

VIIKIN SAVIKATU

**Harri Mäkelä
Harri Höynälä
Hannu Halkola
Ari Kettunen**



Julkaisu 81/2000

VIIKIN SAVIKATU

**Harri Mäkelä
Harri Höynälä
Hannu Halkola
Ari Kettunen**

TIIVISTELMÄ

Tutkimus on jatkoa Helsingin kaupungin rakennusviraston ja kiinteistöviraston geoteknisen osaston selvityksille kehittää saven hyötykäyttöä massastabiloinnilla. Aikaisemmin on aiheesta julkaistu tiedotteet GEO 61/1993 ”Ylijäämänsaven massastabilointi” ja GEO 64/1994 ”Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla”. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää massastabiloidun saven soveltuvuutta katurakenteen tukikerrokseen Viikin ekorakennusalueella Tilanhoitajankaaressa. Ennen kohteen rakentamista tehtiin Viikin savelle perusteelliset ennakkokokeet laboratoriossa.

Laboratoriokokeissa tutkittiin eri sideaineilla ja seossuhteilla stabiloitujen koe-kappaleiden puristuslujuuksia, joiden perusteella kartoitettiin parhaiten soveltuvat sideaineet ja seossuhteet. Stabiloidun saven routakestävyyttä tutkittiin mm. routa-nousu- ja jäädytys-sulatus-kokein. Stabiloidun saven routakestävyys kannalta potentiaalisiksi sideainevaihtoehdoiksi osoittautuvat jauhettu masuunikuona-sementti-seos (70:30) ja sementti-kalkki-seos (95:5) sekä sivutuotepohjainen E1-sideaine. Näitä kolmea sideaineyhdistelmää käytettiin koerakenteissa ja sideainemääränä 14 paino-%:a saven massasta.

Ennen varsinaista koerakentamista tehtiin Viikin alueella esikoe, jolla selvitettiin sideaineen annostelua ja sekoitusta saveen ja tämän vaikutusta lopputuotteen tasalaatuisuuteen, lujuuteen ja mitoituksessa käytettävään moduuliarvoon. Koerakenne Viikissä muodostui kolmesta eri rakenteesta ja referenssiosasta. Stabiloitua savea käytettiin kadun tukikerroksessa ja vaihtelevien pohjasuhteiden takia kaikkien osuuk-sien alle rakennettiin 200 mm:ä paksu suodatinkerros varmistamaan tasavertaiset kuivatusolosuhteet. Savikerroksen tiivistämisen jälkeen ilmeni kuumasta kesäilmasta johtuen rakenteen pintahalkeilua voimakkaan kuivumisen takia. Halkeilu estettiin suojaamalla rakenne ja kastelemalla sitä.

Koerakenteen kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa seurattiin mittausantureilla ja päällysyteen pinta vaaittiin rakenteen jäätyessä ja sulaessa, jolloin saatiin selville roudan vaikutukset. Levykuormituskokeilla saadut kantavuustulokset roudan sulamisvaiheessa ja kesäolosuhteissa ovat osoittaneet rakenteen toimivuuden.

Tutkimuksen keskeisimmät tulokset ovat, että stabiloidun kerroksen lujuus on suunnitellun mukainen ja kantavuuden alenemaa jäätymisen ja sulamisen vaikutuksesta ei ole tapahtunut. Stabiloidun saven hyötykäytössä tulee jatkossa kehittää edelleen seuraavia asioita:

- Sideaineiden sekoitus ja sekoituksen määrä sekä tasalaatuisuuden tarkkailu
- Sekoituslaitteisto
- Työvaiheet ja massan tiivistäminen rakenteeseen
- Saven ottotekniikka, sideaineen sekoittaminen, saven kuivumisen hallinta kesän lämpiminä päivinä rakennettaessa ja tämän vaikutukset kantavuuteen.

