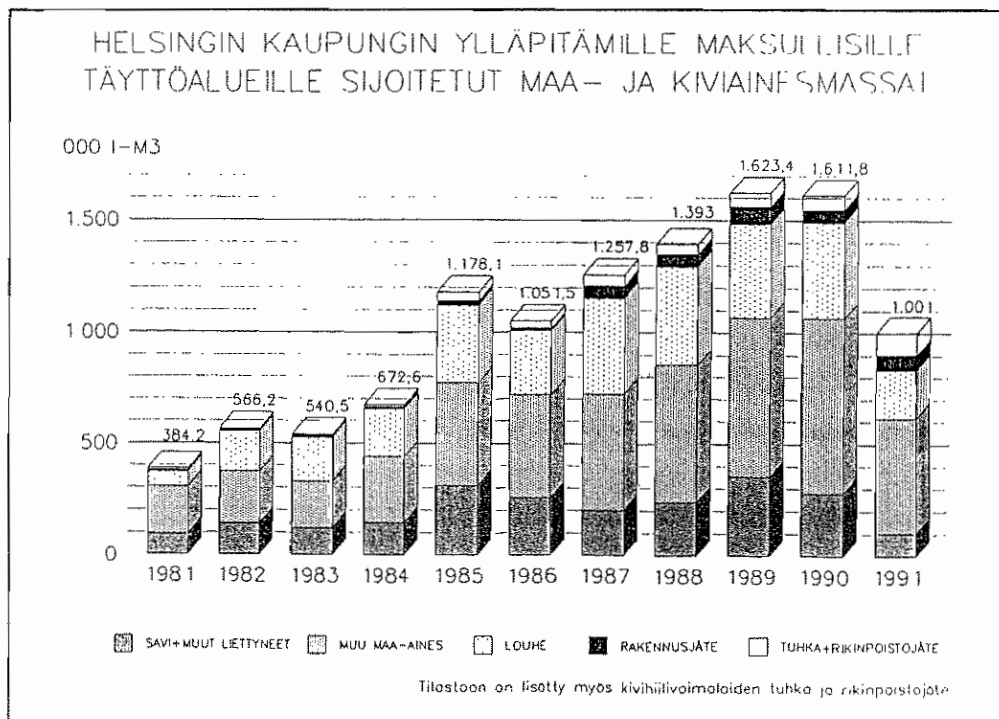
Kunnallisteknisten kaivantojen kaivumassat pyritään käyttämään täyttöihin joko kaivupaikalla tai sen läheisyydessä. Usein ei kuitenkaan ole mahdollisuutta kaivumassojen välivarastointiin, jolloin ne joudutaan ajamaan pois. Samoin kadun rakennekerrokset joudutaan rakentamaan kaivantoon uusista materiaaleista ja niiden korvaamat massat ajetaan pois.

Ylijäämämassojen sijoituspaikka on usein viranomaisten osoittama läjitysalue - varsinkin kun kyseessä ovat rakennusgeologisten ominaisuuksiensa puolesta rakentamiseen kelpaamattomat massat. Läjitysalueet rakennetaan yleensä täyttömäiksi, jotta pinta-alaltaan rajallisesta alueesta saadaan paras mahdollinen hyöty. Liettyvien ja heikosti kantavien maamassojen sijoittaminen täyttömäkeen vaatii kuitenkin erikoistoimenpiteitä, jotta mäen stabiliteetti saadaan riittäväksi. Tämä on tavallisesti hoidettu kuvassa 1 esitetyn tyyppisellä kennorakenteella, jossa liettyvät massat on ajettu esimerkiksi louheesta rakennettuihin altaisiin, täydet altaat on peitetty hyvin vettäläpäisevällä suodatinkerroksella ja tämän päälle on rakennettu uusia allaskerroksia.



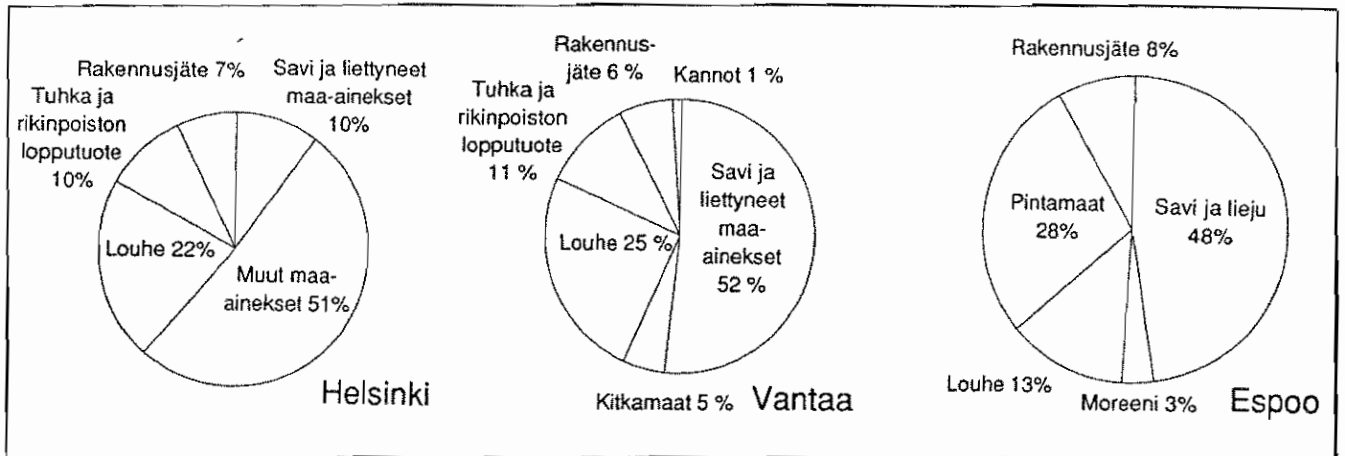
Kuva 1. Tyypillisen täyttömäkirakenteen poikkileikkaus (Malminkartano).

Vuonna 1991 vastaanotettiin Helsingin kaupungin ylläpitämällä läjitysalueilla yhteensä 101 400 m³ savea ja muita liettyviä maa-aineksia eli 10 % koko vastaanotetusta massamäärästä, joka oli 1 001 000 m³. Louhetta läjitysalueille otettiin samana vuonna 217 500 m³, eli 22% koko vastaanotetusta massamäärästä. Kuvassa 2 on esitetty Helsingin täyttöalueilla vastaanotettujen maa- ja kiviainesmassamäärien kehitys vuosina 1981 - 1991. Vuonna 1992 arvioidaan Helsingin kaupungin maksullisille täyttöalueilla vastaanotettavan 92 000 kuormaa ylijäämämassoja, joista 10 000 kuormaa on liettyviä maa-aineksia. Kuorman maksimikooksi on määrätty 12 m³.



Kuva 2. Helsingin kaupungin maksullisilla täyttöalueilla vastaanotetut maa- ja kiviainesmassat vuosina 1981 - 1991.

Kuvassa 3 on vertailtu Helsingin Espoon ja Vantaan ylijäämämassojen jakautumaa vuonna 1991.



Kuva 3. Ylijäämämassojen jakautuma pääkaupunkiseudulla vuonna 1991.

Ylijäämämassojen vastaanoton työkustannuksia varten on Helsingin kaupungin vuoden 1992 talousarvioon varattu 4,7 Mmk, josta on massamäärien supistumisen vuoksi arvioitu voitavan säästää 700 000 mk. Kun liettyivistä maa-aineksista aiheutuvat työkustannukset ovat kaksinkertaiset muihin massoihin nähden, on ylijäämämassojen vastaanoton työkustannuksiin budjetoitu Helsingissä 39,22 mk/kitkamaakuorma ja 78,44 mk/savi-, siltti- tai liejukuorma.

Vastaanottoaikkojen perustamiseen ja viimeistelyyn sekä täyttöalueselvitysten tekoon on vuoden 1992 talousarviossa varattu 2 900 000 mk eli kuormaa kohti 28 / 57 mk. Kun yhteiskustannuksia varten lisätään 10 % ja yleiskustannuksiin 6 % varsinaisista vastaanoton työkustannuksista, tulee ylijäämämassakuorman kustannukseksi kaupungille 79 mk kitkamaakuormalta ja 158 mk liettyviä maa-aineksia sisältävältä kuormalta. Kulut katetaan perimällä ylijäämämassojen läjitysalueilla vastaanottomaksua, joka on 80 mk kitkamaakuormalta ja 160 mk liettyviä maa-aineksia sisältävältä kuormalta. Helposti tiivistettävästä lentotuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen seoksesta peritään 120 mk kuormalta. Kuorman maksimikoko on 12 m³. Tätä suuremmista kuormista peritään kaksinkertainen maksu.

Espoossa ylijäämämassojen vastaanotosta peritään tällä hetkellä 80 mk kuormalta paitsi liejusta ja märästä savesta 160 mk kuormalta. Vantaa perii täyttöalueillaan kitkamaasta 100 mk kuormalta ja savi-, siltti- tai liejukuormasta 200 mk. Molemmissa kaupungeissa koskevat em. maksut enintään 12 m³:n kuormia.

2.2 Ruoppausmassat

Vuosittain syntyy Helsingissä 200 000 m³ ruoppausmassoja. Massat syntyvät lähinnä ranta-alueita ja laivaväyliä kunnostettaessa sekä laiva- ja venesatamia laajennettaessa. Tällä hetkellä ruoppausmassat kuljetetaan pääosin meriläjäytyspaikkoihin. Keskimääräinen ruoppauskustannus on tällä hetkellä 10 mk/m³, josta ²/₃ on itse ruoppaustyön kustannusta ja ¹/₃ ruopattun massan poiskuljetuksen kustannusta /1/. Helsingin kaupungilla on lupa ruoppausmassojen merisijoitukseen vuoteen 1997 mennessä 4,3 milj. m³:lle. Pelkästään suunnitellun Vuosaaren sataman ruoppauksista syntyisi ylijäämämassoja 7 milj. m³./19/

Ruoppausmassojen laatu ja koostumus riippuvat ruoppauskalustosta ja paikasta. Imuruoppauksessa ruopattava materiaali sekoittuu veteen ja liettyy nestemäiseksi. Järeämpää kalustoa käytettäessä ruoppausmassa nousee kauhassa kappaleina juurikaan sekoittumatta veteen.

Rantojen läheltä ruopattu massa sisältää usein sedimentoitunutta eloperäistä materiaalia. Kun tämä materiaali sekoittuu ja läjitetään uudestaan, alkavat happea kuluttavat hajoamisreaktiot uudelleen. Rantasedimentteihin, erityisesti teollisuusalueiden lähellä, saattaa myös olla varastoituneena myrkyjä tai muita ympäristölle haitallisia aineita, jotka ruoppauksen ja läjityksen yhteydessä leviävät ympäristöön ja joutuvat vesieliöiden ravintoketjuun.

Veden samentuminen ruoppauksen ja läjityksen yhteydessä on ongelma lähinnä makeassa vedessä, jossa veden selviäminen voi viedä vuosiakin. Veden suolapitoisuus edistää hienoaineksen koaguloitumista ja veden selkiintymistä. Ruoppauksen ja meriläjityksen yhteydessä voidaan veden samentumista ehkäistä lisäaineita käyttämällä. Saostukseen voidaan käyttää alumiini- tai rautasuoloja /14/. Aluminaattien käyttö on yleisempää, mutta sen haittapuolena on veden pH:n aleneminen eli happamoituminen.

2.3 Saastuneet maamassat

Maamassoja saastuu esimerkiksi teollisen toiminnan tai onnettomuuksien seurauksena. Jos saastuneella maa-alueella muodostuu pohjavettä tai alueen käyttötarkoitus tai olosuhteet sitä muuten edellyttävät, on saastunut maamassa kuljetettava pois ja käsiteltävä tai eristettävä siten, että sen sisältämät myrkyt eivät aiheuta haittaa ympäristölle.

Raskasmetalleja tai muita myrkkyyjä tai haitallisia aineita sisältävät massat ajetaan normaalisti kaatopaikalle ja käytetään muiden jätteiden peittämiseen. Hyvin korkeiden pitoisuuksien ollessa kyseessä sijoitetaan massat ongelmajätelaitoksen erikoiskaatopaikalle. Ampumaratamassat seulotaan ja haudataan eristettynä ja viemäroitynä.^{/26/}

2.4 Kivihiilivoimalaitoksissa syntyvät jätetuotteet

Helsingin kaupungin energialaitoksen kolmessa hiilivoimalaitosyksikössä syntyy vuosittain yhteensä 50 000 tonnia pohjatuhkaa ja 150 000 tonnia lentotuhkaa. Lentotuhkan määrä pudonnee vuoden 1996 alusta 120 000 tonniin vuodessa, kun käyttöön otetaan Vuosaaren maakaasuvoimalaitos. Rikinhoiston lopputuotetta syntyy vuosittain 32 - 36 000 tonnia. Määrä pysynee jatkossakin samana, mikäli käytetään edelleen Puolalaista hiiltä, jonka rikkipitoisuus on 0,7 %. Vuosaaren voimalaitoksen käyttöönotto ei vaikuta rikinhoistolaitoksella varustettujen voimalaitosten käyttöasteeseen eikä näinollen rikinhoiston lopputuotteen määrään. Sensijaan hiilen rikkipitoisuuden kasvu lisäisi syntyvän rikinhoiston lopputuotteen määrää progressiivisesti.

Pohjatuhkatuotanto käytetään kokonaisuudessaan maanrakennustöissä soraa korvaavana materiaalina. Lentotuhkaa käytetään sementti- ja valmisbetoniteollisuudessa lisääineena, putkikaivantojen täytemateriaalina sekä tienrakennuksessa rakennekerrosmateriaalina. Suurin osa lentotuhkasta sekoitetaan kuitenkin rikinhoistolaitoksen lopputuotteeseen ja ajetaan täyttöalueille. Rikinhoiston lopputuotteelle ei toistaiseksi ole ollut hyötykäyttökohteita.

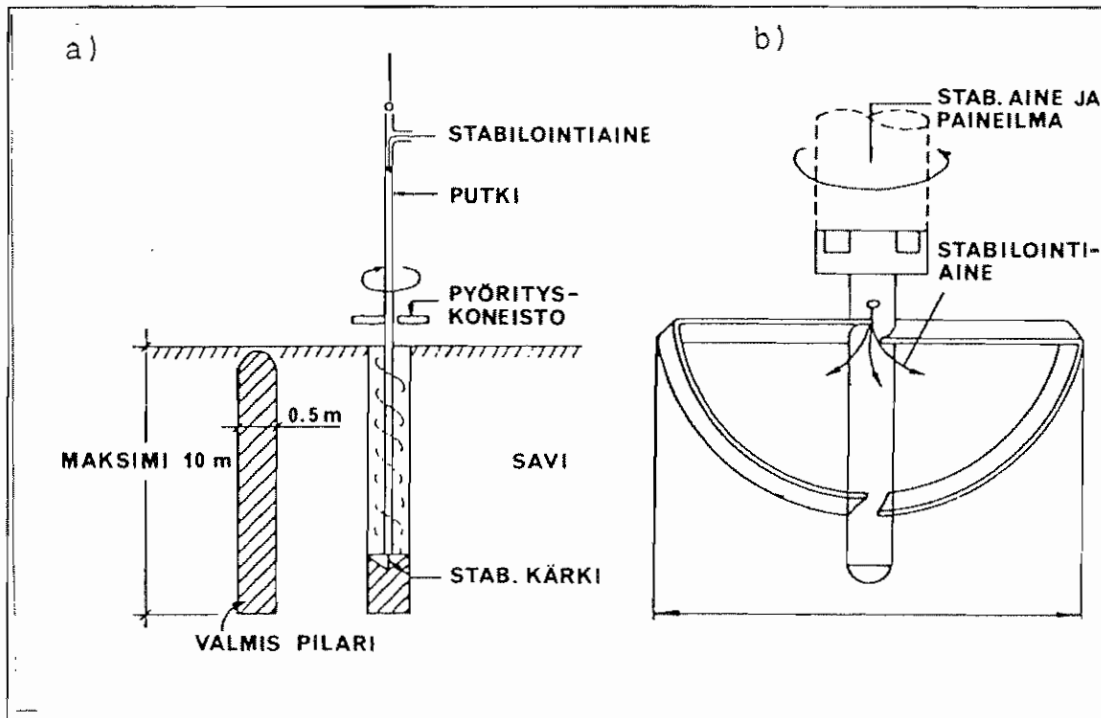
Lento- ja pohjatuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia on selvitetty laajalti mm. Helsingin kaupungin tuhkaprojektissa ^{/10/}. Sen sijaan rikinhoistolaitoksen lopputuotteen hyötykäyttöä on selvitetty erittäin vähän ^{/13/} ja on keskitytty tutkimaan mahdollisimman ongelmattomia loppusijoitusmenetelmiä ^{/33/}

3 MAAN STABILOINTI

3.1 Stabilointimenetelmät

3.1.1 Syvästabilointi

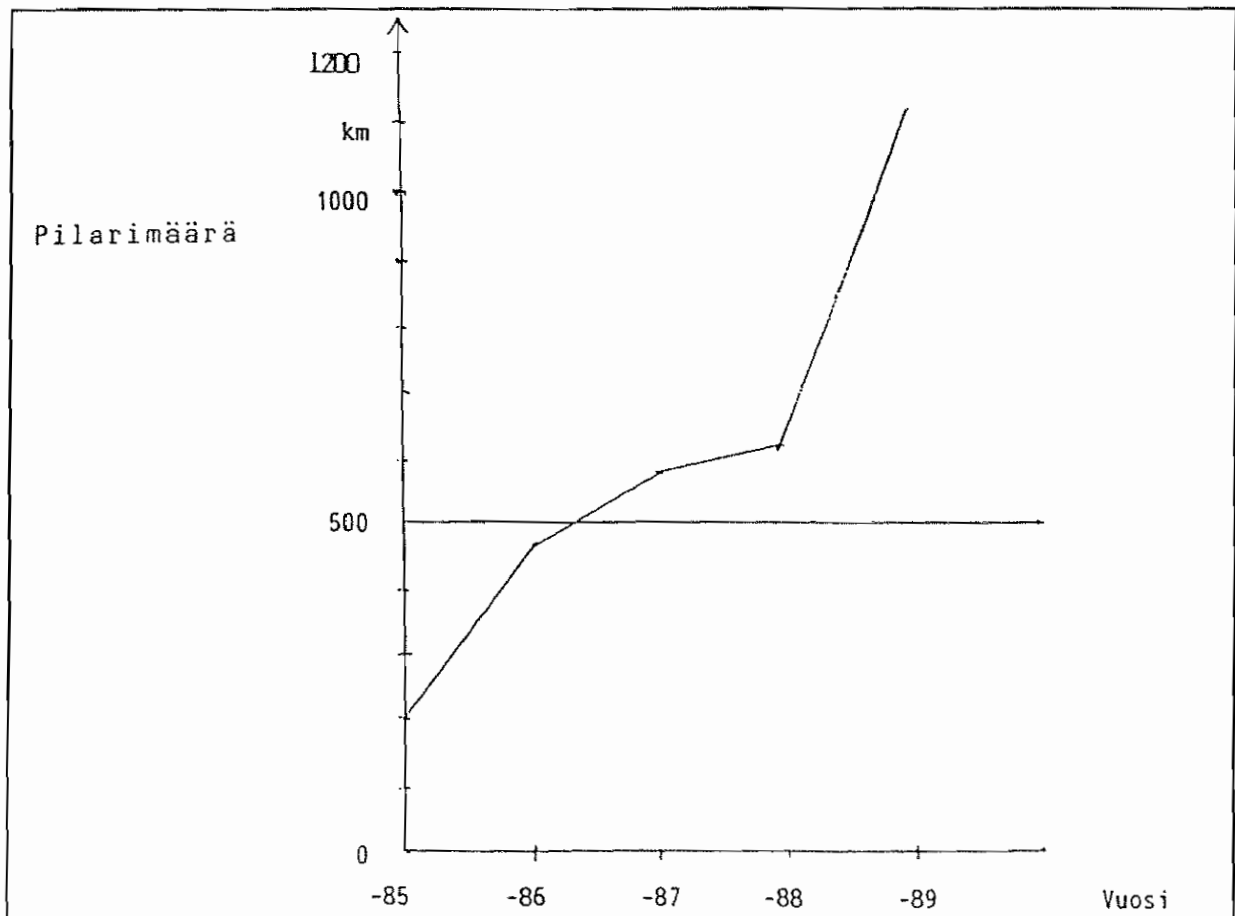
Syvästabiloinnilla tarkoitetaan menetelmää, jossa koheesiomaakerroksen läpi painettua 500 - 800 mm levyistä sekoitinta nostamalla ja pyörittämällä sekoitetaan maakerrokseen sideainetta, joka yhdessä maa-ainesten kanssa lujittuu pilariksi. Syvästabilointilaitteisto on esitetty kuvassa 4. Menetelmä on kehitetty Ruotsissa 1960-luvun lopulla. Käytännön rakennuskohteisiin menetelmä otettiin Ruotsissa vuonna 1975 ja Suomessa pääkaupunki-seudulla vuonna 1976.



Kuva 4. Syvästabilointilaitteisto.

Alussa syvästabilointia käytettiin pehmeiden savikerrostumien kantavuus- ja painumisominaisuuksien parantamiseen tiepenkereiden ja täyttöjen alla. Pilarin halkaisija oli lähes poikkeuksetta 500 mm, ja pilarit olivat pystysuoria. Sideaineena käytettiin yksinomaan poltettua hienoksi jauhettua kalkkia. Menetelmää kutsuttiinkin kalkkipilaroinniksi.

80-luvun puolivälin jälkeen on syvästabilointimenetelmä kehittynyt merkittävästi. Myös menetelmän käyttö on monipuolistunut ja yleistynyt: kun vielä vuonna 1985 tehty pilarimetrimäärä oli vain 200 000 m, tehtiin vuonna 1989 syvästabilointipilareja jo 1 190 000 m. Kuvassa 5 on esitetty syvästabiloinnin määrän kehitys vuosina 1985 - 1989. Yleisin pilarikoko on edelleen ϕ 500 mm, mutta myös ϕ 800 mm:n pilaria käytetään paljon. Sekoitusmenetelmän ja sideaineiden kehittyessä ovat pilarien lujuudet kasvaneet alun 50 - 200 kPa:sta 100 - 300 kPa:iin, suotuisissa olosuhteissa jopa 1000 kPa:iin asti. Pilarijuoksumetriä kohti käytetty sideainemäärä on sensijaan pysynyt 14 - 22 kg:ssa (ϕ 500 mm pilareissa). Sideaineina käytetään poltettua kalkkia, kalkki-sementtiseoksia ja sementtiä. Pilari-pituudet ovat pisimmillään 15 - 20 m ja pilarien kaltevuus enintään 5:1./30/ /31/ /34/



Kuva 5. Syvästabiloinnin määrän kehitys vuosina 1985 - 1989 /30/.

3.1.2 Pintastabilointi

Pintastabiloinnissa stabiloitavan kerroksen päälle levitetty sideaine sekoitetaan kerrokseen erityisellä stabilointiijysimellä (kuva 14), jonka jälkeen kerros tiivistetään. Pintastabilointikalustolla päästään 0,3 - 0,4 m:n käsittelysyvyyteen. Kalustolla voidaan käsitellä kivistä soraa ja tästä hienorakeisempia massoja, joiden maksimiraekoko on # 100 mm.

Vuosittain tehdään Suomessa pintastabilointia 1 - 1,5 milj. m². Suurin osa tästä määrästä on tierakenteen kantavaa kerrosta. Pintastabiloinnilla käsitellään myös piha- ja varastoalueita ym. kenttiä. Mitä laajempi ja muodoltaan selkeämpi stabiloitava alue on - esimerkiksi laaja kenttä tai pitkä tieosuus, sitä edullisempaa on pintastabilointilaitteiston käyttö taloudellisesti. Suurilla tietyömailla päästään normaalisti 15 - 20 000 m² päiväsuoritteeseen.