SAMMANDRAG

Forskningen är en fortsättning på Helsingfors stads byggnadskontors och fastighetskontors geotekniska avdelnings utredning att utveckla utnyttjandet av lera. Tidigare har man publicerat meddelandena GEO 61/1993 "Mass-stabilering av över-skott lermassor" (på finska) och GEO 64/1994 "Att förbättra lerans egenskaper med mass-stabilering" (på finska). Avsikten med denna forskning har varit att utreda lämpligheten av masstabiliserad lera för gatans stödlager i Viks ekobyggnadsområdet. Före byggandet testades leran grundligt på förhand i laboratoriet.

Tryckhållfastheten hos masstabiliserad lera testades i laboratoriet för att upptäcka de bästa bindemedlarna och inblandningsrelationerna. Den masstabiliserade lerans beständighet mot tjällyftning undersöktes med tjällyftnings- och frysning-avfrostningstester. De lämpligaste bindemedelsblandningarna var masugnsslaggce-mentblandning (70:30), cementkalkblandning och biproduktbottnad blandning E1 enligt frostbeständighet.

Före själva byggandet gjordes förhandstest, som klarade upp bindemedels in-blandningsproportion och inblandning med lera och deras verkan på homogeniteten och hållfastheten av masstabiliserad lera samt den planerade modulen. Gatan för-delades i fyra sektioner enligt tre bindemedelsblandningar och en referenssektion. Den stabiliserade leran användes i gatans stödlager. På grund av varierande under-lag gjorde man under varje sektion ett 200 mm tjockt dräneringslager för att försäkra jämställda dräneringskonditioner. Efter komprimering av masstabiliserat lerlager på varmt väder uppkom ytsprickor i lera på grund av konstruktionens starka uttorkning. Ytsprickningen motverkades med beläggning och bevattning av konstruktionen.

Fuktighetshalten och temperaturen av testkonstruktionen följades med en mät-ningsgivare och beläggningsplan nivellerades när konstruktionen fryste och smälte för att man kunde klara upp påverkan av tjäle.

Resultaten är att hållfastheten av ett stabiliserat lager är liksom man planerade och bärförmågan inte har minskat på grund av frysning och avfrostning. Man måste ut-veckla utnyttjandet av stabiliserad lera i framtiden i följande hänseenden:

- Blandning av bindemedel och inblandningsproportion samt kontroll av homoge-nitet
- Utveckling av inblandningsmaskiner
- Arbetsskedena och komprimering av massa i konstruktion
- Grävning av lera, inblandningsmetoder av bindemedel, kontrollering av lerans torkning på varma dagar och påverkan av detta till bärförmågan.

ABSTRACT

The research project was conducted at the geotechnical division of the Real Estate Department and the Public Works Department of the City of Helsinki. The examination is related to the earlier investigations to investigate possibilities for reducing construction costs incurred through transportation and disposal clays by means of mass stabilization (report GEO 61/1993, in Finnish) and clarify alternatives to locating surplus soils on deposition areas (report GEO 64/1994, in Finnish). The aim of this study was to investigate the possibility to use stabilized clay to the sub-base layer of the street structure at the eco-construction area in Helsinki. Numerous thorough laboratory tests were done for clay before the construction work began.

Unconfined compression tests were made at the laboratory for stabilized clay to discover the best clay-binder combinations and mixture ratio. The frost heave strength of stabilized clay was investigated by frost heave and freeze-thaw tests. The most potential binder combinations were blast furnace slag-cement mixture (70:30), cement-lime mixture (95:5) and by-product based E1 mixture according to frost heave strength. These three binder combinations were used to stabilize clay. The binder amount was 14 weight-% per clay mass.