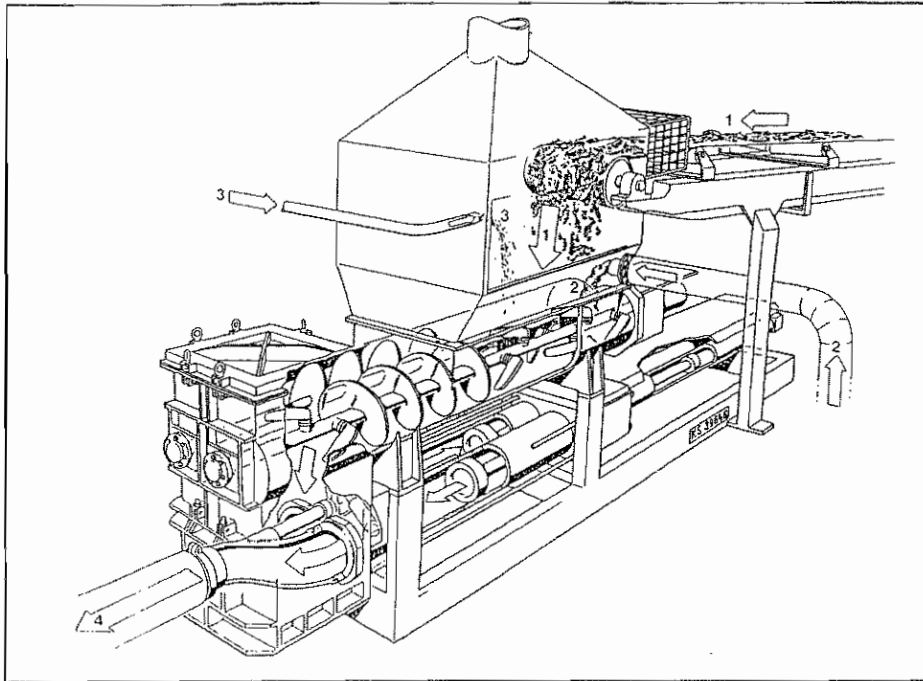
Sideaineena käytetään pintastabiloinnissa bitumia tai sementtiä. Bitumia käytetään pääasiassa vanhoja teitä kunnostettaessa. Uusia teitä rakennettaessa tehdään sidottu kantava kerros yleensä maabetonista pintastabilointina.

3.1.3 Massastabilointi

Massastabiloinnilla tarkoitetaan kaivumassojen, tässä työssä erityisesti saven, geoteknisten ominaisuuksien parantamista sekoittamalla siihen tarkoitukseen sopivaa side- tai muuta lisäainetta.

Massastabilointia on Suomessa käytetty koeluonteisesti lähinnä ruoppausmassojen läjitettävyyden parantamiseen, jolloin sideaine on syötetty normaaliin ruoppausmassapumppuun. Ulkomailla, mm. Saksassa, Ranskassa, Tanskassa, Italiassa ja USA:ssa, käytetään massastabilointilaitteistoja erittäin paljon paitsi ruoppausmassojen myös monenlaisten yhdyskunta- ja teollisuusjätteiden stabilointiin ja siirtämiseen.

Kuvassa 6 on esimerkki jatkuvatoimisesta massastabilointilaitteistosta. Tässä laitteistossa massa tulee sekoittimeen hihnakuljettimella, ja sideaineet pumpataan putkia pitkin. Syöttösiilo on suljettu, joten sideaineiden pölyäminen voidaan hallita. Sekoittuminen tapahtuu aluksi murskaimessa ja jatkuu sitten ruuvikuljettimessa. Sekoittunut massa pumpataan sijoituspaikkaansa.



Kuva 6. Massastabilointilaitteisto.

3.2 Stabilointiaineet ja -reaktiot

3.2.1 Poltettu kalkki

Aivan viime vuosiin asti on syvästabiloinnin sideaineena käytetty yksinomaan poltettua, hienoksi jauhettua kalkkia CaO , ja se on edelleen yleisimmin käytetty syvästabiloinnin sideaine. Myös kalkin ja sementin, kalkin ja kipsin sekä kalkin ja lentotuhkan seoksia on käytetty syvästabiloinnissa.

Poltettu kalkki valmistetaan polttamalla kalkkikiveä yli $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa:



missä ΔH on reaktion tarvitsema lämpömäärä moolia kohti.

Polton jälkeen kalkki on rakeisessa muodossa, josta se jauhetaan käyttötarkoituksen mukaan haluttuun hienousasteeseen. Poltettu kalkki on emäsanhydridi, joka reagoi voimakkaasti veden kanssa. Sen tiheys on $0,9 - 1,2 \text{ t/m}^3$.

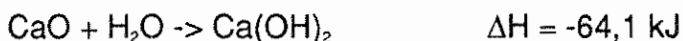
Stabilointiin käytettävän kalkin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat:

- aktiivinen CaO -pitoisuus,
- vesiliukoisuus,
- sammumisnopeus,
- juoksevuus ja
- raekoko.

Poltettuna kalkkina myytävän tuotteen kalsium voi olla oksidi-, hydroksidi-, karbonaatti- tai silikaattimuodossa. Vain oksidi- (CaO) ja hydroksidi- (Ca[OH]₂) -muodossa oleva kalkki osallistuu stabilointireaktioihin. Näiden yhdisteiden pitoisuutta kutsutaan kalkin aktiiviseksi CaO-pitoisuudeksi (SFS 5188).

Vesiliukoisuudella tarkoitetaan veteen liunneen kalkin maksimipitoisuutta. Sammumisnopeus kuvaa kalkin reaktiivisuutta. Nämä riippuvat kalkin hienousasteesta. Juoksevuudella tarkoitetaan tietyn seulakoon läpäissyttä kalkkimäärää painoprosentteina standarditärytystestissä. Rakeisuudeltaan tulee kalkin läpäistä # 0,1 mm seula.^{/31/}

Poltettu kalkki alkaa saveen sekoitettuna reagoida välittömästi ja voimakkaasti savessa olevan veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia ^{/31/}:



Reaktioyhtälön mukaan 56 g CaO:a sitoo 18 g vettä. Lisäksi, koska kalkin sammuminen on voimakkaasti lämpöä vapauttava reaktio, pienenee saven vesipitoisuus myös veden haihtumisen vuoksi ja koko massan vesipitoisuus kuiva-aineen lisäyksen seurauksena.

Kalkin sammumisen seurauksena kasvaa huokosveden elektrolyyttipitoisuus, ja savimineraalien pintaan adsorboituneita maa-alkali-ioneita korvautuu kalsiumhydroksidista dissosioituneilla Ca²⁺-ioneilla lyotrooppisen sarjan Na⁺ < K⁺ < Ca²⁺ < Mg²⁺ mukaisesti siten, että sarjan oikeanpuoleinen kationi syrjäyttää vasemmanpuoleisen ja kaksiarvoinen kationi yksiarvoisen. Huokosveden elektrolyyttipitoisuuden kasvu ja ioninvaihtoreaktiot aiheuttavat savipartikkelien koaguloitumisen suuremmiksi, vettä läpäisemättömiksi ryhmittymiksi eli aggregaateiksi, jolloin massan rakeisuus muuttuu karkeammaksi ja sen vedenläpäisevyys kasvaa.

Kalkin sammuminen ja ioninvaihtoreaktiot alkavat välittömästi sideaineen lisäämisen jälkeen ja kestävät 4 - 8 h. Ioninvaihtoreaktioiden kanssa samanaikaisesti alkavat pitkäaikaiset kalsiumin ja saven alumiini- ja piiyhdisteiden väliset potsolaanireaktiot. Kalkin lisäyksen johdosta kohoaa saven pH, jolloin saven sisältämien alumiini- ja piiyhdisteiden liukoisuus kasvaa voimakkaasti. Kalkki muodostaa näiden kanssa veteen liukenemattoman silikaattigeelin, joka kiteytyessään sitoo savipartikkelit kiinni toisiinsa.^{/31/}

Kalsiumhydroksidi voi reagoida ilman hiilidioksidin kanssa muodostaen niukkaliukoista kalsiumbikarbonaattia. Tällöin vapaiden kalkki-ionien pitoisuus pienenee, ja lujittumisreaktiot vähenevät tai loppuvat.^{/34/}

Kalsiumhydroksidin muodostuminen eli kalkin sammuminen vaatii saven vesipitoisuudesta riippuen noin 3 % kalkkia saven kuivatilavuuspainosta. Ioninvaihto- ja potsolaanireaktioiden käynnistyminen edellyttää, että massan kalkkipitoisuus on 2 - 3 % saven kuivapainosta. lisäksi tarvitaan kalkkia humushappojen neutralointiin.^{/23/} Korkea lämpötila ja pH (vähintään 8) nopeuttavat reaktioita. Normaalisti kalkkistabiloidun maan pH on noin 12.^{/34/}

Kalsium ja kalsiumsulfaatti muodostavat saven aluminaattien kanssa myös ettringiittiä ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$) sitoen merkittävästi vettä. Ettringiitti kiteytyy neulasmaiseksi rakenteeksi savipartikkelien väliin ja parantaa saven lujuutta. Ettringiitin pysyvyys edellyttää, että massan pH on vähintään 10.^{/34/}

3.2.2 Sementti

Sementtiä on käytetty yleisesti pintastabiloinnin sideaineena rakennettaessa esimerkiksi tien kantava kerros sidottuna maabetonista. Viime vuosina on sementin käyttö alkanut yleistyä myös syvästabiloinnissa joko käytettynä yksinään tai kalkki-sementtiseoksena, koska sementillä on todettu olevan edullinen vaikutus kalkilla huonosti lujittuvia maalajeja stabiloitaessa. Tällaisia maalajeja ovat esimerkiksi Litorina-meren sedimentit, joille on ominaista korkea humus- ja vesipitoisuus sekä suuri rikkiyhdisteiden määrä ^{/31/}.

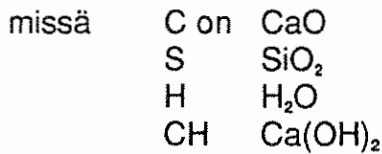
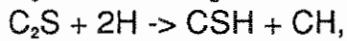
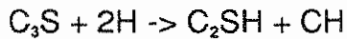
Sementti koostuu pääasiassa kalsiumoksidista (CaO , 58 - 67 %) ja piioksidista (SiO_2 , 16 - 26 %) sekä pienemmässä määrin alumiinitrioksidista (Al_2O_3 , 4 - 10 %) ja rautaoksidista (Fe_2O_3 , 2 - 5 %). Sementin tiheys on 1,2 t/m³.

Mineralogiselta koostumukseltaan sementtiklinkkeri on:

- trikalsiumsilikaattia $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- dikalsiumsilikaattia $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- trikalsiumaluminaattia $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
- tetrakalsiumaluminaattiferriittiä $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Sementtistabiloinnissa on käytetty toistaiseksi yleis- tai Portland-sementtiä.^{/31/}

Saven ja sementin sekoituksessa sementtihiukkaset verhoavat savi-partikkeliryhmiä, ja rakenteesta muodostuu kennomainen. Reagoidessaan veden kanssa sementti muodostaa veteen liukenemattoman geelin, joka koostuu mono- ja dikalsiumsilikaattihydraateista sekä aluminaateista /12/.



Sementin hydrataation aikana vapautuu kalkkia, joka muuttaa kalkki-stabiloinnin tavoin kennon sisäistä rakennetta:

- hydratoituneet kalsiumionit aiheuttavat savipartikkelien koaguloitumisen ja
- huokosveden pH:n kohoamisen seurauksena savimineraaleista liuenneet silikaatti- ja alumiiniyhdisteet reagoivat kalsiumionien kanssa muodostaen sementoivaa ainetta saviaggregaattien pinnalle./31/

3.2.3 Kivihiilivoimalaitoksen rikinpoiston lopputuote

Tutkimuksessa käytettiin Helsingin kaupungin energialaitoksen Salmisaaren kivihiilivoimalan tuottamaa rikinpoiston lopputuotetta. Salmisaaren rikinpoistolaitos käyttää puolikuivaa rikinpoistomenetelmää, jossa kalkkiliete ruiskutetaan savukaasuihin pieninä pisaroina. Lietteessä oleva vesi haihtuu ja savukaasuissa oleva SO₂ reagoi alkalisen kalkin kanssa. Lopputuote erotetaan savukaasuista pölynerottimella.

Rikinpoiston lopputuote on kuiva, jauhemainen aine, joka sisältää pääasiassa lentotuhkaa, kalsiumsulfaattia, kalsiumsulfiittia ja kalsiumkloridia sekä reagoimatonta kalkkia kalsiumhydroksidin muodossa. Kun hiilessä on saapumistilanteessa 1,5 % rikkiä, 20 % tuhkaa, 9 % vettä, 75 ppm fluoria sekä 0,42 ppm klooria ja hiilen lämpöarvo on 23,0 MJ/kg, on rikinpoistojätteen keskimääräinen koostumus seuraava /6/:

- kalsiumsulfiittia (kipsiä) CaSO ₃ *½H ₂ O	54,2 p-%
- kalsiumsulfaattia CaSO ₄ *2H ₂ O	8,0 p-%
- kalsiumkloridia CaCl ₂ *4H ₂ O	11,4 p-%
- kalsiumkarbonaattia CaCO ₃	2,6 p-%
- kalsiumhydroksidia Ca(OH) ₂	23,2 p-%
- lentotuhkaa	0,5 p-%

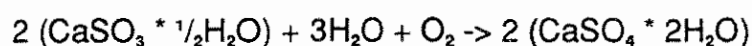
Rikinkoiston lopputuotteen koostumus riippuu poltettavan hiilen koostumuksesta, poltto- ja rikinkoistoprosessien säädöistä sekä kalkin tarjonnasta. Koostumus voi vaihdella erittäin paljon erästä toiseen. Tämän vuoksi lopputuotteen suunnitelmallinen käyttö edellyttää tuotteen jatkuvaa laadunvalvontaa ja sen koostumuksen seuraamista.

Södertäljen Igelstaverketin voimalan rikinkoistojätteestä analysoitiin raskasmetallipitoisuudet huhtikuussa 1985 ja maaliskuussa 1986 seuraavin tuloksin /8/:

	huhtikuu 85	maaliskuu 86
	[mg / kg]	[mg / kg]
arseeni (As)	25	-
bariumia (Ba)	102	43
elohopeaa (Hg)	1,4	0,08
kadmiumia (Cd)	0,3	0,2
kobolttia (Co)	<10	2
kromia (Cr)	88	9
kuparia (Cu)	88	19
lyijyä (Pb)	130	15
molybdeeniä (Mo)	20	<1
nikkeliä (Ni)	46	10
seleenä (Se)	0,6	1,8
sinkkiä (Zn)	57	1
strontiumia (Sr)	221	150
tinaa (Sn)	<100	<2
vanadiinia (V)	23	17
volframia (W)	94	3

Rikinkoiston lopputuote osallistuu kalkin tavoin ioninvaihtoreaktioihin luovuttamalla Ca^{+} -ioneita, kun maan pH-arvo nousee kalkin vaikutuksesta.

Kalsiumsulfiiitti $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ eli hemihydraattikiipsi muodostaa pääosan puolikuivan rikinkoistoprosessin lopputuotteesta. Se hapettuu kosteuden vaikutuksesta kalsiumsulfaatiksi /16/:



Osa hemihydraatista muodostaa saviaineksen kanssa todennäköisesti sulfoaluminaatteja tai -silikaatteja, joilla on massaa lujittava vaikutus /25/.

Kalsiumsulfaatti $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ reagoi veden ja saven aluminaattien kanssa muodostaen ettringiittiä $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, jonka neulasmainen kidemuoto antaa savelle fyysistä stabiilisuutta ja joka sitoo merkittävän määrän vettä.

3.2.4 Kivihiilivoimalaitoksen lentotuhka

Helsingin voimalaitoksissa poltettava kivihiili on tyypiltään bituminiittiä, joka sisältää 75 - 93 % hiiltä. Loppu on sivukiveä ja muita mineraaleja sekä maatumisasteeltaan vielä tunnistettavia kasvinjäänöksiä. Polttolämpötilassa (1500 ± 200 °C) mineraalit sulavat, ja niissä tapahtuu fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia. Tuhkapartikkelit koostuvat suurimmaksi osaksi lasittuneista mineraaleista muun osan ollessa huokoista, kiteistä ainesta. Pääainesosina lentotuhkassa ovat piioksidi, alumiinioksidi ja rautaoksidi. Lisäksi mukana on pienempiä määriä kalsium- ja magnesiumoksidia, rikkiatrioksidia sekä muita yhdisteitä. Tuhkan ominaisuuksiin vaikuttavat oleellisesti kivihiilityyppi, polttotekniikka ja tulipesän kunto. Samankin laitoksen tuottaman lentotuhkan laatu saattaa vaihdella suuresti lyhyen ajan sisällä. Vuosina 1978 - 1981 on Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhkan kemiallisissa ominaisuuksissa havaittu seuraavat vaihteluvälit:

SiO_2	41,9 - 50,2 %
Al_2O_3	16,6 - 22,6 %
TiO_2	0,8 - 1,3 %
Fe_2O_3	10,0 - 13,6 %
CaO	6,7 - 9,4 %
MgO	4,3 - 5,9 %
Na_2O	0,8 - 1,1 %
K_2O	1,7 - 2,3 %
P_2O_5	0,2 - 0,4 %
SO_3	0,4 - 1,5 %.

Lentotuhka on potsolaaninen materiaali, eli se reagoi kemiallisesti kalkin kanssa veden läsnäollessa ja riittävässä lämpötilassa./10/ Tutkimuksessa käytetty lentotuhka oli peräisin Helsingin kaupungin energialaitoksen Salmisaaren kivihiilivoimalaitoksesta.

3.2.5 Lannoiteteollisuuden jätekipsi

Lannoiteteollisuuden jätkeksiä on käytetty koeluontoisesti ja erittäin rohkaisevin tuloksin humuspitoisen saven syvästabilointiin yhdessä kalkin kanssa /9/. Kokeissa käytetty jätkekipsi oli Kemiran Uudenkaupungin tehtailta.

Lannoiteteollisuuden jätkekipissä kipsi on dihydraattimuodossa: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dihydraattikipsi reagoi veden ja saven aluminaatien kanssa, kuten rikinpoiston lopputuotteen tapauksessakin muodostaen ettringiittiä $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, jonka neulasmainen kidemuoto antaa savelle fyysistä stabiilisuutta ja joka sitoo merkittävän määrän vettä.

3.2.6 Terästeollisuuden masuunikuona

Hienoksi jauhettu masuunikuona otettiin kokeiluun mukaan toisaalta potsolaanisten ominaisuuksiensa vuoksi ja toisaalta aikaisemmissa selvityksissä havaitun haitallisia aineita sitovan vaikutuksensa vuoksi.

Kokeissa käytetty masuunikuona oli peräisin Raahesta. Masuunikuonan kemiallinen koostumus on seuraava:

CaO	37,3 %
MgO	11,8 %
SiO ₂	36,6 %
Al ₂ O ₃	8,1 %
K ₂ O	0,7 %
Mn	0,4 %
P	0,0 %
S _{tot}	1,3 %
Fe _{tot}	0,3 %
Zn	0,0 %

Masuunikuonan stabiloiva vaikutus perustuu:

- hydratoituvien kalsiumionien aiheuttamaan savipartikkelien koaguloitumiseen ja
- silikaatti- ja alumiiniyhdisteiden kalsiumionien kanssa muodostamaan, sementoivaan geeliin.

* Kokeissa käytetyn kuonajauheen hienousluku oli 400.

4 LABORATORIOKOKKEET

4.1 Valmistelevat stabiloitumiskokeet laboratoriossa

4.1.1 Valitut seossuhteet

Lähtökohtana oli saven geoteknisten ominaisuuksien parantaminen siten, että se saadaan mahdollisimman pienin kustannuksin helposti läjitettävään mutta myöhemminkin kaivu- ja paalutuskelpoiseen muotoon. Tavoiteleikkauslujuudeksi asetettiin 50 kPa. Stabiloitumiskokeet jaettiin kolmeen vaiheeseen: valmisteleviin ja täydentäviin laboratorioskokeisiin sekä maastokokeisiin. Valmistelevissa laboratorioskokeissa testattiin mahdollisimman monia sideaineita ja -yhdistelmiä ja näistä valittiin käyttökelpoisimmat seuraavaan vaiheeseen. Täydentävissä laboratorioskokeissa tutkittiin valittujen sideaineiden pitoisuuksien vaikutusta stabiloituvuuteen. Maastokokeissa seurattiin stabiloituvan massan käyttäytymistä in situ- olosuhteissa.

Sideaineet valmistelevia laboratorioskokeita varten valittiin toisaalta aikaisempien selvitysten perusteella ja toisaalta taloudelliset näkökohdat huomioon ottaen. Kaupallisten sideaineiden eli kalkin ja sementin osuus pidettiin kustannussyistä pienenä. Rikinpoiston lopputuotteen pitoisuudelle pyrittiin haarukoimaan käyttökelpoinen optimipitoisuus. Käytetyt seossuhteet on esitetty taulukossa 1. Pitoisuudet on laskettu suhteena saven kuivapainoon.

Taulukko 1. Valmistelevissa laboratorioskokeissa käytetyt sideainepitoisuudet suhteessa saven kuivapainoon (RPL = rikinpoiston lopputuote, L-tuhka = lentotuhka).

		L-tuhka		RPL		Jätekipsi
		30%	20%	30%	20% 15%	
RPL	20%		X			
	10%		X			
Jätekipsi	20%		X			
	10%		X			
Sementti	7%				X X	
	4%			X		X
	2%	X		X		X
Kalkki	7%				X X	
	4%			X		X
	2%	X		X		
Masuunikuona	7%				X X	

4.1.2 Kokeissa käytetty savi

Stabiloitava savi oli peräisin Helsingin Tattarisuolta. Sen tilavuuspainoksi oli laboratoriossa määritetty 14 kN/m^3 , vesipitoisuudeksi 110 %, mikä on varsin korkea arvo helsinkiläiselle savelle, ja humuspitoisuudeksi 1,6 %. Saven juoksurajaksi määritettiin 84,0 % ja kieritysrajaksi 28,2 %, jolloin saven plastisuusluvuksi tulee 55,8. Saven SO_4 -pitoisuudeksi mitattiin 0,093 %. Tattarisuon saven siipikairalla mitattu häiriintymätön leikkauslujuus on 5 - 9 kPa.

VTT:n rakennusmateriaalilaboratoriossa tutkittiin saven mineraalikoostumus Philips ADP 1700 röntgendiffraktiometrillä käyttäen $\text{CuK}\alpha$ -säteilyä, 50 kV jännitettä ja 20 mA virtaa. Tarkoituksena oli selvittää, löytyykö savesta jokin dominoiva mineraali, jonka vaikutus kannattaa ottaa huomioon sideaineita valittaessa. Näyte kuivattiin lämpökaapissa 105°C :ssa ja jauhettiin hienoksi pulveriksi ennen diffraktiogrammin ajamista.

Diffraktogrammin mukaan näytesaven mineraalikoostumus oli tyypillinen lihavalle savelle, jossa saviaineksen osuus on yli 50 p-%. Mineraalien pitoisuuksien määrällinen arvionti voidaan tehdä vain suuntaa antavasti käyttäen hyväksi myös aikaisemmin tehtyjä saven diffraktioajoja. Eniten näyte sisälsi kvartsia, maasälpämineraaleja sekä smektiittiryhmän mineraaleja - ilmeisesti illiittiä tai montmorilloniittia - noin 20 p-% kutakin. Lisäksi näyte sisälsi kloriitti-, amfiboli- ja kiilleryhmän mineraaleja noin 10 p-% kutakin. Näytteen kalsiittipitoisuus oli 3-4 p-% ja orgaanisen aineksen määrä 2-3 p-%. Erityisen dominoivaa mineraalia ei tässä savessa siis ollut.

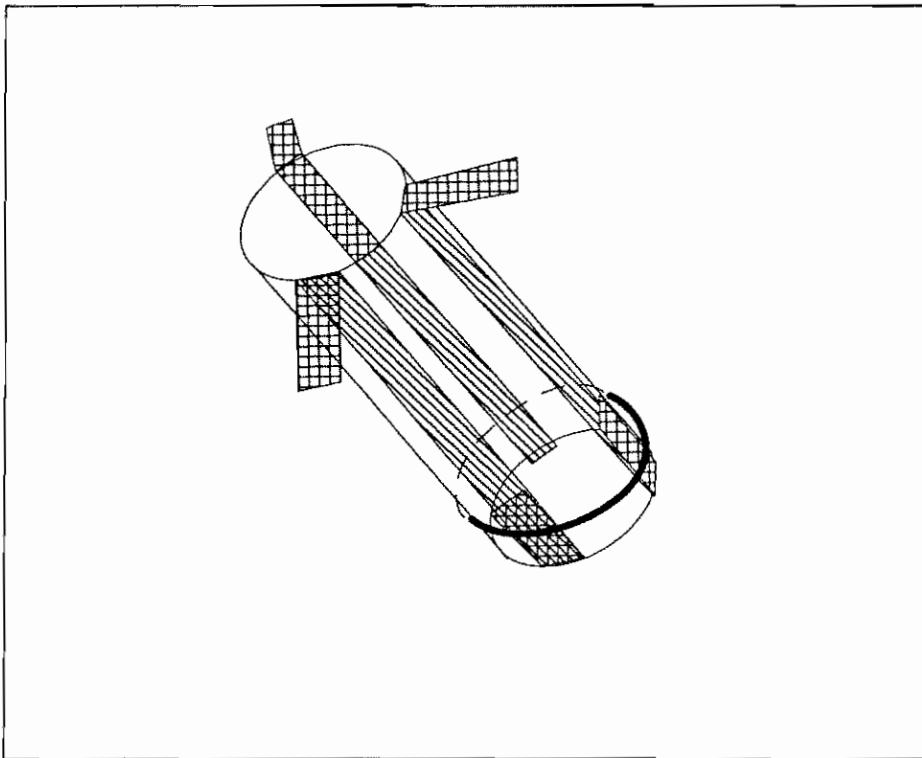
VTT:n kemian laboratoriossa määritettiin näytesaven pH:ksi 7,6. Saven kokonaisrikkipitoisuudeksi määritettiin 0,52 % käyttäen hiili-rikkianalysaattoria CS-044.

VTT:n metallurgian laboratoriossa määritettiin näytesaven redox-potentiaali savisuspensiosta GWB Knick Portamess 752 -mittarilla, redox-elektrodilla Orion 83436. Redox-potentiaalin arvoksi saatiin 25°C lämpötilassa $-140 \text{ mV}_{\text{AgAgCl}}$. Koska potentiaalia ei pystytty mittaamaan suoraan savi-näytteestä, on tulos suuntaa antava.

4.1.3 Koemenettely

Valmistelevat stabiloituvuuskokeet tehtiin VTT:n Geotekniikan laboratoriossa Otaniemessä. Näyteputkina käytettiin ST-2 -putkia, joiden halkaisija oli 50 mm ja korkeus 170 mm. Putket numeroitiin ja varustettiin kuvan 7 mukaisesti suodatinkangassuikaleilla, jotta huokosveden yli- tai alipaine pääsisi tasaantumaan. Näytesavi homogenisoitiin sekoittamalla se isossa kaukalossa.

Savi ja sideaineet punnittiin sekoitusastiaan 1 g:n tarkkuudella. Näytteen sekoittaminen tapahtui Hobart -laboratoriosekoittimessa taikinakoukulla. Sekoitusaika oli kaikilla näytteillä 2 min.



Kuva 7. Stabiloituvuuskokeen näyteputki.

Kukin sekoitettu näyte sullottiin kolmeen näyteputkeen viitenä kerroksena. Koska lujittumistulokseen vaikuttaa oleellisesti massan tiiviys, pyrittiin näytteet sullomaan samaan tiiveyteen. Näytteiden tilavuuspainotavoitteena oli $14,5 \text{ kN/m}^3 \pm 5 \%$. Tiiviyttä seurattiin punnitsemalla näyteputket sullomisen jälkeen ja epäonnistuneet näytteet sullottiin uudelleen. Putket puristettiin näytteen laajentumisen estäviin kasetteihin.

Näytteitä säilytettiin vedessä +20 °C lämpötilassa. Näytteiden lämpökäsittely jätettiin tekemättä käsittelyn pituutta ja käytettäviä lämpötiloja koskevien näkemyserojen ja erilaisten käytäntöjen vuoksi. Korkeampi reaktiolämpötila nostaa stabiloidun saven lujuutta, joten ilman lämpökäsittelyä jää voimakkaasti lämpöä vapauttavilla sideaineilla (esimerkiksi poltettu kalkki) saavutettava lujittuminen enemmän kenttäolosuhteissa saavutettavaa heikommaksi kuin viileämmin reagoivilla sideaineilla (esimerkiksi sementti). Lämpökäsittelyn merkitys olisi kuitenkin ollut melko pieni näytteiden lyhyen lujittumisajan vuoksi (7 tai 14 vrk). Lisäksi, koska seosten kalkki- ja sementtipitoisuudet olivat kuitenkin melko alhaisia, voidaan saatuja tuloksia pitää keskenään vertailukelpoisina.

Jokaisesta seoksesta koestettiin 14 vrk:n ikäisenä kaksi 100 mm:n korkuista koekappaletta. Useimmista seoksista koestettiin lisäksi 7 vrk:n ikäiset koekappaleet. Koestus tapahtui yksiaksiaalisena puristuskokeena vakiomuodonmuutosnopeudella 1 mm/min.

4.1.4 Tulokset

Taulukossa 2 on esitetty seosten puristuslujuudet. Koekappaleita puristettiin 2 kpl kustakin seoksesta. Taulukkoon on laskettu näiden havaintojen keskiarvo.

Parhaat puristuslujuudet saavutettiin 7 % sementti- tai kalkkipitoisuudella ja 15 - 20% rikinpoiston lopputuotepitoisuudella. Masuunikuona ei toiminut kalkin tai sementin veroisella tavalla.

Lannoiteteollisuuden jätekipsi päätettiin jättää pois täydentävistä kokeista siksi, että kuljetuskustannuksiensa vastapainoksi se ei tarjonnut selvästi parempia lujittumistuloksia verrattuna rikinpoiston lopputuotteeseen, jonka saatavuus Helsingissä on oleellisesti parempi.

Taulukko 2. Yksiaksiaalisella puristuskokeella, vakiomuodonmuutosnopeudella 1 mm/min mitatut koekappaleiden 14 vrk:n (7 vrk:n) puristuslujuudet [kPa] (RPL = rikinpoiston lopputuote, L-tuhka = lentotuhka).

		L-tuhka 30%	20%	30%	RPL 20%	15%	Jätekipsi 30%
RPL	20%		6				
	10%		6 (4)				
Jätekipsi	20%		4				
	10%		4				
Sementti	7%				110 (62)	117	
	4%			39 (31)			45 (49)
	2%	15		13			14
Kalkki	7%				120 (89)	114	
	4%			64 (86)			91
	2%	28		175			
Masuunikuona	7%				19 (13)	61	

Kivihiilivoimalan lentotuhkalla oli selkeästi positiivinen vaikutus lujittumistulokseen. Lentotuhkalle on kuitenkin jo olemassa hyötykäyttökohteita, ja sen hyödyntämismahdollisuuksia tutkitaan jatkuvasti, joten koekappalemäärän rajoittamiseksi lentotuhka jätettiin pois täydentävistä kokeista. Rikinpoiston lopputuote haluttiin pitää mukana tutkimuksessa, koska sille ei ole ollut lainkaan hyötykäyttökohteita. Mahdollisten jatkotutkimusten yhteydessä kannattanee kuitenkin harkita uudelleen myös lentotuhkan sisällyttäminen koeohjelmaan.

4.2 Täydentävät stabiloitumiskokeet laboratoriossa

Täydentävät laboratoriokokeet tehtiin Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geoteknisen osaston laboratoriossa. Täydentävissä kokeissa verrattiin neljän ja seitsemän prosentin sementtipitoisuudella saavutettuja lujuuksia neljän prosentin kalkkipitoisuudella saavutettuihin, kun rikinpoiston lopputuotteen pitoisuus oli 0, 15 tai 30 %. Tarkoituksena oli selvittää rikinpoiston lopputuotteen pitoisuuden vaikutusta lujittumistulokseen.

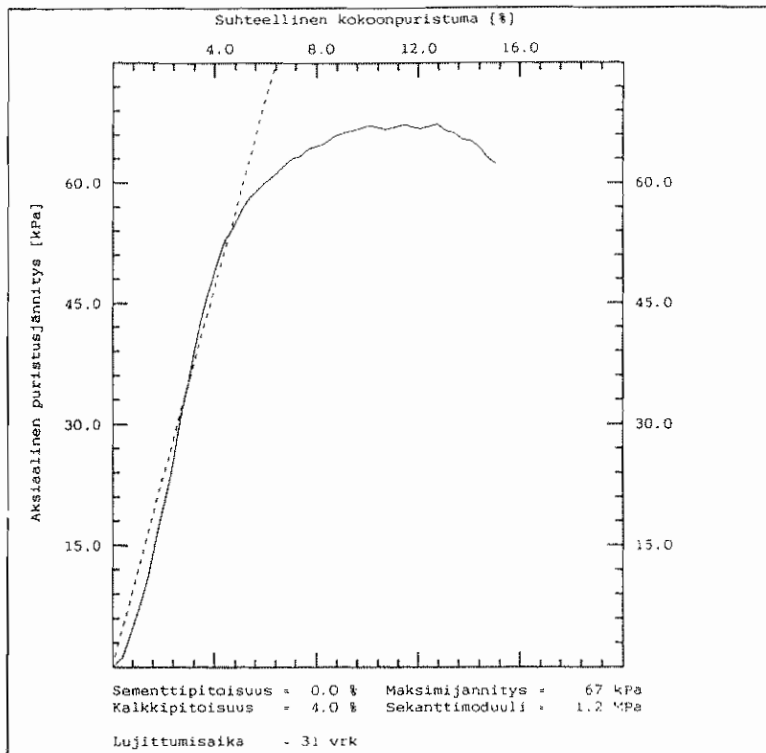
Näytteet ja koekappaleet valmistettiin samalla tavoin kuin aiemmissa kokeissa. Koekappaleet puristettiin 17 ja 30 vrk:n iässä. Jokaisesta näytteestä kuormitettiin vähintään kaksi koekappaletta. Lisäksi kokeiltiin, onko lujuuskehityksen kannalta merkityksellistä, puristetaanko koekappaleet vesisäilytyksen aikana näytteen laajenemisen estäviin kasetteihin vai ei. Puristuskokeen tuloksista laskettiin keskimääräinen puristuslujuus kullekin seokselle. Tulokset on esitetty taulukossa 3. Kuvassa 8 on esimerkki puristuskokeen tulosteesta.

Taulukko 3. Täydentävien laboratoriokokeiden tulokset: Yksiaksiaalisella puristuskokeella, vakionmuodonmuutosnopeudella 1 mm/min mitatut koekappaleiden 30 vrk:n (17 vrk:n) puristuslujuudet [kPa].

		Rikinpoiston 0%	lopputuote	
			15%	30%
Sementti	7%	95 (105)	89 (78)	72 (71)
	4%	41 (38)	28 (24)	26 (23)
Kalkki (Kasetissa)	4%	15 (13)	40 (32)	68 (56)
	4%			64 (60)

Paras lujittuminen saavutettiin 7 % sementtipitoisuudella ilman rikinpoiston lopputuotetta. Sementtipitoisuuden pienentäminen ja rikinpoiston lopputuotepitoisuuden kasvattaminen pienensivät puristuslujuutta sementti - rikinpoiston lopputuoteseoksissa - toisin sanoen rikinpoiston lopputuotteen käyttäminen sementtistabiloinnissa heikentää stabilointitulosta.

Rikinpoiston lopputuotteen käyttäminen kalkkistabiloinnissa parantaa stabilointitulosta selkeästi: 4 % kalkkipitoisuudella parani puristuslujuus 4,5-kertaiseksi, kun rikinpoiston lopputuotepitoisuus kasvoi nolasta 30 %:iin. Optimaalinen rikinpoiston lopputuotepitoisuus on puristuslujuuden kannalta yli 30 % saven kuivapainosta, kun seoksen kalkkipitoisuus on 4 %.



Kuva 8. Esimerkki puristuskokeen tulosteesta.

Saavutetut lujuudet jäivät systemaattisesti alle valmistelemissä stabiloituvuuskokeissa mitattujen lujuuksien. Todennäköisin syy tähän on ero näytteiden tiivistyksessä. Massan lujuuskehitykseen vaikuttaa oleellisesti sen tiiviys. Mikäli koesarjojen näytteet on tiivistetty erilaisella kalustolla tai sarjojen välillä on kulunut pitkä aika, on tulosten vertailuun suhtauduttava suurella varauksella. Tästä syystä on pyrittävä saamaan samaan koesarjaan kaikki tutkittava materiaali.

Selvää vaikutusta puristuslujuuteen ei ollut sillä, estettiinkö näytteiden laajentuminen säilyttämisen aikana vai ei.

4.3 Stabiloidun massan ominaisuuksien tutkimukset laboratoriossa

Luvussa 5 on selostettu tutkimuksen yhteydessä tehdyt maastokokeet Tattarisuolla ja Herttoniemessä. Tattarisuolla stabiloiduista massoista tutkittiin laboratoriossa painumaominaisuudet ja vedenläpäisevyys, routivuus sekä kelpoisuus kasvien kasvualustaksi. Taulukossa 4 on esitetty Tattarisuon koemassoissa käytetyt sideaineseokset.

Taulukko 4. Tattarisuon koemassojen sideaineseokset (% saven kuivapainosta, RPL=rikinpoiston lopputuote, MaKu= masuunikuona).

Massa nro	RPL	Kalkkia	Sementtiä	MaKu
3	30	-	7	-
4	15	4	-	-
6	15	7	-	-
7	30	7	-	3
8	30	4	-	-

4.3.1 Stabiloidun massan painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuudet

Tattarisuon koemassojen painumakäyttäytymistä ja vedenläpäisevyyttä tutkittiin laboratoriossa ödometrikokein. Kokeita tehtiin portaittaisina, jatkuvakuormitteisina CRS-kokeina sekä Rowen sellillä. Jatkuvakuormitteiset ja portaittaiset kokeet tehtiin kaikista massoista siten, että massoista valmistettiin sekä tiivis että löyhä näyte. Näytteiden tilavuuspainot on esitetty taulukossa 5. Rowen sellillä tutkittiin lisäksi massat 4 ja 8.

Portaittaisissa ödometrikokeissa oli massojen 3 ja 8 näytteiden alkukorkeus $h_0 = 2,0$ cm ja poikkipinta-ala $A_0 = 20,0$ cm². Massoilla 4,6 ja 7 oli näytteiden alkukorkeus $h_0 = 4,79$ cm ja poikkipinta-ala $A_0 = 51,5$ cm². Näytteiden kuormitus kaksinkertaistettiin vuorokauden välein alkaen massojen 3 ja 8 näytteillä tasolta 25 kPa ja massojen 4, 6 ja 7 näytteillä tasolta 43,5 kPa. Jatkuvakuormitteisissa kokeissa oli näytteiden alkukorkeus $h_0 = 2,0$ cm ja poikkipinta-ala $A_0 = 44$ cm² ja vakimuodonmuutosnopeus $\epsilon_1 = 1$ %/h eli 0,0042 mm/min.

Portaittaisen ödometrikokeen tuloksista määritettiin tiivistetyille näytteille moduuliluku ja jännityseksponentti. Moduuliluku vaihteli välillä 30 - 50 keskiarvon ollessa 40,2 ja keskihajonnan 7,1. Jännityseksponentin arvo vaihteli välillä 0,38 - 0,51 keskiarvon ollessa 0,46 keskihajonnan 0,06.

Jatkuvakuormitteisella ödometrillä määritetyt moduuliluvut vaihtelivat tiivistetyillä näytteillä välillä 26 - 62 keskiarvon ollessa 38 (keskihajonta 14,4) ja löyhillä näytteillä välillä 21 - 26 keskiarvon ollessa 23 (keskihajonta 2,2). Luonnontilaisen Tattarisuon saven moduuliluvuksi on jatkuvakuormitteisella ödometrillä määritetty CRS-kokeessa 6,6 - 15,4 /11/. Normaalikonsolidoituneen siltin moduuliluku vaihtelee välillä 20 - 140 /28/.

Jatkuvakuormitteisella kokeella määritetyt tiivistettyjen näytteiden jännityseksponentin arvot vaihtelivat välillä 0,35 - 0,58 keskiarvon ollessa 0,46 ja keskihajonnan 0,09. Löyhillä näytteillä vaihteli jännityseksponentti välillä 0,35 - 0,67 keskiarvon ollessa 0,54 ja keskihajonnan 0,14. Luonnontilaisen Tattarisuon saven jännityseksponentti vaihtelee välillä -0,148 ... -1,902 /11/. Normaalikonsolidoituneen siltin jännityseksponentti vaihtelee välillä 0 ... 0,5/28/.

Sekä löyhien että tiivistettyjen näytteiden moduuliluvun ja jännityseksponentin arvot vastaavat normaaleja siltin arvoja. Ödometrikokeiden tuloksista jätettiin huomiotta ne, joissa näytteen kyllästymisaste on jäänyt alle 85 %:n. Ödometrikokeiden tulokset on esitetty taulukossa 5.

Portaittaisen ödometrikokeen tuloksista määritettiin lisäksi tiivistetyn ja löyhän näytteen vedenläpäisevyyskerroin kaavalla 1.

$$k = 3,17 \times 10^{-8} \times \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M_s} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

missä c_v on konsolidaatiokerroin [m^2/v]
 γ_w veden tilavuuspaino [kN/m^3] ja
 M_s sekanttimoduuli [kN/m^2].

Tietyn kuormitusportaan aikana konsolidaatioastetta $U = 50 \%$ vastaava konsolidaatiokerroin c_v saadaan kaavalla 2.

$$c_v = 1,5516 \times 10^4 \times \frac{h^2}{t_{50}} \quad [\text{m}^2/\text{v}] \quad (2)$$

missä h on näytteen korkeus kuormitusvaiheen alussa [m]
 t_{50} konsolidaatioastetta $U = 50 \%$ vastaava kuormitusaika [v].

Tiettyä kuormitusporrasta vastaava sekanttimoduuli M_s saadaan kaavalla 3.

$$M_s = \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \epsilon_1} \quad (3)$$

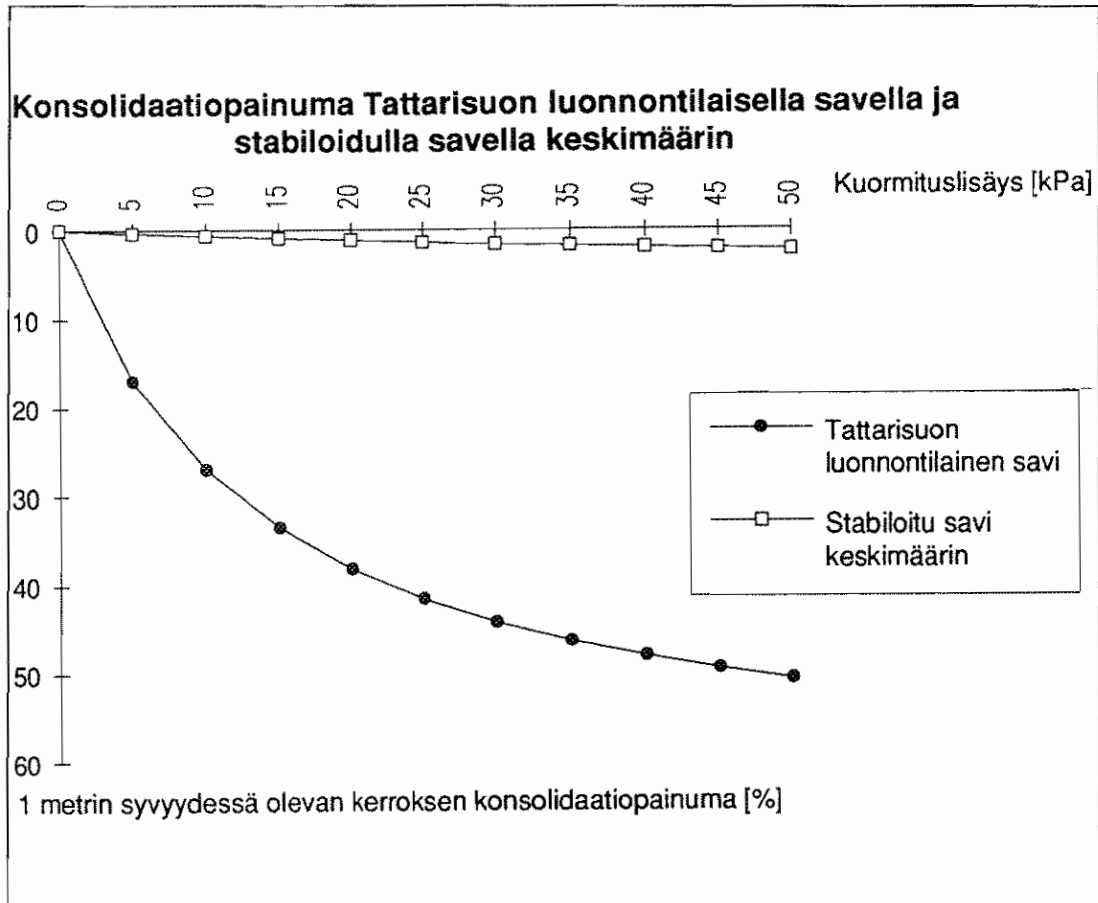
missä $\Delta \sigma_1$ on jännityslisäys
 $\Delta \epsilon_1$ näytteen suhteellinen kokoonpuristuma jännityslisäyksellä $\Delta \sigma_1$.

Taulukko 5. Tattarisuon stabiloiduista savimassoista tehtyjen ödometri-
kokeiden tulokset.