Before constructing the actual street a preliminary test was done at the eco-construction area to clarify the proportioning of binder and mixing to clay and how this affects to homogeneity and strength of stabilized clay and to the designed module. The test street was divided in four different sections: Three different binder mixtures and a reference section. Stabilized clay was used to the support layer and because of very varying sub grade 200 mm thick drainage-course was built under the support layer to ensure equal drainage conditions for all sections. It appeared after compaction that due to very hot summer the surface of the stabilized clay layer was cracking. Covering and pouring out water on the stabilized clay surface avoided cracking.

Sensors were installed into layer to measure moisture ratio and temperature of stabilized clay. Bearing capacity of the street were measured by the plate-loading tests.

The most important results of the experiment are that the strength of stabilized layer is as planned and the bearing capacity has not decreased because of freezing-thawing conditions. The utilization of stabilized clay needs development to the following things:

- Product formulation, binder mixtures, amount of mixing and supervising homogeneity
- Development of the mixing machines
- Working methods and compaction of stabilized bulk
- Excavation techniques, methods of mixing binders, controlling drainage of stabilized clay surface during construction in warm days and how this affects to the bearing capacity.

ALKUSANAT

Massastabiloitujen savien hyötykäyttö katurakenteissa projekti käynnistettiin Helsingin kaupungin rakennusviraston (HKR) ja kiinteistöviraston geoteknisen osaston toimesta ja yhteistyössä Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy:n kanssa. Projekti on osa Ympäristögeotekniikan tutkimusohjelmaa, jota Tekes rahoittaa merkittävällä panoksella.

Ylijäämäsavien massastabilointia koskeva tutkimustyö käynnistettiin Suomessa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla HKR:n katuosaston aloitteesta ja rahoituksella 1990-luvun alkupuolella. Tutkimustyön tulokset olivat lupaavia ja seuraava merkittävä kehitystyön panostus on tämä Viikin alueen ylijäämäsavien massastabilointi ja koerakentaminen. Helsingin kaupungin roolina on ollut selvittää ylijäämäsavien käyttöedellytykset, suunnittelu- ja mitoitusperusteet, rakenteiden kestävyys sekä rakentamistekniikka. Massastabiloinnin kone- ja laitekehitystyötä ovat tehneet saman Ympäristögeotekniikka-ohjelman osarahoituksella yritykset, mm. Ideachip OY, joka toteutti Viikin koerakenteen massastabilointityön.

Viikin alueen ylijäämäsavien massastabiloinnin kehitystyön johtoryhmänä on toiminut Usko Anttikoski, puheenjohtajana, Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekniseltä osastolta, Heikki Rinne Helsingin kaupunginkansliasta, Lauri Kivekäs Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy:stä, Osmo Koskisto, Tekesistä sekä Jouko Lehtonen (7/97 asti) ja Hannu Halkola (8/97 lähtien), Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekniseltä osastolta.

Projektin käytännön työtä sekä raportin laadintaa on ohjannut projektiryhmä, jossa ovat olleet mukana HKR:n Katuosastolta Ari Kettunen ja Jouko Lehtonen, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy:stä Martti Keppo ja Elina Parkkinen (vuoteen 1997 asti) sekä Hannu Halkola geotekniseltä osastolta.

Koerakenteiden tekemisen toteutti HKR-Ympäristötuotanto, jossa työstä vastasivat dipl.ins. Raimo Kuokkanen, työpäällikkö Veijo Hämäläinen, vastaava mestari Juha Loukusa. Työnjohdon avustajana toimi opiskelija Tero Virrantuomi koerakenteiden tekemisen aikana. Stabiloidun materiaalin routakestävyyslaboratoriotutkimukset tehtiin Oulun Yliopiston geotekniikan laboratoriossa tekn. tohtori Kauko Kujalan johdolla.

Viikin savikadun alustavat suunnitelmat teki SCC Viatek Oy. Koerakentamisen varsinaiset rakennus- ja tutkimussuunnitelmat teki Innogeo Oy:stä Antti Junnila ja Harri Mäkelä, joka on vastannut myös koerakentamisen asiantuntijatehtävistä ja neuvonnasta sekä pääosin tämän raportin laadinnasta yhdessä Harri Höynälän kanssa.