Koe no	Massa	A [cm ²]	γ [kN/m ³]	Sr [%]	e	w [%]	m	β	σ_p [kPa]	σ_1 [kPa]	cv [m ² /v]	Ms [kPa]	k*10exp-9 [m/s]	σ_1 [kPa]	cv [m ² /v]	Ms [kPa]	k*10exp-9 [m/s]
Rowe 1	8	506,7	18,02	100	1,052	42,3	25	-0,08	48	100	7,9	22231	0,11				
Rowe 2	4	506,7	17,84	84	0,890	27,9				200	170	27567	2,00				
935	3	20,0	16,68	100	1,331	50,8	38	0,51		50	11,7	5814	0,64	100	15,8	6329	0,79
941	3	20,0	15,69	90	1,488	51,3				50	9,8	3906	0,79				
936	8	20,0	18,53	100	0,856	32,4	30	0,38		50	7,6	2475	0,95	100	10,4	2703	1,20
940	8	51,5	17,16	98	1,163	42,9				50	3,8	1302	0,91	100	7,3	2008	1,20
937	4	51,5	17,82	91	0,961	32,5	46	0,53	120	87	36,6	14880	0,78				
943	4	51,5	16,41	83	1,201	37,0				87	28,1	12257	0,73				
938	6	51,5	16,94	98	1,244	45,7	37	0,40		87	11	3593	0,97				
944	6	51,5	16,08	90	1,372	46,2				87	43,2	3064	4,50				
939	7	51,5	17,26	97	1,148	41,6	50	0,49		87	18,6	5209	1,10				
945	7	51,5	16,28	85	1,252	40,0				87	104,1	9302	3,60				
CRS 167	8	44,0	18,12	100	0,973	37,5	26	0,35									
168	8	44,0	17,21	95	1,115	40,0	22	0,35									
169	4	44,0	16,71	70	0,990	26,0	30	0,72	148								
170	4	44,0	13,87	52	1,429	27,7	12	0,13	34								
172	3	44,0	17,27	100	1,214	48,2	28	0,41									
171	3	44,0	15,69	86	1,386	45,2	21	0,59									
173	6	44,0	16,94	91	1,145	39,3	36	0,58									
174	6	44,0	16,05	86	1,323	42,9	26	0,67									
175	7	44,0	17,3	90	1,051	35,5	62	0,49									
176	7	44,0	16,31	82	1,190	36,5	49	0,90									

 = hylätty näyte
 = tiivis näyte
 = löyhä näyte

Kuvassa 9 on vertailtu luonnontilaisen Tattarisuon saven ja keskimääräisen stabiloidun saven konsolidaatiopainumaa. Stabiloidun massan tilavuuspainona on tässä käytetty arvoa 17 kN/m^3 , moduulilukuna 38 ja jännityksen eksponenttina 0,46. Stabiloidun massan painuma jää näillä painumaparametreilla kymmenesosaan stabiloimattoman saven vastaavasta painumasta.



Kuva 9. Tattarisuon luonnontilaisen saven ja stabiloidun massan konsolidaatiopainuma eri kuormituslisäyksen arvoilla.

Vedenläpäisevyyskerroin määritettiin sekä tiiville että löyhille näytteille. Massojen 3 ja 8 näytteille määritettiin vedenläpäisevyyskerroin kuormituksilla 50 ja 100 kPa. Massojen 4, 6 ja 7 näytteille vedenläpäisevyyskerroin määritettiin kuormituksella 87 kPa. Yhtä näytettä lukuunottamatta kaikki vedenläpäisevyyden arvot olivat väliltä $0,64 \times 10^{-9}$ - $1,2 \times 10^{-9}$ m/s riippumatta pystyjännityksen arvosta tai näytteen tiiveydestä. Saadut arvot vastaavat hienon siltin vedenläpäisevyyttä. Taulukossa 6 on esitetty tyypilliset vedenläpäisevyyskerroimen vaihteluvälit maalajeittain.

Taulukko 6. Kivennäismaalajien vedenläpäisevyyskerroimen vaihteluvälit./22/

Maalaji	Vedenläpäisevyyskerroin k [m / s]
Sora	$10^{-2} - 10^{-4}$
Hiekka	$10^{-4} - 10^{-6}$
Siltti	$10^{-6} - 10^{-9}$
Savi	$10^{-9} - 10^{-10}$

4.3.2 Stabiloidun massan routivuus

Maa-aineksen routivuuden arviointimenetelmät voidaan jakaa viiteen ryhmään /4/:

- rakeisuusmääritys
- huokoskokomääritys
- maa-aineksen ja veden välisen vuorovaikutuksen tutkiminen
- maa-aineksen, veden ja jään välisen vuorovaikutuksen tutkiminen
- routakokeet.

Yksinkertaisimillaan maa-aineksen routivuuden arvioiminen tapahtuu käyttämällä routivuuskriteerinä hienoaineksen määrää - yleensä raekokoa # 0,074 mm tai # 0,02 mm pienempien rakeiden osuutta. Tällä määrittelyllä voidaan materiaalit jakaa karkeasti routiviin ja routimattomiin. Menetelmän etuna on sen helppous: pelkkä rakeisuusmääritys riittää. Haittapuolena on menetelmän karkeus. Lisäksi, koska routivuuteen vaikuttaa monia muitakin tekijöitä partikkelikoon ohella, kuten mineraalikoostumus, tiiviys / huokoisuus, huokoskokojakauma jne, joudutaan yhden seulakoon läpäisyprosenttia käyttämään routivuuskriteerinä varsin varovasti riittävän luotettavan arvion saamiseksi. Määrittelyn luotettavuutta parannetaan täydentävillä kriteereillä kuten esimerkiksi koko rakeisuuskäyrän muoto, kapillaarinen nousukorkeus, plastisuus, vedenläpäisevyys tai mineraalikoostumus./20/

Kuvassa 10 on esitetty Tattarisuolla stabiloidun massan 7 (30% rikinpoiston lopputuotetta, 7% kalkkia, 3% masuunikuonaa) rakeisuuskäyrä sekä diagrammi materiaalin routivuuden arvioimiseen rakeisuuskäyrän perusteella. Rakeisuuskäyrän perusteella massa 7 on routiva.

Maa-aineksen routivuutta ei voida arvioida täysin luotettavasti pelkästään sen huokosominaisuuksien perusteella. Kapillaarisesti määritetyn huokoskokojakautuman on kuitenkin havaittu korreloivan routivuustutkimuksissa rakeisuuskriteereitä paremmin kenttäkokeiden kanssa /5/. Elohopea-intruusiolla määritetystä huokoskokojakautumasta on kumulatiivisella huokoisuudella havaittu olevan paras korrelaatio tiivistettyjen ja kyllästettyjen näytteiden routanousuun nopeassa routakokeessa /29/.

Maa-aineksen ja veden välisistä vuorovaikutuksista on routivuuden kannalta tutkittu materiaalin vedenpidätyskykyä, kapillaarisuutta sekä vedenläpäisevyyttä kyllästyneenä ja kyllästymättömänä. Materiaalin vedenpidättävyyttä kuvataan yleensä käyrällä, jossa esitetään kuormittamisen vaikutus sen vesipitoisuuteen. Kuormitus ilmoitetaan yleensä pF-arvona, joka on kuormittavan vesipatsaan korkeuden [cm] logaritmi. Routakokeissa on kitkamaalajeilla havaittu pF-arvon ja routivuuden välinen yhteys /17/ ja vastaavanlaisen korrelaation on arveltu löytyvän myös koheesiomaille /18/.

Maa-aineksen ja jään välistä vuorovaikutusta on tutkittu mittaamalla routapainetta, vedenläpäisevyyttä jäätyvässä vyöhykkeessä sekä routanousua. Routapainekokeissa sallitaan veden virtaaminen jäätyvään näytteeseen, mutta estetään sen laajeneminen. Routapainekokeissa mitattuja routa- tai huokosvedenpaineita on sitten käytetty routivuuskriteerien perustana. /20/

Suorin menetelmä maa-aineksen routivuuden arvioimiseen laboratoriossa on varsinainen routakoe. Routivuusluokitus tehdään tällöin esimerkiksi routanousunopeuden, kokonaisroutanousun, suhteellisen routanousun tai routimispotentiaalin perusteella. ISSMFE:n routakonferenssissa Saariselällä 1989 esitettiin routivuusluokitus routimispotentiaalin SP_0 [mm^2/Kh] perusteella. Tämän luokituksen mukaan tutkittavan maan routivuus on /15/

- merkityksetön, jos sen routimispotentiaali on $0 < SP_0 < 0,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- vähäistä, jos sen routimispotentiaali on $0,5 < SP_0 < 1,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- kohtalaista, jos sen routimispotentiaali on $1,5 < SP_0 < 3,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- voimakasta, jos sen routimispotentiaali on $SP_0 > 3,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$.

Tattarisuolla stabiloiduille massoille tehtiin yksinkertaiset routanousukokeet. Näytteet kyllästettiin vedellä ja jäädytettiin yläpinnasta lähtien vakiolämpötilalla -3 °C. Näytteen alapinta pidettiin sulana lämpötilassa +1 °C, ja näytteeseen pääsi virtaamaan vapaasti vettä ulkopuolelta, jolloin päästiin mittaamaan maksimiroutanousua. Koe kesti 10 vrk, ja kokeen aikana näytettä kuormitettiin 3 kPa kuormalla.

Routakokeessa seurattiin näytteen routanousua ja lämpötilajakaumaa, joiden perusteella voidaan laskea näytteen routimispotentiaali kaavoilla 4 ja 5.

$$SP = \frac{v}{\text{grad}T} \quad (4)$$

$$v = \frac{dh}{1,09 \times dt} \quad (5)$$

joissa	SP on routimispotentiaali kuormituksella 3 kPa	[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 SP₀-arvo, joka kuvaa routimispotentiaalia ilman kuormitusta, saadaan kuormitetusta routimispotentiaalista kuorman suuruuden ja näytteen hienoainespitoisuuden perusteella määräytyvällä korjauskertoimella. Taulukossa 7 on esitetty Tattarisuolla stabiloiduille massoille tehtyjen routanousukokeiden tulokset.

Taulukko 7. Tattarisuon koemassojen routanousukokeiden tulokset (RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=kalkki, MaKu=masuunikuona).

Massa	Sideaine	SP ₀ [mm ² /Kh]
T-suo 3	30% RPL, 7% sem	0,8
T-suo 4	15% RPL, 4% ka	1,6
T-suo 6	15% RPL, 7% ka	0,5
T-suo 7	30% RPL, 7% ka, 3% MaKu	1,1
T-suo 8	30% RPL, 4% ka	0,4

ISSMFE:n routivuusluokituksen mukaan massojen T-suo 6 ja 8 routivuus on merkityksetöntä, massojen T-suo 3 ja 7 routivuus vähäistä ja massan T-suo 4 routivuus kohtalaista. Erot massojen routimispotentiaalissa eivät selity sideaineiden tai niiden pitoisuuksien perusteella. Kun lisäksi savi oli kaikissa muissa massoissa samaa paitsi massassa 6 (Malminkaaren savi), on tässä vaiheessa oletettava, että erot routivuudessa johtuvat massojen epähomogeenisuudesta. Stabiloitujen massojen routivuutta ja sulamiskonsolidoitumista kannattanee kuitenkin tutkia mahdollisten jatkotutkimusten yhteydessä.

4.3.3 Stabiloitu massa kasvualustana

Stabiloidun massan soveltuvuutta kasvualustaksi selvitettiin Viljavuuspalvelu Oy:n viljavuustutkimuksessa. Koemassojen rikinpoiston lopputuotteen pitoisuus oli 15 tai 30 %, kalkkipitoisuus 0, 4 tai 7 % ja sementtipitoisuus 0 tai 7 % saven kuivapainosta. Yhdessä massoista oli lisäksi 3 % saven kuivapainosta masuunikuonaa.

Kaikki näytteet olivat hyvin emäksisiä (pH 9,1 - 9,9). Kaikilla näytteillä oli korkeasta rikkipitoisuudesta johtuen myös hyvin korkea johtoluku: 19,1 - 37,0 × 10 mS/cm. Viherrakennuskasvualustalle suositeltu pH on 5,0 - 7,5 ja johtoluku 0,5 - 6 mS/cm [27]. pH:n kohoaminen muuttaa ravinteita ja hivenaineita niukkaliukoisempaan muotoon. Johtoluvun kohoaminen hidastaa ravinteiden osmoottista siirtymistä maasta kasvisoluihin tai jopa kääntää osmoosin suunnan.

Korkean emäksisyytensä ja johtolukunsa vuoksi joudutaan stabiloitu massa erottamaan kasvukerroksesta esimerkiksi luonnonmaakerroksella. HKR:n puisto-osasto suosittaa erottavan kerroksen paksuudeksi yhtä metriä.

4.3.4 Ympäristölle haitallisten aineiden liukoisuudet

Alkuainepitoisuuksien määrittystä varten otettiin näytteet kaikista koemassoista sekä Tattarisuolta että Herttoniemestä. Stabiloiduista massoista määritettiin kromille, kuparille, lyijylle, nikkelille ja sinkille sekä kokonaisalkuainepitoisuudet että liukoisten alkuaineiden pitoisuudet. Kokonaispitoisuudet määritettiin 5 N typpihappouutoksesta (SFS 3044), josta fosforipitoisuudet saatiin kalorimetrisesti (SFS 3026) ja Cu, Pb, Cr, Ni ja Zn pitoisuudet atomiabsorptiospektrofotometrillä käyttäen grafiittiuunitekniikkaa (SFS 3044). Vesiliukoiset pitoisuudet määritettiin vesiuutoksesta (uuttosuhte 1:60, ravistelu 1 h). Luonnollisia uutto-olosuhteita jäljiteltiin lievästi happamassa (pH 4,5) ammoniumasetaatti-etikkahappo-EDTA-uutossa.

Typpihappouutto on yleisin Suomessa ja ulkomailla käytetty uuttomenetelmä ns. kokonaispitoisuuksien määrittämiseksi kiinteistä näytteistä. Uutto irrottaa maapartikkeliin kiinnittyneet alkuaineet ja hajottaa syntyneet kemialliset yhdisteet liukoiseen muotoon. Mineraalirakenteen se hajottaa vain osittain. Useat kiinteiden materiaalien sijoittamiselle ja käytölle asetetut ohjearvot perustuvat tämän uuttomenetelmän käyttöön. Ohjearvot ovat olleet peräisin Yhdysvaltojen, Kanadan tai Hollannin normeista, koska Suomessa ei ole määritelty omia raja-arvoja. Typpihappouuttoiset pitoisuudet on esitetty taulukossa 8 ja niitä on verrattu Lääkintöhallituksen yleiskirjeessä n:o 1637/77 maanviljelyskäyttöön soveltuvalla jätevesiliitteelle sallittuihin vastaaviin raskasmetallipitoisuuksiin.

Vesiuutto irrottaa pienen osan maapartikkeleihin heikosti sitoutuneista alkuaineista. Suurin osa ioninvaihtopaikkoihin sitoutuneista sekä sideaineen ja maapartikkelien muodostamista kemiallisista yhdisteistä jää liukenematta.

Vesiuuttoisille alkuainepitoisuuksille ei ole käytössä yleisiä kansallisia tai kansainvälisiä ohjearvoja arvioitaessa materiaalin sijoittamisen ja käytön aiheuttamia ympäristövaikutuksia, mutta vesiliukoisen alkuainepitoisuuden suhdetta kokonaispitoisuuteen käytetään yleisesti materiaalin liukoisuutta kuvaavana indeksiarvona. Tällöin ovat eri aineiden liukoisuudet vertailukelpoisia keskenään riippumatta niiden ominaispainoista. Vesiuuttoiset liukoisuudet on esitetty taulukossa 9 ja liukoisuusindeksit taulukossa 10.

Lievästi happamassa uutossa jäljitellään luonnon happamuusolosuhteissa tapahtuvaa uuttumista. Tuloksia verrataan taulukossa 11 yleisesti käytössä olevaan hollantilaiseen saastuneen maan raja-arvoon.

Taulukko 8. Kokonaisalkuainepitoisuudet (5 N HNO₃-uutto) Tattarisuon savesta luonnontilaisena sekä stabiloituna eri sideainesekoituksilla ja Lääkintöhallituksen yleiskirjeessä n:o 1637/77 maanviljelyskäyttöön soveltuvalla jätevesilietteelle sallitut vastaavat raskasmetallipitoisuudet. Pitoisuudet ilmoitettu mg/kg massan kuivapainosta (RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=poltettu kalkki, MaKu=masuunikuona).

		HAPPOUUTTO [mg / kg]					
		P (kok)	Cu	Pb	Cr	Ni	Zn
Savi luonnontilassa		150	63	13	189	46	152
Koealue	Massa						
H-niemi 1	33% RPL; 7,7% ka	25	100,5	5,85	58	2,25	131
	2 30% RPL; 6,6% sem	35	77	1,35	47,5	2,1	112
	3 4,5% ka; 3% MaKu	130	228,5	9,8	65,5	2,25	222
T-suo 3	30% RPL; 7% sem	40	112,667	8,733	386,67	2,7667	166
	4 15% RPL; 4% ka	55	98	7,35	157	2	151
	6 15% RPL; 7% ka	50	149	8,5	100	1,4	127
	7 30%RPL; 7%ka; 3%MaKu	40	65	3,1	35	0,5	86
	8 30% RPL; 4% ka	246,7	149	7,167	39	1,5333	148
Lääkintöhallituksen raja-arvot			3000	1200	1000	500	5000

Typpihappouuton tulokset osoittavat, että rikinpoiston lopputuotetta sisältävien sideainesten käyttäminen ei lisää saven fosforipitoisuutta eikä tutkittujen raskasmetallien kokonaispitoisuuksia. Typpihappouutossa näytteiden nikkelpitoisuuden jääminen alle kymmenesosaan luonnonsaven nikkelpitoisuudesta, voidaan tulkita saven nikkelpitoisuusanalyysissä tapahtuneeksi satunnaiseksi virheeksi. Havaitut raskasmetallipitoisuudet jäävät sängen kauas arvoista, jotka Lääkintöhallitus sallii maanviljelyksessä käytettävälle jätevesilietteelle.

Taulukko 9. Vesiuuttoiset (uuttosuhde 1:60) alkuainepitoisuudet Tattarisuon savesta luonnontilaisena ja stabiloituna eri sideainesekoituksilla sekä rikinpoiston lopputuotteesta ja poltetusta kalkista. Pitoisuudet ilmoitettu mg/kg massan kuivapainosta (RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=poltettu kalkki, MaKu = masuunikuona).

		VESIUUTTO [mg / kg]				
		Cu	Pb	Cr	Ni	Zn
Savi luonnontilassa		0,6	0,13	3,96	2,3	0,54
Rikinpoiston lopputuote		<0,03	0,01	0,13		1
Poltettu kalkki, CaO		<0,03	0,03	0,84		1,9
Koealue	Massa					
H-niemi 1	33% RPL; 7,7% ka	2,5	<0,06	0,125	0,47	<0,25
	2 30% RPL; 6,6% sem	0,6	<0,06	0,075	1,365	0,87
	3 4,5% ka; 3% MaKu	12,65	<0,065	0,09	0,555	<0,25
T-suo 3	30% RPL; 7% sem	1,6	<0,06	0,68	<0,10	5,72
	4 15% RPL; 4% ka	2,4	<0,05	0,57	<0,41	<4,12
	6 15% RPL; 7% ka	5,2	<0,06	0,05	0,17	0,42
	7 30%RPL; 7%ka; 3%MaKu	3,4	<0,06	0,02	<0,05	<0,25
	8 30% RPL; 4% ka	2,333	<0,005	0,06	<0,09	<0,27

Taulukko 10. Liukoisuusindeksi (vesiuuttainen pitoisuus / typpihappouuttainen pitoisuus) RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=poltettu kalkki, MaKu=masuunikuona.

		VESIUUTTO/HAPPOUUTTO				
		Cu	Pb	Cr	Ni	Zn
Savi luonnontilassa		0,010	0,010	0,021	0,050	0,004
Koealue	Massa					
H-niemi 1	33% RPL; 7,7% ka	0,026	<0,016	0,002	0,237	<0,002
	2 30% RPL; 6,6% sem	0,009	<0,312	0,002	0,650	0,008
	3 4,5% ka; 3% MaKu	0,050	<0,007	0,001	0,3009	<0,001
T-suo 3	30% RPL; 7% sem	0,015	<0,01	0,001	<0,049	0,031
	4 15% RPL; 4% ka	0,031	<0,007	0,003	<0,162	<0,03
	6 15% RPL; 7% ka	0,035	<0,007	0,001	0,121	0,003
	7 30%RPL; 7%ka; 3%MaKu	0,052	<0,019	0,001	<0,100	<0,003
	8 30% RPL; 4% ka	0,018	<0,009	0,002	<0,055	<0,002

Masuunikuonaa sisältävien näytteiden kuparin liukoisuusindeksi (vesiuutto/happouutto) on yli kaksinkertainen verrattuna muihin näytteisiin. Tämä viittaa siihen, että masuunikuona sisältää runsaasti helppoliukoista kuparia. Liukoisuusindeksin perusteella ei voida osoittaa, että masuunikuonan käyttö vähentäisi muidenkaan metallien liukoisuutta. Aikaisemmissa tutkimuksissa on saatu tästä poikkeavia tuloksia ^{/32/} - tosin erilaisella uuttomenetelmällä. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voitaisiinkin kiinnittää huomiota tähän kysymykseen.

Taulukko 11. Ammoniumasetaatti-etikkahappo-EDTA-uuttoiset pitoisuudet eri sideainesekoituksilla stabiloidusta Tattarisuon savesta sekä yleisesti käytetty hollantilainen raja-arvo saastuneen maan vastaavalle pitoisuudelle ^{/2/}. Pitoisuudet ilmoitettu mg/kg massan kuivapainosta (rpl=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=poltettu kalkki, mk=masuunikuona).

Koealue	Massa	pH 4,5-uutto [mg/kg]				
		Cu	Pb	Cr	Ni	Zn
H-niemi 1	33% RPL; 7,7% ka	9,2	14	5,9	8,7	13
	3 4,5% ka; 3% MaKu	15	17	6,9	7,5	13
T-suo 3	30% RPL; 7% sem	21	17	6	9,3	13
	7 30%RPL; 7%ka; 3%MaKu	14	15	5,4	8,8	21
	8 30% RPL; 4% ka	12	12	3,5	6,2	9,1
Saastuneen maan raja-arvo		500	600	800	500	3000

Lievästi happaman uuton tuloksissa näkyy kalkin edullinen vaikutus verrattaessa massojen H-niemi 1 ja T-suo 3 metalliyhdisteiden liukkoisuuksia. Masuunikuonalla näyttää tämän uuton perusteella olevan jopa negatiivinen vaikutus, kun verrataan massoja H-niemi 1 ja T-suo 7. Massojen H-niemi 3 ja T-suo 8 erona on se, että edellisessä on 3 % saven kuivapainosta masuunikuonaa, kun taas jälkimmäisessä on 30 % rikinpoiston lopputuotetta. Jälkimmäisellä massalla ovat kaikki tutkitut liukoisuudet kuitenkin selvästi pienemmät, joten ainakin kalkin kanssa käytettynä aiheutuu 30 % rikinpoiston lopputuotelisäyksestä pienempi metalliyhdistekuormitus kuin 3 % masuunikuonalisäyksestä.

5 MAASTOKOKEET

5.1 Koealueet

Maastokokeiden tarkoituksena oli tutkia massastabiloinnin onnistumista työmaaolosuhteissa, erityyppisten sekoitusmenetelmien mahdollisuuksia, sekä stabiloidun massan in situ -ominaisuuksia. Lisäksi tutkittiin merivesiläjäytyksen vaikutusta stabilointitulokseen. Koerakentaminen tapahtui 12.11. - 2.12.1991.

Koealueet maastokokeita varten valittiin Helsingin Tattarisuolta ja Herttoniemestä. Kaikissa laboratoriokokeissa käytetty savi oli peräisin Tattarisuon koealueelta samoin kuin Herttoniemen koealueella stabiloitu savi. Tattarisuolla stabiloitu savi oli peräisin koealueelta poislukien koemassan 6 savi, joka oli ajettu 6 km:n päästä Kehä I ja Malminkaaren liittymästä.

Tattarisuon koealueella oli päällimmäisenä maakerroksena 5,5 m paksu yläosastaan liejuinen savikerros. Saven vesipitoisuus oli 110 % ja leikkauslujuus 7 kPa. Pohjaveden pinta oli n. 0,5 m syvyydessä maanpinnasta. Helsingin kaupungin rakennusviraston katuosasto rakensi työkoneita varten 40 m × 60 m kentän kitkamaasta. Kitkamaakerroksen paksuus oli 0,6 m, ja se erotettiin savesta II käyttöluokan suodatinkankaalla. Stabiloitava savi kaivettiin kahdeksasta kohdasta työkentän laidalta. Kuoppien koko oli 5 m × 5 m ja syvyys 2,5 - 3 m. Kuivakuorikerroksen puuttumisen ja saven heikon leikkauslujuuden vuoksi jouduttiin kuopat tukemaan teräsponttiseinin kaivamista varten. Tattarisuon koealue on esitetty liitteessä 1.

Herttoniemessä stabilointi tapahtui rantaan rakennetulla laajalla louhekentällä, jonne savi ajettiin Tattarisuon koealueelta. Stabiloitua massaa varten Helsingin satamalaitos kaivoi louhetäyttöön kolme kuoppaa, joiden ala oli 6 m × 6 m ja syvyys 3 m. Kuopissa oli 1,5 m:n syvyydeltä merivettä. Herttoniemen koealue on esitetty liitteessä 2.

5.2 Sideaineseokset

Koealueilla käytetyt sideaineet olivat samat kuin laboratoriokokeissa käytetyt. Masuunikuonaa lukuunottamatta aineet tuotiin työmaalle säiliöautoissa erikseen kutakin sekoituserää varten. Masuunikuona toimitettiin 1000 kg:n suursäkeissä. Taulukossa 12 on esitetty Tattarisuolla käytetyt sideaineseokset ja taulukossa 13 Herttoniemessä käytetyt.

Taulukko 12. Tattarisuon koemassojen sideaineseokset (% saven kuivapainosta, RPL=rikinpoiston lopputuote, MaKu= masuunikuona)

Massa	RPL	Kalkkia	Sementtiä	MaKu
T-suo 3	30	-	7	-
T-suo 4	15	4	-	-
T-suo 6	15	7	-	-
T-suo 7	30	7	-	3
T-suo 8	30	4	-	-

Taulukko 13. Herttoniemen koemassojen sideaineseokset (% saven kuivapainosta, RPL=rikinpoiston lopputuote, MaKu= masuunikuona)

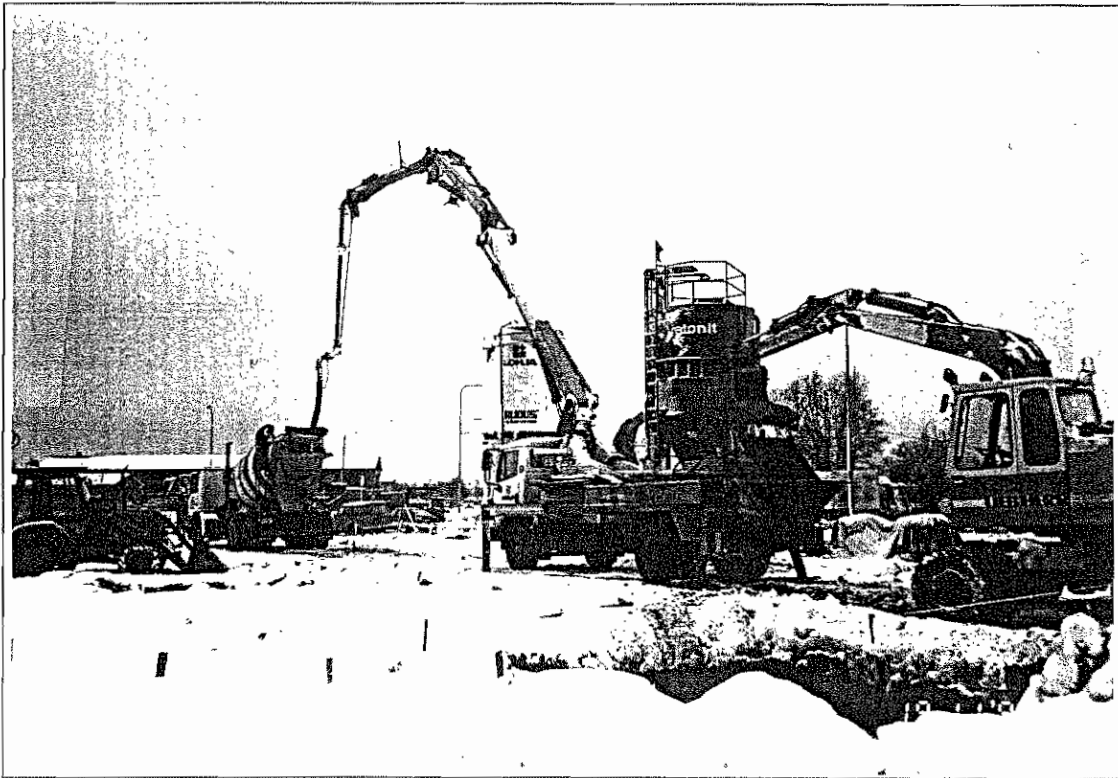
Massa nro	RPL	Kalkkia	Sementtiä	MaKu
1	33	7,7	-	-
2	30	-	6,6	-
3	-	4,5	-	3

5.3 Sekoituskalustot ja -menetelmät

5.3.1 Betoniautosekoitus

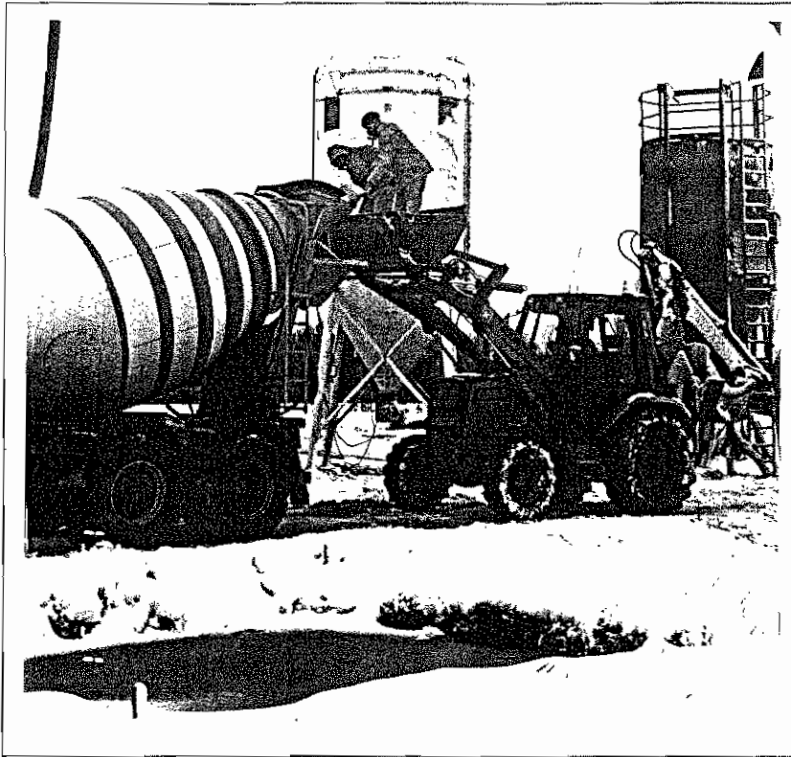
Tattarisuolla kokeiltiin saven ja sideaineiden sekoittamista sekoitusrummussa. Koska varsinaisesti tähän tarkoitukseen suunniteltua kalustoa ei ollut saatavissa, käytettiin sekoitukseen betoniautoa, jonka säiliö oli varustettu sekoitussiivekkein. Auton säiliöön mahtui kerralla 4 m³:n annos.

Sekoitettava saviannos lastattiin säiliöön betonipumpulla. Pumppaus edellytti saven huolellista välppäämistä, koska kaivantoon putoili kiviä rakennetusta työalustasta. Muutoin häiriintyneen saven pumppaaminen onnistui hyvin. Sideaineseoksena käytettiin 30 % saven kuivapainosta rikinpoiston loppu- tuotetta ja 4 % poltettua kalkkia. Sideaineita säilytettiin kuiva-ainesiloissa ja ne lisätiin säiliöön lapioiden avulla. Sekoituskalusto on esitetty kuvissa 11 ja 12.



Kuva 11. Saven pumppaus betoniautoon.

Savi ja sideaineet sekoitettiin pyörittämällä betoniauton rumpua noin viisi minuuttia. Silmämääräisesti tarkasteltuna aineiden sekoittuminen oli tässä ajassa perusteellinen. Sideaineiden lisääminen kuivatti ja jäykisti massan jo sekoituksen aikana niin jäykäksi, että se ei tullut ulos säiliöstä sellaisenaan, vaan massa jouduttiin lisäämään huomattava määrä vettä.

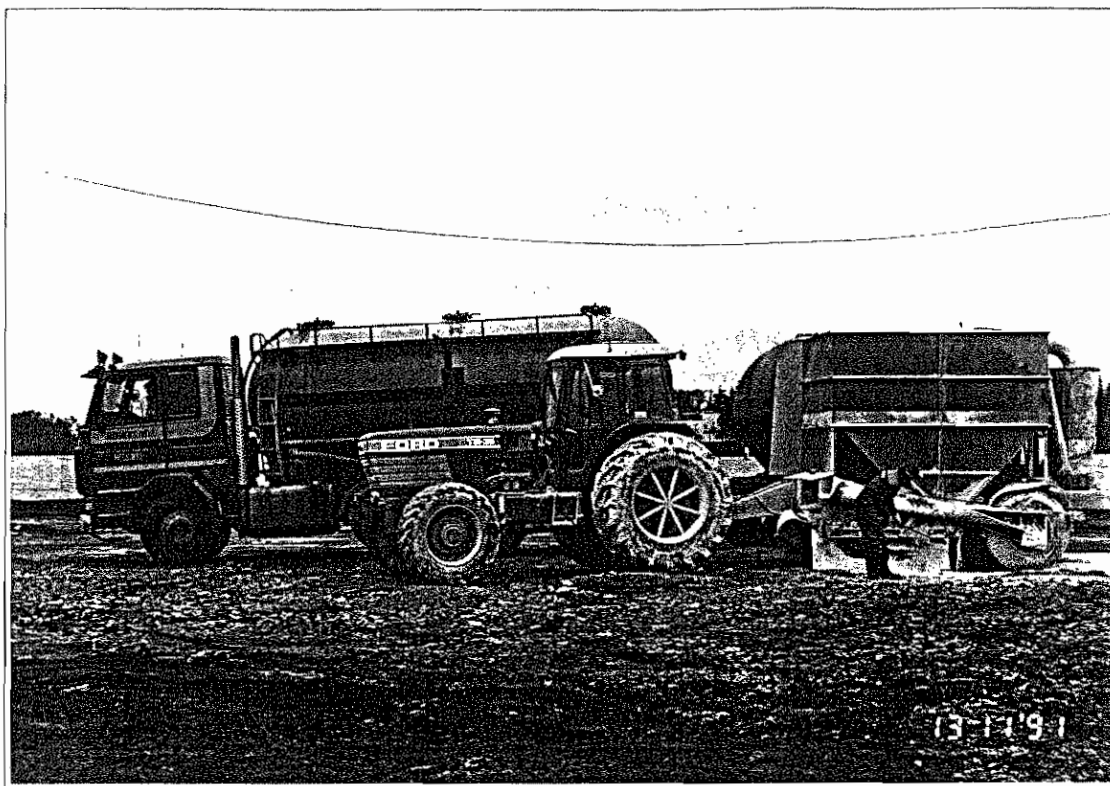


Kuva 12. Sideaineen lapiointi betoniautoon.

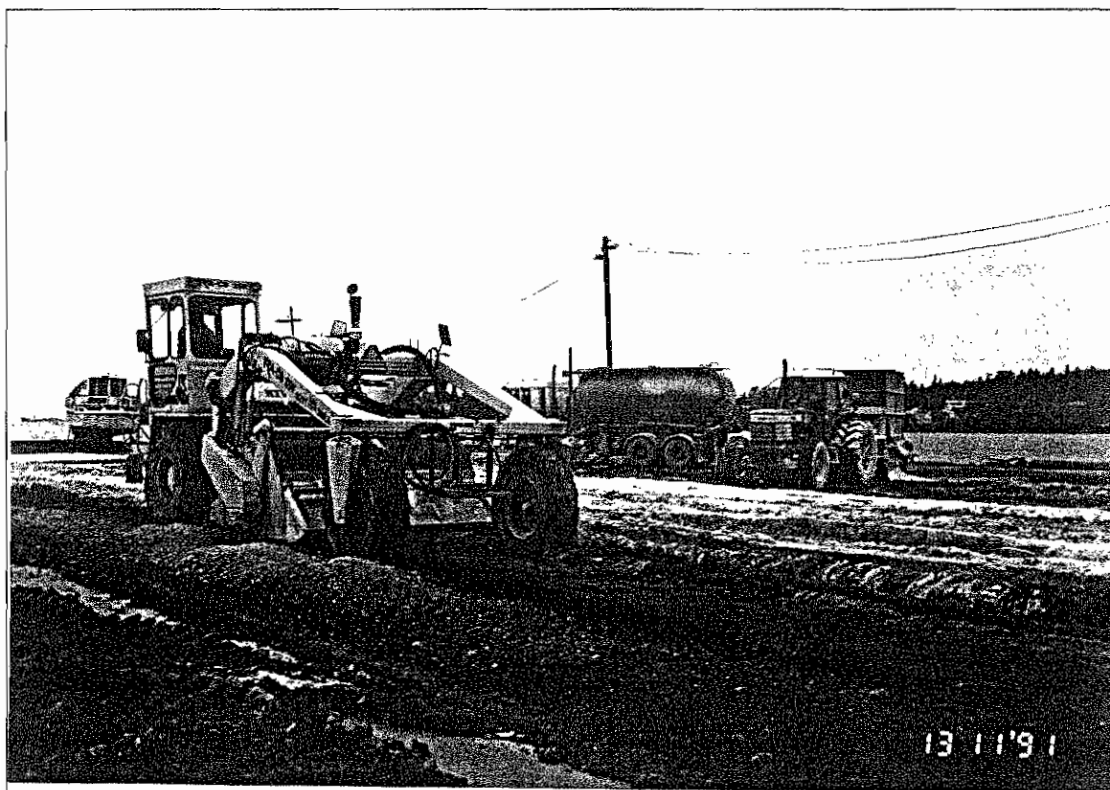
Vesilisäyksen vuoksi ei betoniautossa sekoitettu massa vastannut sellaista, johon todellisessa kohteessa pyritään. Koe keskeytettiin kolmen sekoituksen jälkeen myös sen hitauden takia: 4 m³:n erän ottaminen ulos säiliöstä kesti vähintään puoli tuntia. Kokeen varsinainen tulos oli se, että suurienkin sideainemäärien sekoittaminen hyvin lihavaan saveen onnistuu tehokkaasti rumpusekoituksena, kunhan huolehditaan valmiin massan liikkuvuudesta rummussa.

5.3.2 Pintastabilointi

Pintastabilointilaitteistolla sekoitettiin kolme koemassaa Herttoniemessä ja viisi Tattarisuolla. Laitteistoon kuului traktorilla vedettävä jauheenlevitin sekä stabilointiyrsin. Normaalisti näitä käytetään tierakenteen sidottujen kerrosten tekemiseen. Laitteistolla on käsitelty myös saastuneita maamassoja. Laitteisto on esitetty kuvissa 13 ja 14. Sideaineet tuotiin työmaalle säiliöautossa valmiiksi punnittuina ja purettiin suoraan jauheenlevittimeen. Herttoniemessä stabiloitu savi ajettiin Tattarisuolta. Tämä savi oli Tattarisuon liejuista pintakerrosta.



Kuva 13. Sideaineen levityksessä käytetty jauheenlevitin ja sideaineen työmaalle tuonut säiliöauto.



Kuva 14. Sideaineen ja saven sekoittamiseen käytetty stabilointijyrsin.

Pintastabiloinnissa koko käsiteltävä savimassa levitettiin kerralla 0,2 m paksuksi kerrokseksi, ja jauheenlevitin levitti sideaineet yhden kerrallaan savikerroksen päälle. Levitin otti käyttövoimansa laitteen taka-akselista. Useampien levityskertojen jälkeen alkoivat levittimen takarenkaat kuitenkin kerätä saven ja sideaineen sekoitusta, joka pakkautui lopulta niin paksuksi kerrokseksi, etteivät renkaat pyörineet lainkaan ja levitys oli keskeytettävä renkaiden puhdistusta varten. Jos savikerroksen paksuus oli yli 0,2 m, joutui levitinhihnalle helposti savea, jolloin jauhe alkoi levitä epätasaisesti ja työ oli keskeytettävä hihnan puhdistusta varten.

Massa sekoitettiin stabilointijyrsimellä kahdella yliajokerralla, minkä jälkeen massa oli silmämääräisesti tarkasteltuna täysin sekoittunut. Jyrsin liikkui vaivattomasti savi-sideainekerroksessa, ja sekoitus sujui ripeästi. Jyrsin nosti kuitenkin erittäin helposti alustamateriaalia mukaan sekoitettavaan massa. Lisäksi yli ϕ 150 mm kivet katkovat helposti jyrsimen teriä, joten alustamateriaali ei saa sisältää tätä suurempia kiviä. Sekoitettu massa läjitettiin kauhakuormaajalla tarkoitusta varten varattuun kuoppaan. Massaa ei tiivistetty.

5.4 Kenttätutkimukset

Stabiloiduista massoista tutkittiin:

- lujittumisreaktioiden etenemistä lämpötilamittauksin,
- lujuudenkehitystä kairauksin,
- muodonmuutosominaisuuksia painuma- ja huokospainemittauksin, koekuormituksin ja ruuvilevykokein sekä
- massojen routivuutta, vedenläpäisevyyttä, sideainepitoisuuksia ja haitallisten aineiden liukoisuuksia laboratorioskokein.

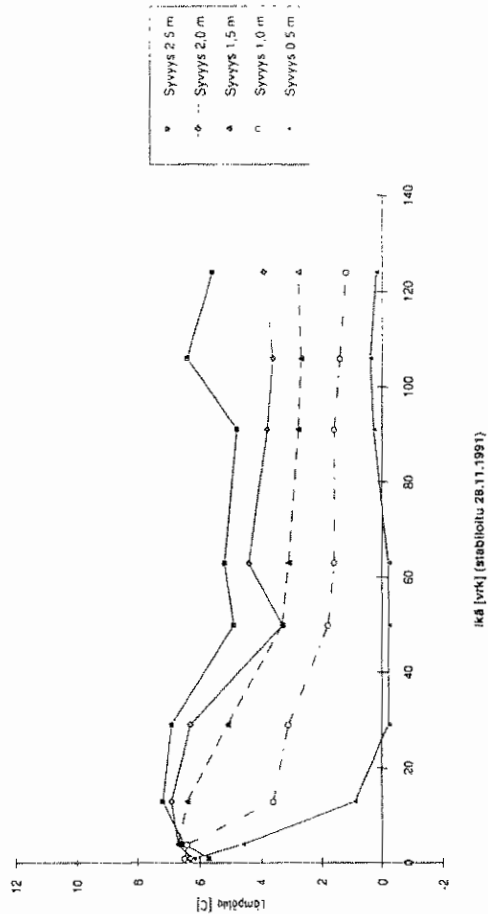
Stabiloiduista massoista tehdyt laboratorioskokeet ja niiden tulokset on esitetty luvussa 4.3.

5.4.1 Lämpötilamittaukset

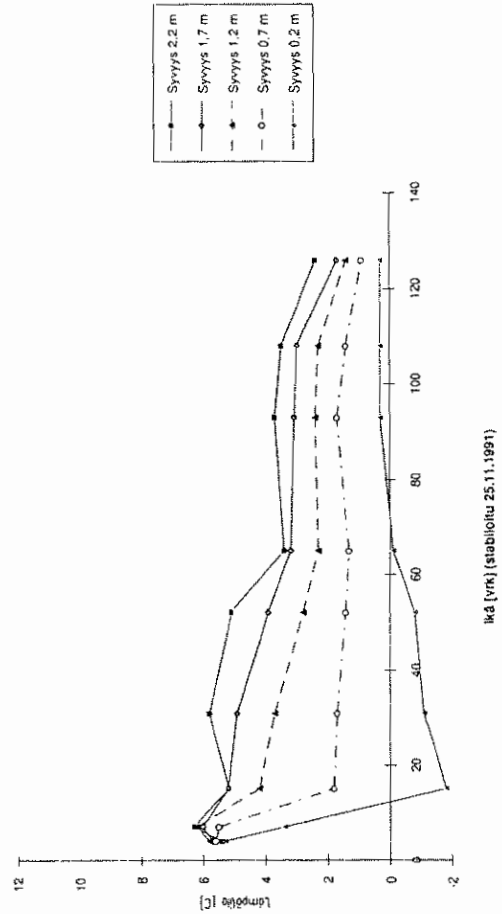
Kaikkien koemassojen lämpötilakehitystä seurattiin lämpötila-anturein. Anturit upotettiin massaan syvyysuunnassa puolen metrin välein. Heti stabiloinnin jälkeen rekisteröitiin lämpötilat useita kertoja viikossa. Mittausvälejä harvennettiin, kun lämpötilamuutokset alkoivat pienentyä. Massojen lämpötilakehityskäyrät on esitetty kuvissa 15 ja 16. Lämpötilakäyristä nähdään, että kalkin sammuminen ja ioninvaihtoreaktiot ovat loppuneet 10. vuorokauden tienoilla ja massan lämpötila on alkanut laskea. Kuitenkin vielä 60 - 100 vuorokauden kuluttua sekoittamisesta on massassa tapahtunut lämpöä vapauttavia lujittumisreaktioita. Reaktiot ovat olleet kiivaimmillaan stabiloidun kerroksen alaosassa sen tiivistyneisyyden vuoksi.

Kaikkien massojen lämpötilat ovat olleet huomattavasti alempia kuin lujittuvan, kalkilla stabiloidun syvästabilointimassan. Syvästabilointikohteen suunnittelun yhteydessä tehtävissä stabiloituvuuskokeissa käytetään lämpökäsittelyä, jolla jäljitellään in situ-olosuhteita stabiloituvassa massassa. Tällöin koekappaleita säilytetään kalkkistabiloinnin tapauksessa kaksi ensimmäistä tuntia + 50 °C:n lämpötilassa ja 46 seuraavaa tuntia + 22 °C:ssa, minkä jälkeen lämpötila lasketaan + 8 °C:een. Sementti- ja kalkkisementtistabiloinnissa säilytetään koekappaleita kaksi ensimmäistä vuorokautta + 22 °C:ssa ja tämän jälkeen + 8 °C:ssa /31/. Koemassojen lämpötilamittausten perusteella ei tällainen lämpökäsittely vastaa massa-stabiloinnin olosuhteita, eikä näinollen sovellu stabiloituvuuskokeisiin massastabiloinnin yhteydessä.