Helsingissä marraskuussa 2000



Ilkka Vähäaho
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	5
SAMMANDRAG.....	6
ABSTRACT.....	7
ALKUSANAT	8
SISÄLLYSLUETTELO.....	9
1. TUTKIMUSPROJEKTIN TAUSTA JA TAVOITTEET	11
2. MATERIAALITUTKIMUKSET	13
2.1 Materiaalitutkimusten tarkoitus.....	13
2.2 Stabiloitimenetelmien kuvaus.....	13
2.3 Maamateriaali ja sideaineet	15
2.4 Puristuslujuus.....	17
2.5 Routivuus ja jäätymis-sulamiskäyttäytyminen	17
2.5.1 Routivuus	17
2.5.2 Jäädytys-sulatuskoe.....	18
2.5.3 Lämmönjohtavuuden määrittäminen.....	19
2.6 Kantavuus ja sulamiskäyttäytyminen	20
2.6.1 CBR-kokeet.....	20
2.6.2 Dynaaminen kolmiaksaalikoe	20
2.7 Vedenläpäisevyys	22
2.8 Liukoisuus- (<i>diffuusio</i>)-testi	22
3. KOERAKENNETUTKIMUKSET	23
3.1 Esikokeet.....	23
3.2 Viikin savikadun rakentamisvaihe	26
3.2.1 Koerakenteiden suunnittelu ja mitoitus	26
3.2.2 Saviaines.....	26
3.2.3 Sideaineet	27
3.2.4 Sekoitinkalusto	27
3.2.5 Rakenteen tekeminen	29

3.3 Rakentamisen kustannukset	30
3.4 Savikadun mittaukset	31
3.4.1 Routanousumittaukset	31
3.4.2 Kantavuusmittaukset päällysteen pinnasta	31
3.4.3 Rakenteen kosteusmittaukset	32
3.4.4 Rakenteen ja pohjamaan lämpötilamittaukset	32

4. TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU 32

4.1 Materiaalitutkimukset	32
4.1.1 Ennakkokokeet	32
4.1.2 Routivuus	37
4.1.3 Jäätymis-sulamiskestävyys	39
4.1.4 Lämmönjohtavuus	40
4.1.5 CBR-arvot	40
4.1.6 Dynaamiset kimmomoduulit	42
4.1.7 Vedenläpäisevyys	46
4.2 Savitien rakennetutkimukset	46
4.2.1 Seurantajärjestelmän valinta	46
4.2.2 Routanousumittaukset	47
4.2.3 Kantavuusmittaukset päällysteen pinnasta	49
4.2.4 Rakenteen kosteusmittaukset	50
4.2.5 Rakenteen ja pohjamaan lämpötilamittaukset	50
4.2.6 Päällysteen vauriokartoitus	51
4.3 Ympäristöominaisuudet	51
4.3.1 Diffuusiotesti	51
4.3.2 Stabiloidun saven ympäristövaikutukset ja -selvitysten tarve	53