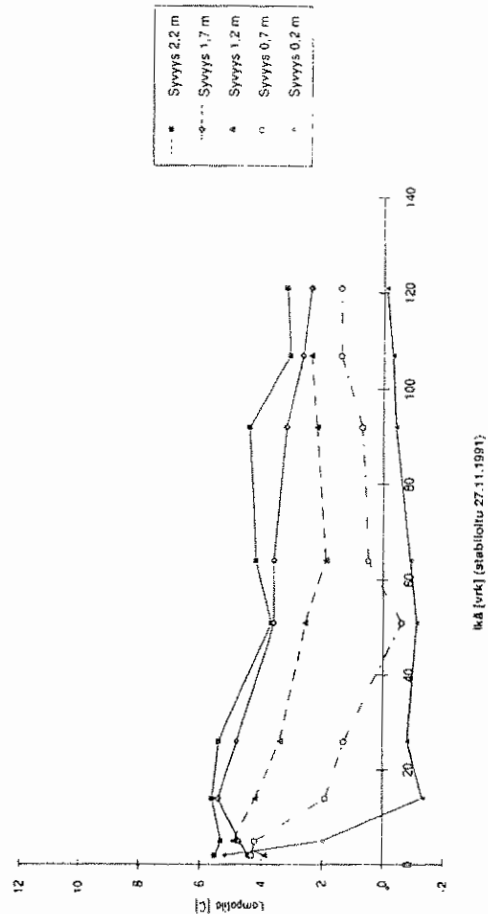
Tattarisuo6/ 15% kipsiä, 7% kalkkia: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



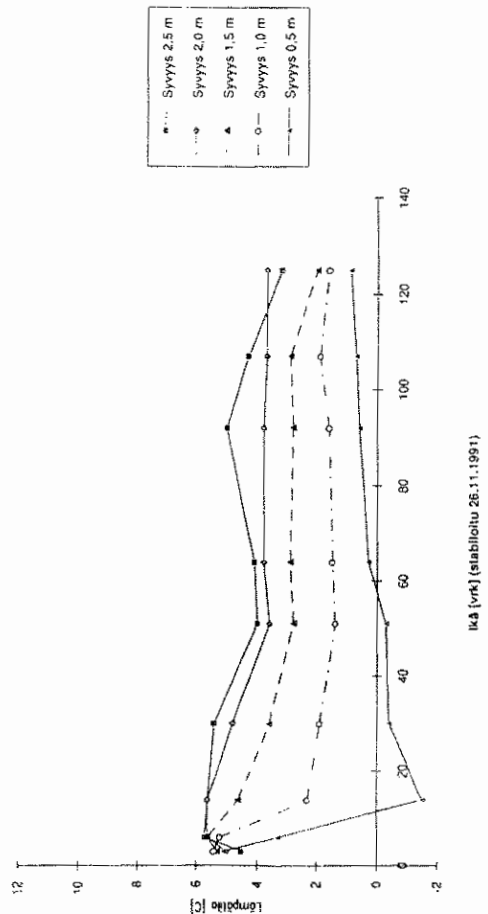
Tattarisuo8/ 30% kipsiä, 4% kalkkia: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



Tattarisuo4M/ 15% kipsiä, 4% kalkkia: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä

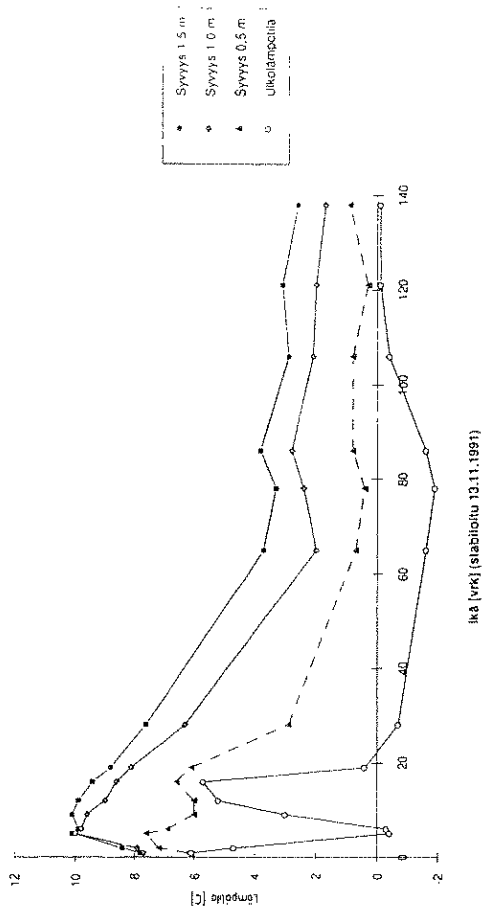


Tattarisuo7/ 30% kipsiä, 7% kalkkia, 3% masuunikuonaa: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä

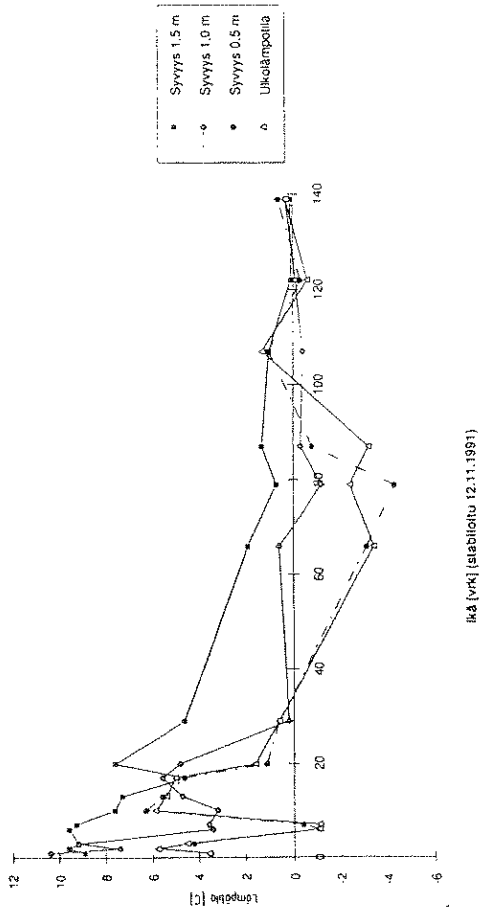


Kuva 15. Koemassojen lämpötilakehitys Herttoniemessä sekä Tattarisuon massassa 3.

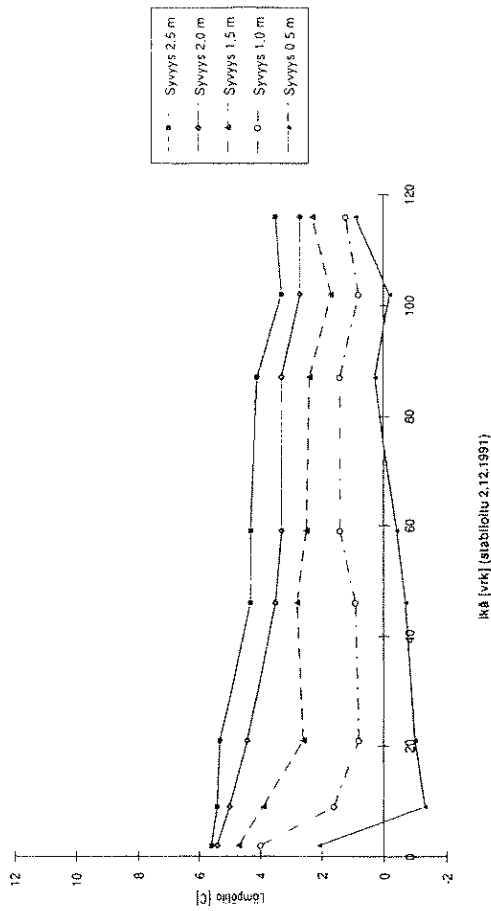
Herttoniemi2/ 30% kipsiä, 6,6% sementtiä: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



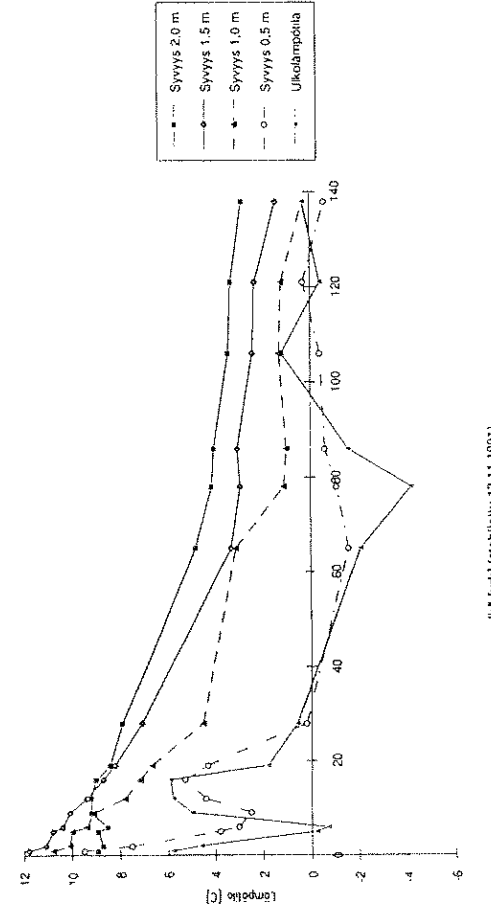
Herttoniemi1/ 33% kipsiä, 7,6% kalkkia: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



Tattarisuo3/ 50% kipsiä, 7% sementtiä: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



Herttoniemi3/ 4,5% kalkkia, 3% kuonaa: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



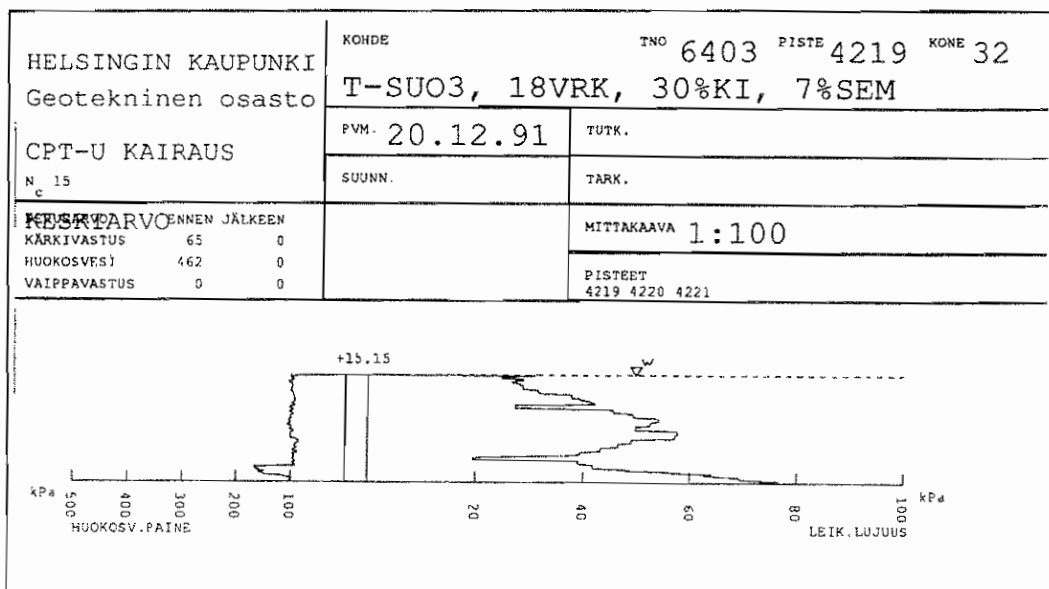
Kuva 16. Koemassojen lämpötilakehitys Tattarisuon koemassoissa 4 - 8.

Herttoniemen koemassojen korkeampi alkulämpötila johtunee siitä, että massat läjitettiin heti sideaineiden sekoituksen jälkeen. Tattarisuolla sekoitettu massa oli yön yli kentällä ja läjitettiin vasta aamulla. Leudon talven vuoksi massat eivät jäätyneet, eikä näinollen ollut mahdollista seurata niiden in situ routimiskäyttäytymistä.

5.4.2 Kairaukset

Koemassojen lujittumisen etenemistä seurattiin CPT- (Cone Penetration Test) sekä siipikairauksin.

CPT-kairaukset tehtiin Tattarisuon koemassoille noin 14, 30 ja 60 vrk:n lujittumisen jälkeen ja Herttoniemen koemassoille noin 70 vrk:n ikäisinä. CPT-kairauksessa rekisteröitiin sähköisesti kärkivastus, vaippakitka ja kairan aiheuttama huokosvesipaine. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki CPT-kairauksen tulosteesta. Osassa CPT-kairauksia käytettiin 10 cm² kärkeä ja osassa 100 cm² kärkeä. Eri kärjillä saadut kairaustulokset on muutettu keskenään vertailukelpoisiksi. Leikkauslujuudeksi muutetut kairaustulokset on esitetty taulukossa 14 yhdessä siipikairaustulosten kanssa.



Kuva 17. Tuloste CPT-kairauksesta.

Stabiloitujen massojen leikkauslujuutta mitattiin myös siipikairauksin. Siipikairaukset tehtiin Tattarisuolla noin 15, 60 ja 190 vrk:n ikäisille massoille ja Herttoniemessä noin 19, 70 ja 290 vrk:n ikäisille massoille. Osassa siipikairauksista käytettiin 65 x 130 -kärkeä ja osassa 80 x 175 -kärkeä. Kaikki tulokset ja kairausdiagrammit ovat vertailukelpoisia keskenään. Siipikairaustulokset on esitetty taulukossa 14 yhdessä CPT-tulosten kanssa.

Taulukosta 14 havaitaan, että rikinpoiston lopputuotteen etu on kalkin kanssa käytettynä ilmeinen, kun verrataan massojen H-niemi3, T-suo4 ja T-suo8 kairaustuloksia. Toisaalta kalkkia sisältävien seosten lujuudenkehitys on ollut sitä hitaampaa mitä enemmän seos on sisältänyt rikinpoiston lopputuotetta.

Suolaveden vaikutus saattaa olla lujuudenkehitystä edistävä tekijä. Erityisen suuri on leikkauslujuuksien ero massoilla T-suo3 ja H-niemi2, joissa on käytetty sementtiä. Suolaveden vaikutusta kannattanee vielä selvittää mahdollisten jatkotutkimusten yhteydessä.

Selvä korrelaatio on havaittavissa massojen lujuudenkehityksen ja niissä tapahtuneiden lämpötilamuutosten välillä (vrt. esimerkiksi T-suo7 kuvassa 16 ja taulukossa 14).

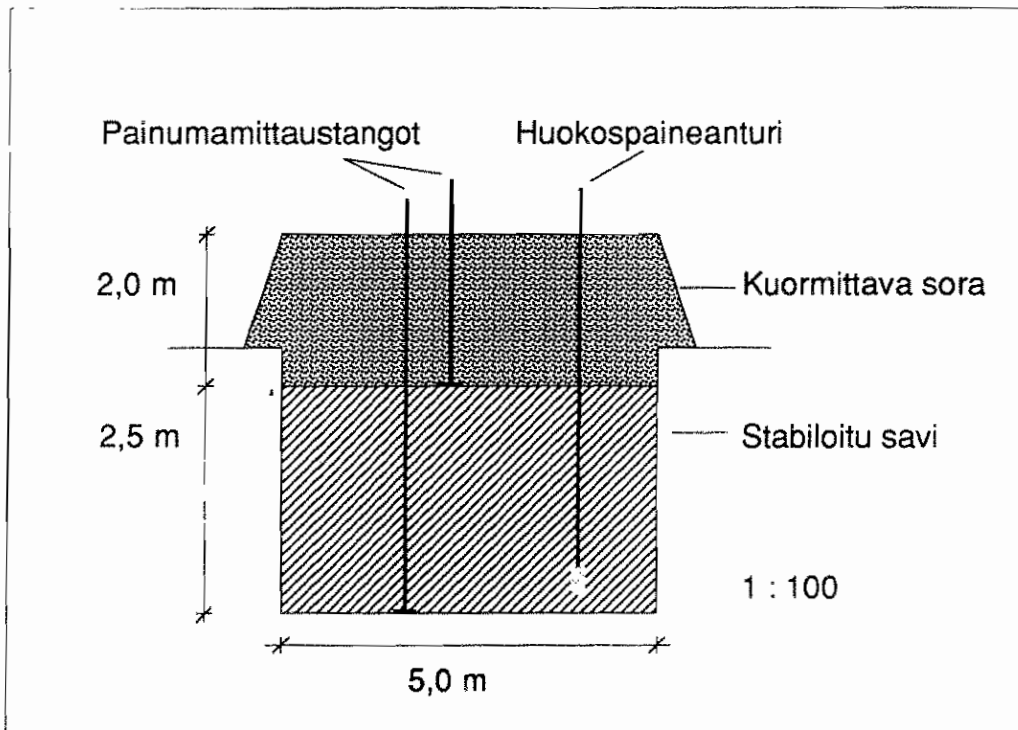
*Taulukko 14. Stabiloitujen massojen leikkauslujuudet CPT- ja siipikairauksin mitattuna (siiven koko 65x130 mm paitsi *:llä merkityissä 80x175 mm). RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=poltettu kalkki, MaKu=terästeollisuuden masuunikuona.*

Koemassa	ikä [vrk]	I. lujuus [kPa]	ikä [vrk]	I. lujuus [kPa]	ikä [vrk]	I. lujuus [kPa]	ikä [vrk]	I. lujuus [kPa]
T-suo3, 30RPL, 7sem, CPT	8	25	18	40	57	70		
- " - , siipikairaus	15	* 45			60	65	182	60
T-suo4/M, 15RPL, 4ka, CPT	14	20	36	30	62	55		
- " - , siipikairaus	15	* 20			65	55	188	55
T-suo6, 15RPL, 7ka, CPT	14	22	-	-	61	20		
- " - , siipikairaus	15	* 22			62	30	187	40
T-suo7, 30RPL, 7ka, 3MaKu, CPT	13	28	37	25	63	35		
- " - , siipikairaus	15	* 25			64	45	191	100
T-suo8, 30ki, 4ka, CPT	5	20	34	20	65	35		
- " - , siipikairaus	15	* 17			66	40	191	60
H-niemi1, 33ki, 7,6ka, CPT	-	-	-	-	72	45		
- " - , siipikairaus	17	* 20			60	60	290	100
H-niemi2, 30ki, 6,6sem, CPT	-	-	-	-	71	120		
- " - , siipikairaus	19	* 45			60	160	289	160
H-niemi3, 4,5ka, 3kuo, CPT	-	-	-	-	71	20		
- " - , siipikairaus	19	* 20			60	20	289	20

5.4.3 Painuma- ja huokospainemittaukset

Kuhunkin koemassaan asennettiin kaksi painumamittaustankoa, joista toisella havaitaan massan alapinnan ja toisella sen yläpinnan painumista. Massoihin painettiin lisäksi kahden metrin syvyyteen huokosvedenpainetta mittaavat anturit. Kolme täytöistä kuormitettiin 2 m korkealla kitkamaapenkereellä. Kokoonpuristumista seurataan mittaamalla painumatankoja ja konsolidaatiotilaa mittaamalla huokosvedenpainetta. Kuvasta 9 saadaan 2 m kitkamaapenkerettä vastaavan 40 kN/m^2 kuormituksen aiheuttamaksi konsolidaatiopainumaksi 2 mm.

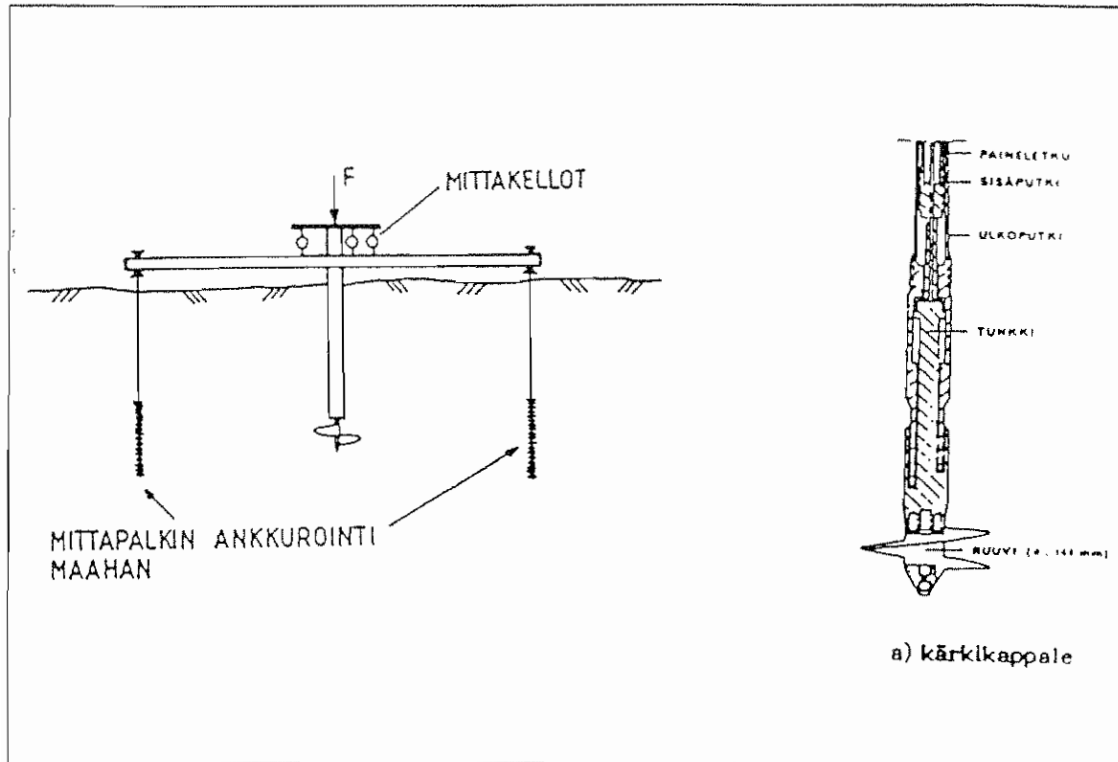
Tarkoitus oli myös tarkkailla massojen routakäyttymistä, mutta leudon talven vuoksi massojen lämpötilat eivät juuri laskeneet pakkasen puolelle. Koekuormitusjärjestelystä on esitetty poikkileikkaus kuvassa 18.



Kuva 18. Stabiloituneen massan koekuormitus.

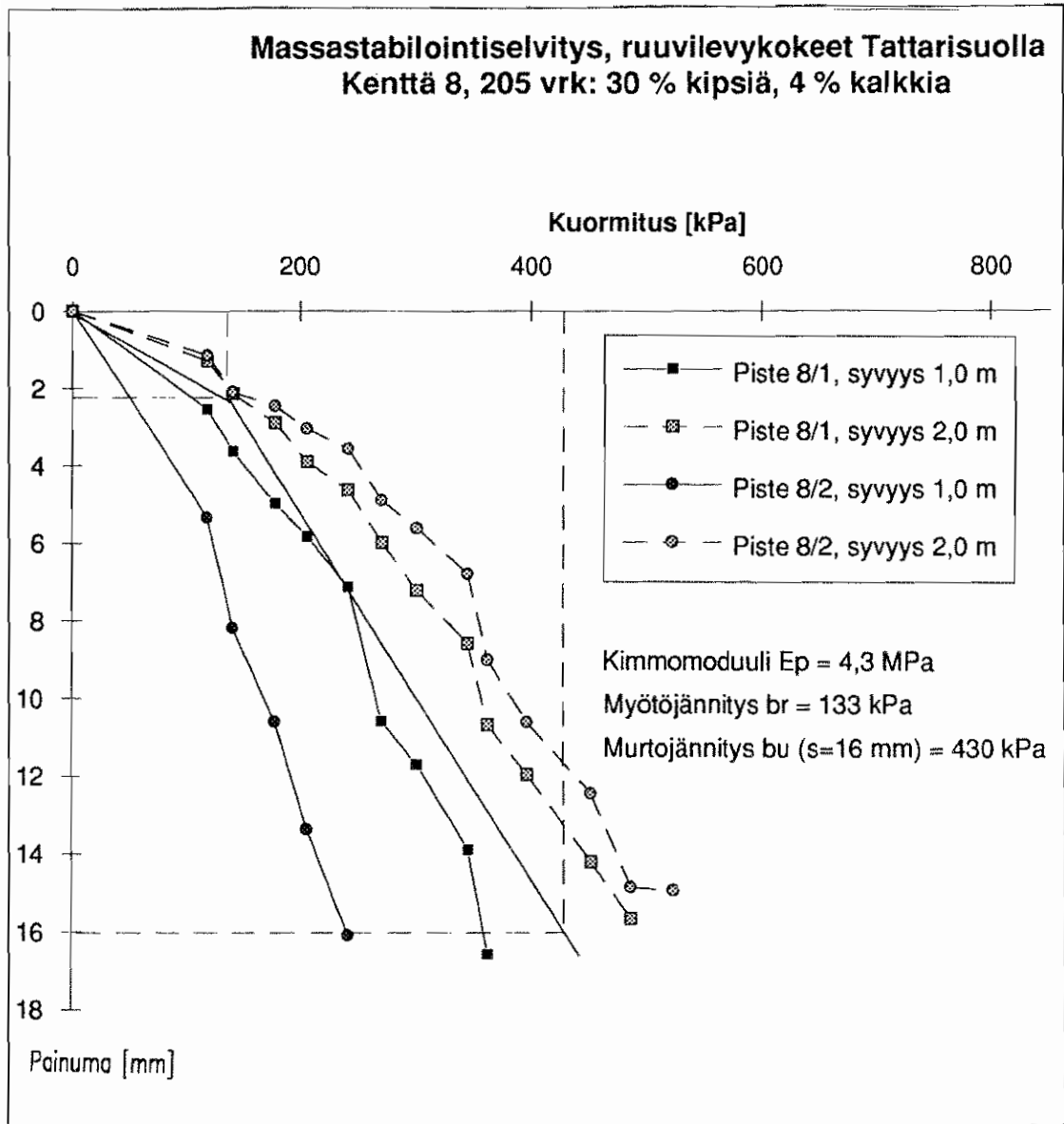
5.4.4 Ruuvilevykokeet

Ruuvilevykuormituslaite on periaatteeltaan levykuormituslaite, jossa kuormituslevy on muotoiltu ruuviksi. Levyn halkaisija on 160 mm. Ruuvilevy voidaan kiertää syvyyteen, jossa koekuormitus halutaan tehdä. Ruuvilevykuormituslaitteen mittapalkki ankkuroidaan maahan vastapainoksi ruuvilevyn kuormitukselle. Kairan varteen kiinnitetyistä mittakelloista luetaan painumalukemat jokaisella kuormitusportaalla tietyin väliajoin. Kuvassa 19 on esitetty ruuvilevykuormituksen periaate ^{7/}.



Kuva 19. Ruuvilevykuormituksen periaate.

Ruuvilevykuormituksen tuloksista voidaan määrittää tutkittavan massan murtojännitys σ_w , myötöjännitys σ_m , kokoonpuristuma s ja kimmomoduuli E_p . Murtojännitys on jännitys, jolla materiaali levyn alla murtuu. Jos murtumista ei tapahdu, esimerkiksi laitteistolla ei saada aikaan riittävää jännitystä, käytetään murtolujuutena arvoa, jolla ruuvin kokonaispainuma on 10 % levyn halkaisijasta. Myötöjännitys määritetään kuormituksen jännitys-painuma -kuvaajasta niin, että myötöjännitys on se jännitys, jolla muodonmuutos kasvaa äkillisesti. Jos selvää myötörajaa ei havaita, pidetään myötöjännityksenä jännitystä, jonka kohdalla painuma ylittää 1 % levyn halkaisijasta [7]. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki ruuvilevykokeen tulosteesta.



Kuva 20. Esimerkki ruuvilevykokeen tulosteesta.

Painumalaskelmissa käytettävä kimmomoduuli voidaan määrittää kaavan 4 mukaan /21/.

$$E_p = w(1-\nu^2) \frac{\Delta\sigma \times \varnothing}{s} \times l, \text{ missä} \quad (4)$$

missä w = muotokerroin = $\Pi / 4$ (pyöreä levy)

ν = pilarin Poissonin luku (valittu arvoksi 0,5)

$\Delta\sigma$ = mitattu nettojännitysväli kimmoalueella [kPa]

$\varnothing$ = levyn halkaisija

l = syvyyskorjauskerroin = 0,87, kun käytetään jäykkää levyä ja kuormitusyvyys > 1,0 m

s = mitattu painuma.

Kun ruuvien halkaisija on 160 mm ja koestussyvyys yli 1,0 m, sieventyy kaava 4 muotoon:

$$E_p = 82 \times \frac{\Delta\sigma}{s}$$

Tattarisuon koemassat kuormitettiin ruuvilevyllä noin 200 vrk:n iässä, jolloin lujittumisen voidaan katsoa pääosin tapahtuneen. Jokainen massa kuormitettiin 1 sekä 1,5 tai 2 m:n syvyydessä kahdesta pisteestä.

Taulukkoon 15 on koottu ruuvilevykokeiden tulokset. Mukana on 0,5 m paksu, pohjaveden pinnan yläpuolelle 0,2 m:n kerroksissa sekalaisesta stabiloidusta savesta tiivistetty pengeri. Pengereen alla on 0,5 m kantavan kerroksen mursketta.

Taulukko 15. Ruuvilevykokeet Tattarisuon koemassoista (RPL=rikinpoiston lopputuote, sem=sementti, ka=kalkki, MaKu=masuunikuona).

Massa	Sideaineet	Kimmomoduuli [MPa]	Myötöjännitys [kPa]	Murtojännitys [kPa]
3	30% RPL + 7% sem	4,5	137	269
4	15% RPL + 4% ka	4	217	483
6	15% RPL + 7% ka	1,3	20	251
7	30% RPL + 7% ka + 3% MaKu	2,3	107	300
8	30% RPL + 4% ka	3,4	240	400
Tiivistetty 0,5 m pengeri		12,3	254	1070

Millekään massalle ei kuormitus-painuma -käyrän perusteella löytynyt selvää murtojännitystä. Tällöin määritetään murtojännitykseksi kuormitus, joka vastaa 16 mm:n painumaa (10 % ruuvien halkaisijasta). Lisäksi massan nro 6 käyrästä ei löytynyt myötöjännitystä vastaavaa taitekohtaa, joten myötöjännitykseksi valittiin kuormitus 1,6 mm:n painuman kohdalta (1 % ruuvien halkaisijasta) /3/.

Koemassoista antoi parhaan kimmomoduulin - 4,5 MPa - sekoitus, jossa oli 30 % rikinpoiston lopputuotetta ja 7 % sementtiä saven kuivapainosta. Lähes samaan tulokseen päästiin seoksella, jossa oli 15 % rikinpoiston lopputuotetta ja 4 % kalkkia saven kuivapainosta. Tällä seoksella olivat lisäksi sekä myötö- että murtojännitys merkittävästi korkeammat kuin ensin mainitulla seoksella. Ylivoimaisesti parhaat arvot mitattiin sekalaisesta massasta tiivistetystä penkereestä. Tämä massa ei kuitenkaan ole vertailukelpoinen muiden koemassojen kanssa, koska muita massoja ei tiivistetty ja ne sijaitsivat pohjaveden pinnan alapuolella.

6 TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU

6.1 Stabiloidun massan geotekniset ominaisuudet

6.1.1 Painumaparametrit

Maastokokeissa käytetyn Tattarisuon saven luonnontilainen vesipitoisuus oli 104 - 146 % ja tilavuuspaino 13,5 - 14,7 kN/m³. Ödometrikokeessa on saven moduuliluvuksi saatu 6,6 - 15,4 ja jännitysekspONENTiksi -0,148 ...-1,902 /11/.

Vastaavat ominaisuudet selvitettiin myös stabiloiduista massoista. Tutkitut näytteet otettiin lapiolla 0,2 m syvyydestä. Ödometrikokeita varten rakennettiin massoista sekä löyhä että tiivis näyte, joissa tilavuuspaino vaihteli välillä 13,87 - 18,53 kN/m³. Näytteenottohetkellä olivat massojen vesipitoisuudet 26,3 - 45,6 %. Ödometrikokeella saatiin stabiloitujen massojen moduuliluvuiksi 21 - 62 keskiarvon ollessa tiivistetyillä näytteillä 38 ja löyhillä näytteillä 23. JännitysekspONENTEIKSI saatiin -0,13 - 0,59 keskiarvon ollessa tiivistetyillä näytteillä 0,4 ja löyhillä näytteillä 0,5. Tulokset näytteistä, joiden kyllästymisaste ödometrikokeessa oli pienempi kuin 86 %, jätettiin huomiotta. Kuvassa 9 on verrattu keskimääräisen tiivistetyn massan konsolidaatiopainumaa luonnontilaisen saven painumiseen. Kuvaajasta nähdään, että stabiloidun massan konsolidaatiopainuma on kymmenesosa stabiloimattoman saven vastaavasta painumasta ja selvästi pienempi kuin syvästabiloidun massan yleensä.

6.1.2 Vedenläpäisevyys

Stabiloitujen massojen vedenläpäisevyyttä tutkittiin laboratoriossa portaittaisella ödometrikokeella. Vedenläpäisevyyskerroin määritettiin sekä tiiviille että löyhille näytteille. Yhtä näytettä lukuunottamatta kaikki vedenläpäisevyyden arvot olivat väliltä $0,64 \cdot 10^{-9}$ - $1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s. Saadut arvot vastaavat hienon siltin vedenläpäisevyyttä, joten massa on painumisnopeutensa puolesta huomattavasti käyttökelpoisempaa kuin alkuperäinen savi. Tyypillinen vedenläpäisevyyden arvo savella on välillä 10^{-10} - 10^{-12} m/s.

6.1.3 Leikkauslujuus

Siipikairalla mitattu Tattarisuon luonnontilaisen saven häiriintymätön leikkauslujuus oli 4,8 - 8,6 kPa. Häiriintyneenä luonnontilainen savi oli lähes juoksevaa. Stabiloitujen massojen leikkauslujuutta mitattiin siipikairauksin ja CPT-kairauksin. CPT-kairaukset skaalattiin vastaavien siipikairaustulosten avulla. Siipikairatut leikkauslujuudet vaihtelivat noin 17 vrk:n lujittumisen jälkeen välillä 17 - 45 kPa, keskiarvona 26,8 kPa. Noin 63 vrk:n lujittumisen jälkeen siipikairatut leikkauslujuudet olivat 20 - 160 kPa, keskiarvona 59,4 kPa ja noin 200 vrk:n lujittumisen jälkeen 20 - 160 kPa, keskiarvona 74,4 kPa.

Taulokossa 16 on vertailtu laboratorio-olosuhteissa stabiloidun massan leikkauslujuutta vastaavaan koerakennuskohteessa työmaalla stabiloidun massan leikkauslujuuteen. Laboratorionäytteen leikkauslujuus on saatu puolittamalla puristuskokeesta saatu murtokuorma. Koerakennuskohteen massan leikkauslujuus on määritetty siipi- ja CPT-kairauksin.

Taulukko 16. Laboratorionäytteen puristuskokeella mitatun leikkauslujuuden vertailu in situ leikkauslujuuteen 14 ja 30 vrk:n iässä mitattuna siipi- ja CPT-kairauksella. (RPL=rikinposton lopputuote, sem=sementti, ka=kalkki)

Koemassa	14 vrk	30 vrk
30RPL,7sem, in situ -leikkauslujuus [kPa]	45	40
Laboratoriomassan leikkauslujuus [kPa]	40	40
15RPL,4ka, in situ -leikkauslujuus [kPa]	20	30
Laboratoriomassan leikkauslujuus [kPa]	18	23
30RPL, 4ka, in situ -leikkauslujuus [kPa]	17	20
Laboratoriomassan leikkauslujuus [kPa]	31	38

Taulukosta 16 nähdään, että koeohjelman sisältämät rinnakkaiset laboratorio- ja maastokoemassat vastaavat kohtuullisella tarkkuudella toisiaan lujuusominaisuuksiensa puolesta.

Stabiloidun massan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin voidaan vaikuttaa huomattavasti sideainaiden laatu- ja määrävalinnoilla, jolloin on mahdollista tuottaa ominaisuuksiltaan juuri halutunlaista materiaalia.

6.1.4 Routivuus

Pelkän rakeisuuskäyrän perusteella arvioituna massat ovat routivia. Tattarisuon koemassoille laboratoriossa tehdyt routanousukokeet osoittivat ISSMFE:n routivuusluokituksen mukaan kaksi massoista (T-suo 6 ja 8) routivuudeltaan merkityksettömiksi, kaksi routivuudeltaan vähäisiksi (T-suo 3 ja 7) ja yhden massan routivuuden kohtalaiseksi (T-suo4). Erot eivät kuitenkaan näytä johtuvan sideaineista tai niiden pitoisuuksista eivätkä liioin savesta. Näiden tutkimusten perusteella jää ainoaksi selitykseksi massan epähomogeenisuus. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa kannattanee kuitenkin tarkentaa tietämystä stabiloitujen massojen routivuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.

6.2 Massastabilointikalusto

Saven massastabiloinnissa voidaan sideaineen sekoitus saveen hoitaa pintastabilointikalustolla, pumppauskalustolla tai rumpu- / murskainsekoituksena. Pintastabilointikalustolla päästään itse stabilointityössä hyvään tehokkuuteen, mikäli stabilointi voidaan tehdä laajalla kentällä niin, että prosessista saadaan jatkuva. Tällöin voidaan stabilointityössä päästä tehokkuuteen 250 m³/h. Menetelmän haittapuolena on suuri tilantarve: mikäli käytössä oleva tila on niin pieni, että saven levittäjä, sideaineen levittäjä, stabilointijyrä ja valmiin massan kuormaaja joutuvat työskentelemään vuorotellen, hidastuu prosessi huomattavasti. Lisäksi raskas stabilointijyrä vaatii hyvin kantavan työalustan.

Ruoppauksen yhteydessä soveltuu ruoppausmassan pumppauskalusto hyvin sideaineen ja ruoppausmassan sekoitukseen. Rajoituksena on ennen muuta pumpun teho siirrettäessä jäykkiä massoja eteenpäin.

Rumpu- ja murskainsekoituksella on erona käytännössä vain se, pyörivätkö sekoitusiivекkeet yksinään vai ovatko ne kiinni pyörivässä sekoitussäiliössä. Tällaisella saven ja sideaineiden sekoitusmenetelmällä on useita etuja:

- prosessista saadaan tehokas, jos massa kulkee jatkuvana virtana sekoituslaitteiston läpi,
- suurienkin sideainemäärien syöttö on nopeaa, tarkkaa ja helposti säädettävissä sekä
- sekoitusasema voidaan rakentaa kiinteäksi, esimerkiksi läjitysalueelle, tai liikkuvaksi, jolloin se voidaan aina siirtää esimerkiksi kuljetusten kannalta edullisimpaan paikkaan.



Rumpu- tai murskainsekoituslaitteistoja ei tähän mennessä ole ollut käytettävissä, mutta parhaillaan on valmistumassa joitakin lupaavia laitekehitysprojekteja. Näiden sekoituslaitteistojen kapasiteetti on annettujen ennakkotietojen mukaan 50 - 200 m³/h.

6.3 Massastabiloinnin käyttäminen maanrakennuksessa

6.3.1 Käyttökohteita

Ylijäämämassojen vastaanottopaikoilla voidaan saven ja muiden liettyvien massojen läjitettävyyttä parantaa massastabiloinnilla siten, että on mahdollista rakentaa esimerkiksi täyttömäki tarkoituksenmukaisin luiskankaltevuuksin käyttäen kuitenkin kevyempää kitkamaasta rakennettua kenno-rakennetta kuin nykyisissä täyttömäissä (kts. kuva 1) tai jopa kokonaan ilman tukirakenteita.

Kaivumassojen stabilointi heti rakennuspaikalla on taloudellisesti kannattavaa, mikäli tuote voidaan käyttää lähiympäristössä. Käyttökohteita, joihin stabiloidun massan geotekniset ominaisuudet soveltuvat, ovat esimerkiksi:

- melupenkereet,
- maisemointitäytöt,
- massanvaihto,
- pihatäytöt ja
- kunnallisteknisten kaivantojen täytöt.

Stabiloidun massan käyttäminen liikennealueiden pengerrakenteisiin ja rantatäyttöihin vaatii vielä lisäselvityksiä.

Käytettäessä stabiloitua massaa viherrakenteiden yhteydessä tulee se erottaa varsinaisesta kasvukerroksesta esimerkiksi kitka- tms. stabiloimattomalla maalla korkean emäksisyytensä ja johtolukunsa vuoksi (kts. kohta 4.3.3).

Koerakentamiskohteissa havaittu haitallisten aineiden muuttuminen vaikealiukoisempaan muotoon stabiloidussa massassa osoittaa massastabiloinnin lupaavaksi menetelmäksi myös saastuneiden maamassojen käsittelyssä.

Sideainevalintojen avulla voidaan stabiloidun massan geoteknisiä ominaisuuksia muuttaa kunkin käyttökohteen vaatimusten mukaisiksi.

6.3.2 Kustannukset

Rakennuskohteessa syntyvät ylijäämäsavet ajetaan nykyään lähes poikkeuksetta viranomaisten osoittamalle läjitysalueelle, yleensä täyttömäkeen. Rakennusviraston syksyllä 1992 toteuttamassa rakennuskohteessa aiheutui ylijäämäsavesta kustannuksia seuraavasti:

- kaivu ja 11 km ajo läjitysalueelle		32,45 mk / savi-m ³
- kaatopaikkamaksu	160 mk / 9 m ³	17,78 mk / savi-m ³
<u>Yhteensä</u>		<u>50,23 mk/savi-m³</u>

Jos ylijäämäsavet olisi käsitelty työmaalla massastabilointikalustolla ja sideaineina olisi käytetty rikinpoiston lopputuotetta 30 % sekä kalkkia 4 % saven kuivatilavuuspainosta, millä sideainemäärällä päästiin Tattarisuon savella leikkauslujuuteen 60 kPa, olisi stabiloinnista aiheutunut kustannuksia seuraavasti:

- kaivu + lyhyt siirto työmaalla + sekoitus			16,00 mk / savi m ³
- poltettu kalkki	460 mk/tn	0,03 tn/savi m ³	12,88 mk / savi m ³
- rikinpoiston lopputuote	0	0,2	0,00 mk / savi m ³
- sideaineiden rahti	40	0,23	9,20 mk / savi m ³
<u>Yhteensä</u>			<u>38,08 mk / savi m³</u>

Mikäli stabiloitu massa olisi voitu käyttää samassa kohteessa täyttöihin, olisi siis saavutettu neljänneksen säästö ylijäämämassan aiheuttamissa kustannuksissa ja lisäksi säästetty täyttömateriaalin hankinnassa stabiloidulla kaivumassalla korvautuvan määrän verran. Stabilointityön hinta perustuu massastabilointilaitteistoa kehittävän stabilointiurakoitsijan alustavaan kustannusarvioon.

6.4 Stabiloidun massan ympäristövaikutukset

6.4.1 Ympäristölle haitalliset yhdisteet

Stabiloiduista massoista liukenevia haitallisten aineiden määriä tutkittiin typpihappo- ja vesi-uutolla. Tuloksista havaittiin, että stabilointi muuttaa haitallisia yhdisteitä niukkaliukoisempaan muotoon, koska niiden liukoisuudet olivat lähes poikkeuksetta alhaisemmat kuin luonnontilaisella Tattarisuon savella. Lääkintöhallitus sallii yleiskirjeessään n:o 1637/77 maanviljelyskäyttöön soveltuvalla jätevesilietteelle huomattavasti suuremmat raskasmetallien kokonaispitoisuudet kuin stabiloiduista massoista mitatut. Taulukossa 17 on vertailtu maanviljelyskäyttöön soveltuvan jätevesilietteen sallittuja raskasmetallipitoisuuksia koemassoista mitattujen raskasmetallipitoisuuksien keskiarvoihin.

Taulukko 17. Lääkintöhallituksen yleiskirjeessään n:o 1637/77 maanviljelyskäyttöön soveltuvalla jätevesilietteelle sallimat raskasmetallien kokonaispitoisuudet ja stabiloitujen massojen keskimääräiset typpihappouuttoiset raskasmetallien kokonaispitoisuudet.

Pitoisuus	Cr [ppm]	Cu [ppm]	Ni [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]
Jätevesilietteen sallittu maksimipitoisuus	1 000	3 000	500	1 200	5 000
Koemassojen keskimääräiset pitoisuudet	129	125	2	7	149

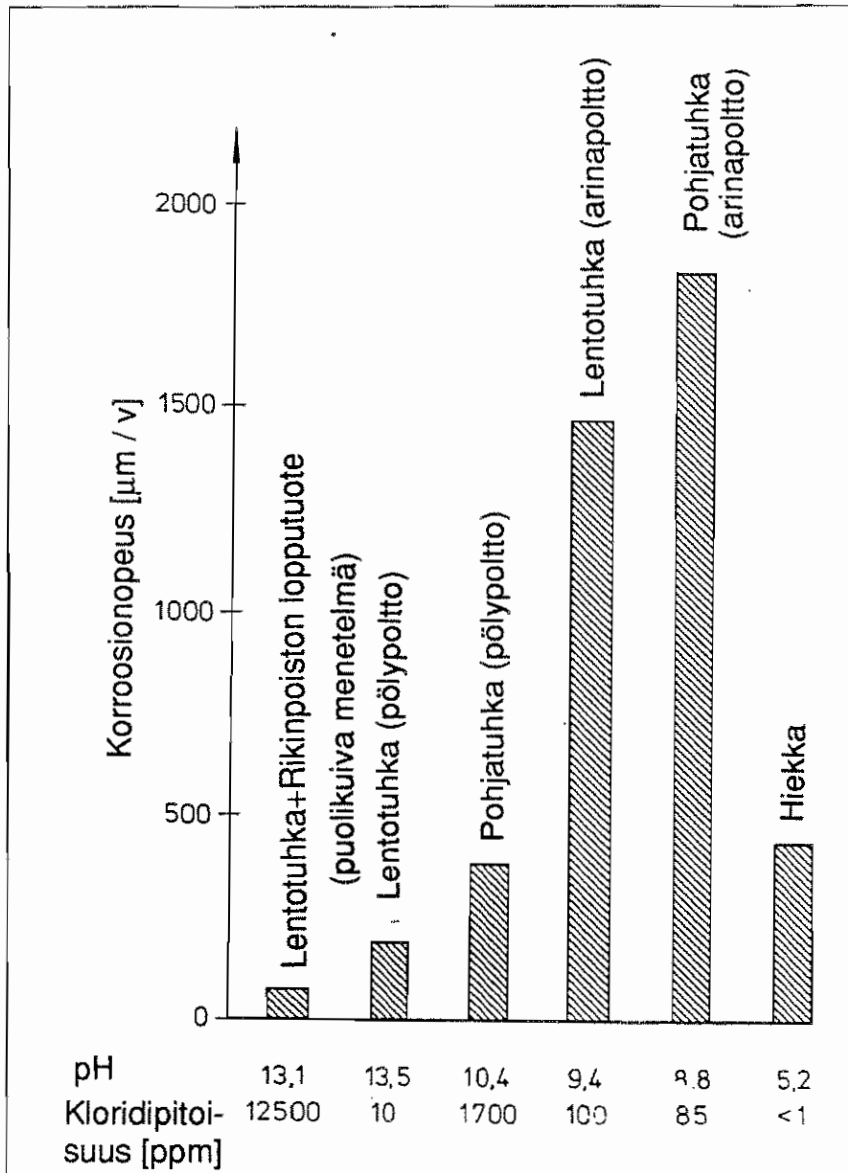
Lääkintöhallitus sallii siis elintarvikkeiden kasvatuksessa käytettävälle jätevesilietteelle 8 - 250 -kertaiset raskasmetallien kokonaispitoisuudet verrattuna stabiloiduista koemassoista mitattuihin. Lisäksi huomiotta jää raskasmetalliyhdisteiden helppo- tai vaikealiukoisuus. Jatkotutkimuksissa sekä normeja ja raja-arvoja kehitettäessä onkin syytä ottaa huomioon haitallisten aineiden eri yhdisteillä oleva erilainen liukoisuus.

6.4.2 Korroosiovaikutus

Teräksen korroosiota ei esiinny, mikäli sen ympäristön pH on yli 11. Stabiloidun saven pH riippuu sideainepitoisuuksista sekä rikinpoiston lopputuotteen ominaisuuksista. Normaalisti kalkkistabiloidun maan pH on noin 12. Stabiloidussa massassa tapahtuva karbonatisoituminen ilman hiilidioksidin reagoidessa kalsiumhydroksidin kanssa laskee massan pH:ta niiltä osin kuin massa on kosketuksissa ilman kanssa.^{/8/} Pintastabiloitujen koemassojen pH vaihteli välillä 9,1 - 9,9.

Stabiloidusta massasta liukenevat kloridit aiheuttavat korroosiota emäksisestä ympäristöstä huolimatta. Betonilla pidetään terästen korroosion alkamisen raja-arvona pitoisuutta 300 ppm Cl⁻ betonin painosta laskettuna ^{/8/}. Jos stabilointiin on käytetty rikinpoiston lopputuotetta 30 % saven kuivapainosta, saven vesipitoisuus 110 % ja rikinpoiston lopputuotteen CaCl₂·4H₂O -pitoisuus on 11,4 p-% (kts.kpl 2.3), sisältää stabiloitu massa 6 800 ppm klooria. Jos rikinpoiston lopputuotteen osuus jätetään 15 %:iin, on massan klooripitoisuus 3 200 ppm.

Laboratoriotutkimuksissa on selvitetty teräksen korroosiota kivihiilivoimalaitoksen jätetuotteissa. Kuvassa 21 on esitetty pH:n ja kloridipitoisuuden yhteisvaikutus teräksen korroosioon. Vertailukohtana on käytetty teräksen korroosiota hiekassa. Kuvaajien perusteella voidaan arvioida, että rikinpoiston lopputuotteella stabiloitu savi aiheuttaa emäksisyydestään huolimatta teräksen korroosiota.^{/8/}



Kuva 21. pH:n ja kloridipitoisuuden yhteisvaikutus teräksen korroosioon.

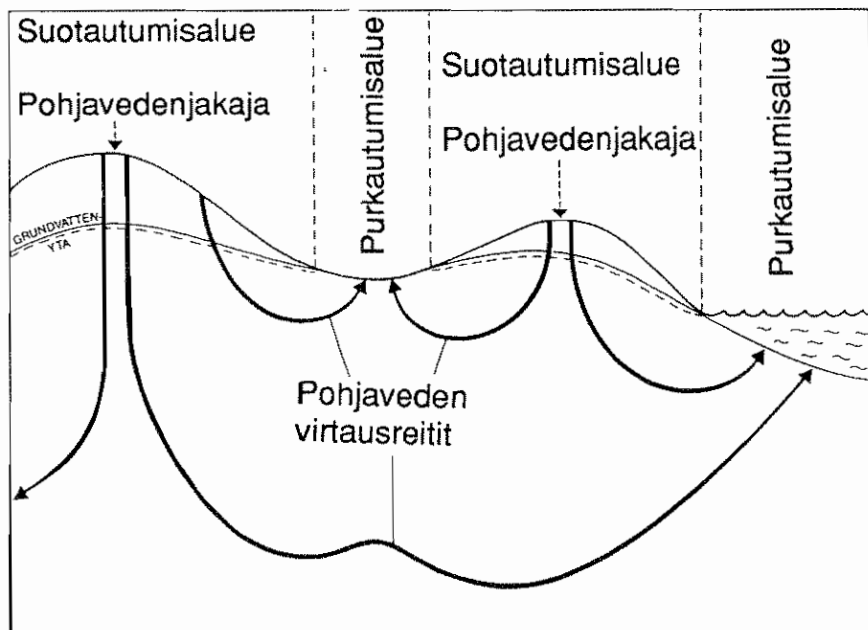
6.4.3 Ympäristövaikutusten pienentäminen suunnittelun avulla

Luvussa 4.3.4 todettiin stabiloidusta savesta veteen liukenevien haitallisten aineiden määrät hyvin pieniksi. Mikäli olosuhteet sitä edellyttävät, esimerkiksi saastuneiden maamassojen ollessa kyseessä, voidaan stabiloidun massan pitkäaikaisiakin ympäristövaikutuksia pienentää edelleen rakenteen ja sen sijoituksen suunnittelun avulla. Ympäristövaikutusten hoitaminen ratkaisulla, joka perustuu suotovesien jatkuvaan keräilyyn ja puhdistukseen, ei anna riittävää varmuutta siitä, että haittavaikutukset hallitaan myös pitkällä aikavälillä. Kussakin ratkaisussa on otettava huomioon, että

- rakenteen läpi suotautuva vesimäärä on minimoitava,
- rakenteen on oltava fysikaalisesti pysyvä (painumaerot, vakavuus ...) ja
- rakenne ei saa vaatia hoitoa tai tarkkailua.

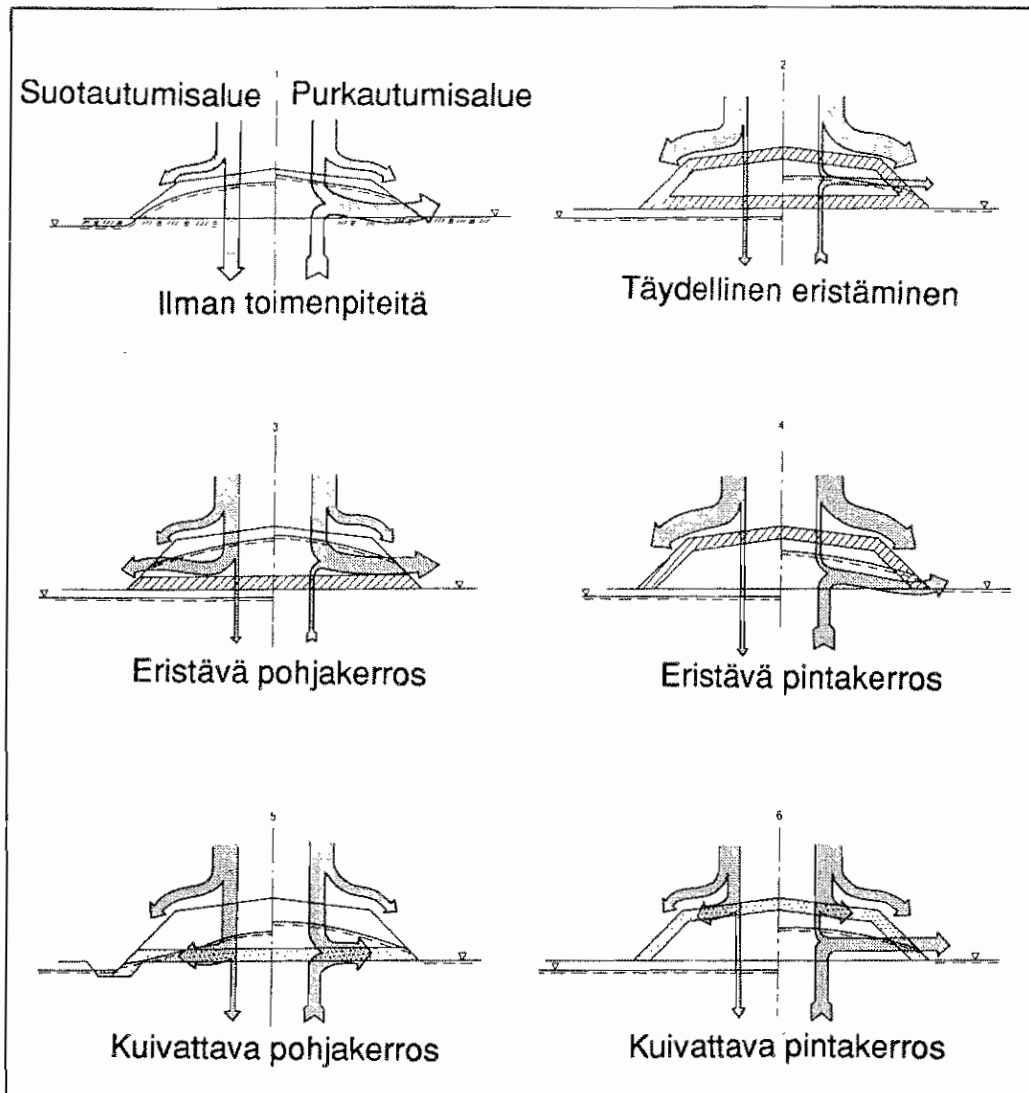
Stabiloidun savirakenteen muotoilu ja sijoitus on valittava siten, että pinta- ja vajovedet eivät ohjautu rakenteeseen. Sijoituksen valinnassa on otettava lisäksi huomioon pohjavesipinnan korkeusasema sekä veden virtaussuunta. Kuvassa 22 on esitetty, miten maaston topografia vaikuttaa pohjaveden liikkeisiin. Pääsääntöisesti suotovesi puhdistuu sitä perusteellisemmin, mitä pitemmän matkan se kulkee maakerroksissa. Muut suojaustoimenpiteet valitaan sen mukaan, missä määrin stabiloidun kerroksen läpi suotautuva vesi on pintavettä ja missä määrin pohjavettä sekä minkälalaisia suotovesiä on odotettavissa tai voidaan sallia syntyvän.

Kuvasta 22 havaitaan, että sijoittamalla stabiloitu savirakenne mahdollisimman lähelle pohjavedenjakajaa saadaan rakenteen läpi suotautuva vesi virtaamaan mahdollisimman pitkä matka maakerroksissa tai kalliossa, jolloin veden puhdistuminen on perusteellisempaa.



Kuva 22. Maaston topografian vaikutus pohjaveden virtaukseen.^{24/}

Stabiloidun savirakenteen vedenläpäisevyys on erittäin pieni, mikäli rakenne tiivistetään hyvin ja suunnitellaan siten, että se säilyy ehjänä myös mahdollisten painumien edetessä sekä erilaisissa kuormitustilanteissa. Tiivistämisen lisäksi suotovesimääriä voidaan pienentää ohjaamalla vajo- ja pohjaveden virtausta rakenteen ohi joko vettä läpäisemätömällä tai hyvin vettäläpäisevällä materiaalilla. Erilaisten rakenneratkaisujen vaikutuksia suotovesimääriin on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Erilaisten rakennerratkaisujen vaikutus stabiloidun savikerroksen läpi suotautuviin vesimääriin./24/

7 YHTEENVETO

Rakennustoiminnassa syntyvät ylijäämämassat muodostavat kasvavan ongelman pääkaupunkiseudulla. Massojen kuljetuksista ja läjityksestä aiheutuu merkittävä kustannus rakennustoimintaan, ja täyttöalueista on jatkuva pula. Läjityksen kannalta ongelmallisimpia ovat liettyvät maalajit.

Tutkimuksessa selvitettiin mahdollisuuksia pienentää ylijäämäsavista aiheutuvia kustannuksia parantamalla saven geoteknisiä ominaisuuksia massastabiloinnilla. Lisäksi tutkittiin erilaisten jätetuotteiden vaikutuksia stabiloidun massan ominaisuuksiin.

Tutkimuksissa käytettiin pääosin Helsingin Tattarisuon savea. Sideaineina käytettiin sementtiä ja poltettua kalkkia. Lisäaineina kokeiltiin kivihiilivoimalaitoksen lentotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta, lannoiteteollisuuden jätekipsiä sekä terästeollisuuden masuunikuonaa. Tavoitteena oli käyttää mahdollisimman pieniä sideainepitoisuuksia hyödyntämällä lisäaineiden mahdollisesti lujuutta lisäävä vaikutus.

Tutkimus jakaantui laboratoriokokeisiin, joissa selvitettiin tutkittavalle savelle soveltuvia side- ja lisäaineyhdistelmiä, sekä koerakennuskohteeseen, jossa tutkittiin edellytyksiä työmaaolosuhteissa tapahtuvalle massastabiloinnille sekä stabiloidun massan geoteknisiä ominaisuuksia.

Laboratorionäytteet valmistettiin sekoittamalla valitut side- ja lisäainemäärät saveen laboratoriosekoittimella. Massa sullottiin vakiomenettelyllä ST-II -näyteputkiin ja näytteiden annettiin lujittua 7 - 30 vrk:a. Näytteitä säilytettiin lujittumisen aikana huoneenlämpöisessä vedessä. Lujittumista ja sen nopeutta seurattiin koestamalla eri ikäisiä näytteitä yksiaksiaalisin puristuskokein.

Laboratoriossa sekä sementti että poltettu kalkki toimivat hyvin sideaineina. Lisäaineista lentotuhkalla, jätekipsillä ja rikinpoiston lopputuotteella oli lujuutta parantava vaikutus ainakin poltetun kalkin kanssa käytettynä. Neljän prosentin kalkkipitoisuudella (saven kuivapainosta) 4,5-kertaistettiin massan 30 vrk:n yksiaksiaalinen puristuslujuus lisäämällä rikinpoiston lopputuotteen osuutta 0 %:sta 30 %:iin leikkauslujuuden kasvaessa 8,5-kertaiseksi alkuperäisen saven leikkauslujuuteen verrattuna.

Käytettäessä sideaineena poltettua kalkkia oli massan lujuuskehitys hieman hitaampaa ja massa hieman plastisempaa kuin sideaineen ollessa sementtiä. Koerakennuskohteessa päätettiin sementin ja poltetun kalkin lisäksi käyttää rikinpoiston lopputuotetta sekä terästeollisuuden masuunikuonaa.

Koerakentaminen tapahtui Helsingin Tattarisuolla ja Herttoniemen satama-alueella. Sideaineiden ja saven sekoittamista kokeiltiin sekoittavalla betoniautolla, mutta varsinaiset koemassat sekoitettiin laajalle kentälle ohueksi kerrokseksi levitettynä pintastabilointikalustolla. Stabiloidut massat läjitettiin tarkoitusta varten kaivettuihin kuoppiin 2 - 3 m paksuksi kerrokseksi. Läjitys tapahtui veteen - Herttoniemessä meriveteen, koska kuopat oli kaivettu louheesta tehtyyn rantatäyttöön. Massaa ei tiivistetty.

Betoniauto ei soveltunut sekoitukseen, koska massa jäykistyi jo säiliössä niin, että sen ulos saaminen oli lähes mahdotonta. Sekoitus sinänsä onnistui pyörivässä rummussa hyvin. Pintastabilointikaluston sideaineen levitin ei täysin soveltunut toimimaan löysässä savessa. Sekoittamiseen käytetty stabilointijyrsin teki sekoitustyön riittävän perusteellisesti kahdella yliajo-kerralla. Jyrsimen haittapuolena on sen edellyttämä tasainen ja hyvin kantava alusta. Menetelmän haittapuolena on lisäksi tehottomuus, jos käytettävissä ei ole hyvin laajaa sekoituskenttää. Toimivampi ratkaisu olisi esimerkiksi rumpu- tai murskainsekoitusperiaatteella toimiva sekoitusasema, joka olisi jatkuvatoiminen ja mahdollisesti siirrettävissä toimimaan itse rakennuskohteessa.

Koemassojen lujittumisreaktioiden etenemistä seurattiin lämpötilamittauksin. Näiden perusteella havaittiin kalkin sammumis- ja ioninvaihtoreaktioiden loppuvan noin 10 vuorokauden kuluttua massan sekoittamisesta ja massan alkavan jäähtyä. Vielä 60 - 100 vuorokauden kuluttua sekoittamisesta tapahtui massoissa lämpöä vapauttavia lujittumisreaktioita. Lujittuvien massojen lämpötila oli kuitenkin lähes poikkeuksetta alle + 10 °C, mikä on syytä ottaa huomioon harkittaessa stabiloituvuuskoenäytteiden lämpökäsittelyä laboratoriossa.

Koemassojen lujuuskehitystä seurattiin kairauksin. Noin 17 vuorokauden iässä massojen leikkauslujuus oli keskimäärin nelinkertaistunut alkuperäisen saven leikkauslujuudesta. Noin 63 vrk:n lujittumisen jälkeen oli massojen keskimääräinen leikkauslujuus 9-kertainen alkuperäiseen nähden ja noin 200 vrk:n iässä keskimäärin 11-kertainen.

Koemassojen kuormitus-kokoonpuristumiskäyttäytymistä tutkittiin ruuvilevykokein noin 200 vrk:n iässä. Näiden perusteella määritettiin massoille myötöjännitys, murtojännitys sekä painumalaskelmissa käytettävä kimmoduuli. Massojen myötöjännitys vaihteli välillä 20 - 254 kPa keskiarvon ollessa 144 kPa ja murtojännitys välillä 251 - 483 kPa keskiarvona 340 kPa. Sekalaisesta stabiloidusta massasta tiivistettiin kerroksittain 0,5 m paksuinen penger pohjaveden pinnan yläpuolelle. Tästä penkereestä ruuvilevykokeella mitattu myötöjännitys oli 254 kPa ja murtojännitys 1070 kPa. Koemassojen kimmoduuli vaihteli välillä 1,3 - 4,5 MPa keskiarvona 3,1 MPa. Sekalaisista massoista tiivistetyn penkereen kimmomoduliksi mitattiin 12,3 MPa. Painumaominaisuuksien selvittämiseksi kuormitettiin kolme koemassaa myös kahden metrin korkuisella kiviainespenkereellä ja käynnistettiin painuma- ja huokosvedenpainetarkkailu, joka on edelleen käynnissä.

Laboratoriossa tutkittiin koerakentamiskohteen massojen painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuuksia, routivuutta sekä ympäristövaikutuksia. Ödometrikokein todettiin stabiloidun massan konsolidaatiopainuman olevan kymmenesosa alkuperäisen saven konsolidaatiopainumasta. Stabiloidun massan vedenläpäisevyys vastasi hienon siltin vedenläpäisevyyttä. Rakeisuuskäyrän perusteella arvioituna stabiloidut massat ovat routivia. Routauskokeissa todettiin kahden koemassan routivuus merkityksettömäksi, kahden routivuus vähäiseksi ja yhden kohtalaiseksi. Lujittumisreaktiot saavat aikaan haitallisten metallien muuttumisen niukkaliukoisempaan muotoon. Haitallisten aineiden liukoisuus stabiloidusta massasta oli pienempi kuin alkuperäisestä savesta.

Massastabilointia käyttämällä voidaan läjitysalueilla luopua saven läjityksestä louhealtaisiin. Massaa voidaan käyttää myös maanrakennusmateriaalina esimerkiksi melupenkereissä, maisemointi- ja pihatäytöissä, massanvaihdoissa sekä kunnallisteknisten kaivantojen täytöissä.

Alustavien kustannustietojen mukaan massastabiloinnin kustannukset ovat neljänneksen pienemmät kuin saven kuljettamisen ja läjittämisen kaupungin läjitysalueelle. Lisäksi syntyvällä tuotteella voidaan korvata osa ostettavasta täyttömateriaalista.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että massastabiloinnilla voidaan vaikuttaa saven geoteknisiin ominaisuuksiin siten, että tuloksena on kustannussäästöjä ja ongelmallisen ylijäämämateriaalin sijasta helposti käsiteltävä lujittuva massa. Stabiloidun massan ominaisuuksia voidaan säädellä muuntelemalla stabilointiaineita, niiden yhdistelmiä ja pitoisuuksia.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Ahti, A. (Satamalaitos, Uudisrakennustoimisto), Puhelinkeskustelu 4.1.1993.
- /2/ Assmuth, T., Strandberg, T., Joutti, A. & Kalevi, K., Kemiallisesti saastuneen maaperän tutkimusmenetelmät. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A nro 97. Helsinki 1992.
- /3/ Broms, B. & Boman, P., Stabilization of Soil with Lime Columns. Design Handbook, second edition. Royal Institute of Technology. Stockholm 1978.
- /4/ Chamberlain, E.J., Comparative Evaluation of Frost-Susceptibility Tests. Transportation Research Record No. 809. 1981.
- /5/ Csathy, T.I. & Townsend, D.L., Pore Size and Field Frost Performance of Soils. HRB, Bull. 1962.
- /6/ Ekonon selvitys EP-65562-03, HKE, Rikinkoistojätteen kaatopaikkasijoitusmahdollisuudet. 21.1.1987.
- /7/ Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun- ja lujuudenvalvontamenetelmät. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 30. 1982.
- /8/ Hartlén, J., Elander, P., Kullberg, S., Lundgren, T. & Rosén, B, Restprodukt från våt-torr rökgasavsvavling. Statens geotekniska institut. Rapport till REFORSK. 22.12.1986.
- /9/ Hautala, A., Kalkkipilarimenetelmän käyttö ratapenkereen vahvistamisessa humuspitoisessa maassa. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. 1981.
- /10/ Havukainen, J., Hämäläinen, A. & Latvala, A., Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. Geoteknisen osaston tiedote n:o 45. Helsinki. 1987.
- /11/ Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto, Tattarisuon pumppaamot, pohjarakennussuunnitelma, 4075 / 15.11.1989.
- /12/ Herzog, A. & Mitchell, J., Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. Highway Research Record, No 36. 1963.

- /13/ Höbedä, P., Jacobsson, T. & Viman, L., Undersökning av avsvavlingsprodukter från halvtorr process och flygaskor från två kolpulvereldade värmeverk som vägmateriel - en laboratiestudie. Statens väg- och trafikinstitut (VTI), meddelande nr 285. 1986.
- /14/ Isoaho, S. & Valve, M., Vesikemian perusteet. Otakustantamo. 1986.
- /15/ 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.
- /16/ Jeppesen, K.G., Affaldshåndtering og anvendelse, Langtidsvirkning på beton ved iblandning af afsvovlingsprodukter. Institutet for Mineralindustri. 1989.
- /17/ Jones, R.H. & Lomas, K.J., The frost susceptibility of granular materials. Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost July 17.- 22. 1983. Fairbanks, Alaska.
- /18/ Keinonen, L., The physical basis of growth of ice lenses in soils. Proc., Symposium on Frost Action on Roads. Oslo. 1973.
- /19/ Komi, J. (Satamalaitos / Asiantuntija- ja viestintäryhmä), Puhelinkeskustelu 12.8.1992.
- /20/ Kujala, K., Factors Affecting Frost Susceptibility and Heaving Pressure In Soils. Acta Universitatis Ouluensis C 58. 1991.
- /21/ Lahtinen, P. & Parkkinen, E., Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Tielaitoksen selvityksiä 46 / 1992. Helsinki. 1992.
- /22/ Lappalainen, V., Eerola, M. & Patrikainen, P., Geomekaniikka I, luku 1: Katsaus geologiaan. RIL 157 / 1. 1985.
- /23/ Leminen, K & Rathmayer, H.: Heikosti kantavan maapohjan syvästabilointi kalkkipilareilla, Rakennustaito nro 73 (1978) 20.
- /24/ Lundgren, T. & Elander, P., Deponering av avfall från kol- och torveldning, Handledning. Statens geotekniska institut. Rapport no 28. Linköping. 1986.
- /25/ Nieminen, P., Lentotuhkan ja kipsin käyttömahdollisuudesta ja vaikutuksesta maalajien lujuusominaisuuksiin. Filosofian lisensiaattitutkielma. Turun yliopisto. 1977.

- /26/ Puntti, E. (Ympäristökeskus / Ympäristönvalvontayksikkö), Puhelinkeskustelu 13.8.1992.
- /27/ Puutarhaliiton maisemavaliokunnan suositus viherrakennusalueen ravinne-analyysin ohjeiksi. 1989.
- /28/ Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M., Geotekniikka 464. Otakustamo. 1979.
- /29/ Reed, M.A., Lovell, C.W., Altschaeffl, A.G. & Wood, L.E., Frost-heaving rate predicted from pore-size distribution. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16. 1979.
- /30/ Viatek Oy & Oulun yliopisto, Kalkki- ja sementtipilareiden kehittämisprojekti. Tutkimusraportti. 1990.
- /31/ Viatek Oy & Oulun yliopisto: Stabilointiohje, Sideaineiden käyttö syvästabiloinnissa, (Ei julkaistu).
- /32/ Viatek Oy & Suomen Geotutkimus Oy: Voimalaitostuhkien hyötykäyttö, Esi-tutkimus maarakennuskäytöstä. Tutkimusraportti. 1991 (Ei julkaistu).
- /33/ VTT / Geotekniikan laboratorio, Salmisaaren hiilivoimalaitoksen rikinpoisto-tuotteen käyttö, merisijoitus. Loppuraportti. 1986.
- /34/ Åhnberg, H. & Holm, G., Kalkpelarmetoden. Statens Geotekniska Institut. Rapport No 31. Linköping. 1986.

Liite 1: Tattarisuon koealue