5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOEHDOTUKSET 55

5.1 Laboratoriotutkimukset	55
5.2 Viikin koerakenne	57
5.3 Laboratorio- ja maastokokeiden kantavuustulosten vertailua	59

KIRJALLISUUSLUETTELO 60

LIITTEET

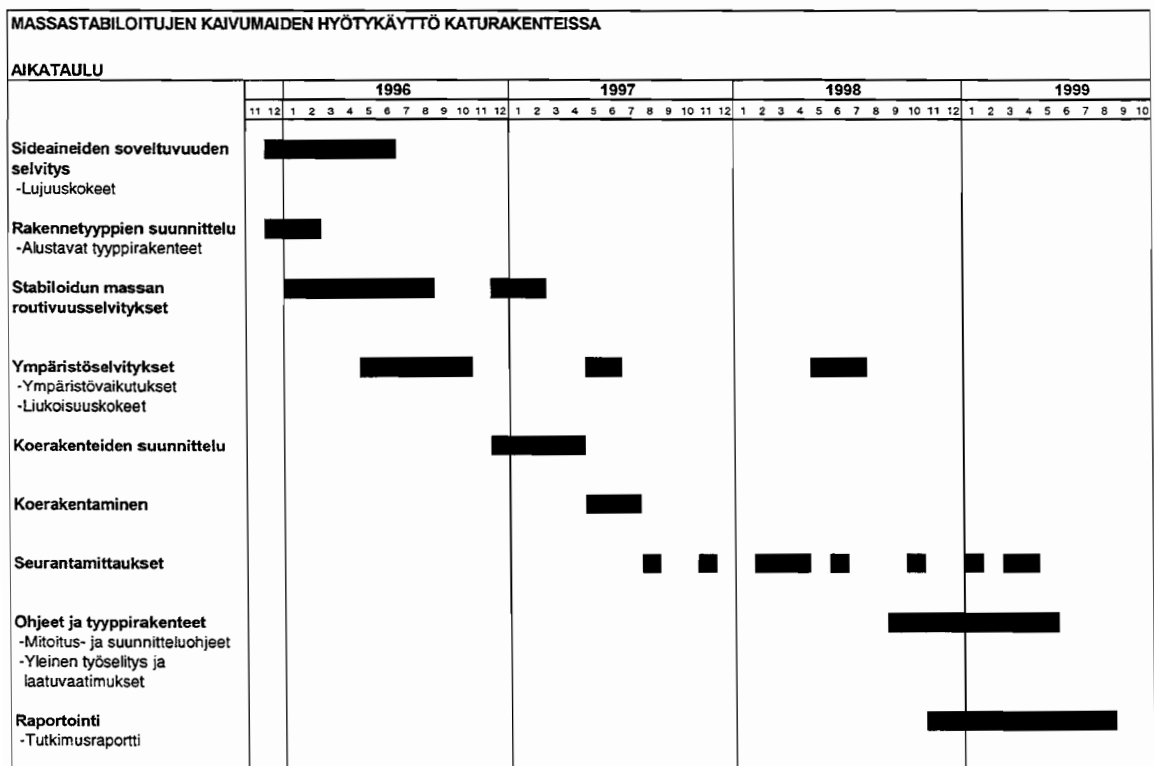
1. TUTKIMUSPROJEKTIN TAUSTA JA TAVOITTEET

Ylijäämäsavien massastabilointia koskeva tutkimustyö käynnistettiin Suomessa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla HKR:n katuosaston aloitteesta ja rahoituksella 1990-luvun alkupuolella. Tutkimustyön tulokset olivat lupaavia ja seuraava merkittävä kehitystyön panostus on tämä Viikki-Latokartanon alueen ylijäämäsavien massastabilointi ja koerakentaminen.

Helsingin kaupungin roolina on ollut selvittää ylijäämäsavien käyttöedellytykset, suunnittelu- ja mitoitusperusteet, rakenteiden kestävyys sekä rakentamistekniikka. Massastabiloinnin kone- ja laitekehitystyötä ovat tehneet yritykset, saman Ympäristögeotekniikka-ohjelman osarahoituksella.

Routakestävyystutkimuksen tavoitteina oli selvittää lujittumisolosuhteiden vaikutusta stabiloidun kaivumassan routakestävyyteen, sideainekoostumuksen ja -määrän vaikutusta materiaalin routivuuteen ja jäätymis-sulamiskestävyyteen sekä tuottaa mitoitusparametrejä routakestävyyden osalta katurakenteen mitoitusta varten. Routakestävyystutkimuksessa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät on valittu Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geoteknisessä laboratorioissa esitutkimuksina suoritettujen lujuuskokeiden perusteella.

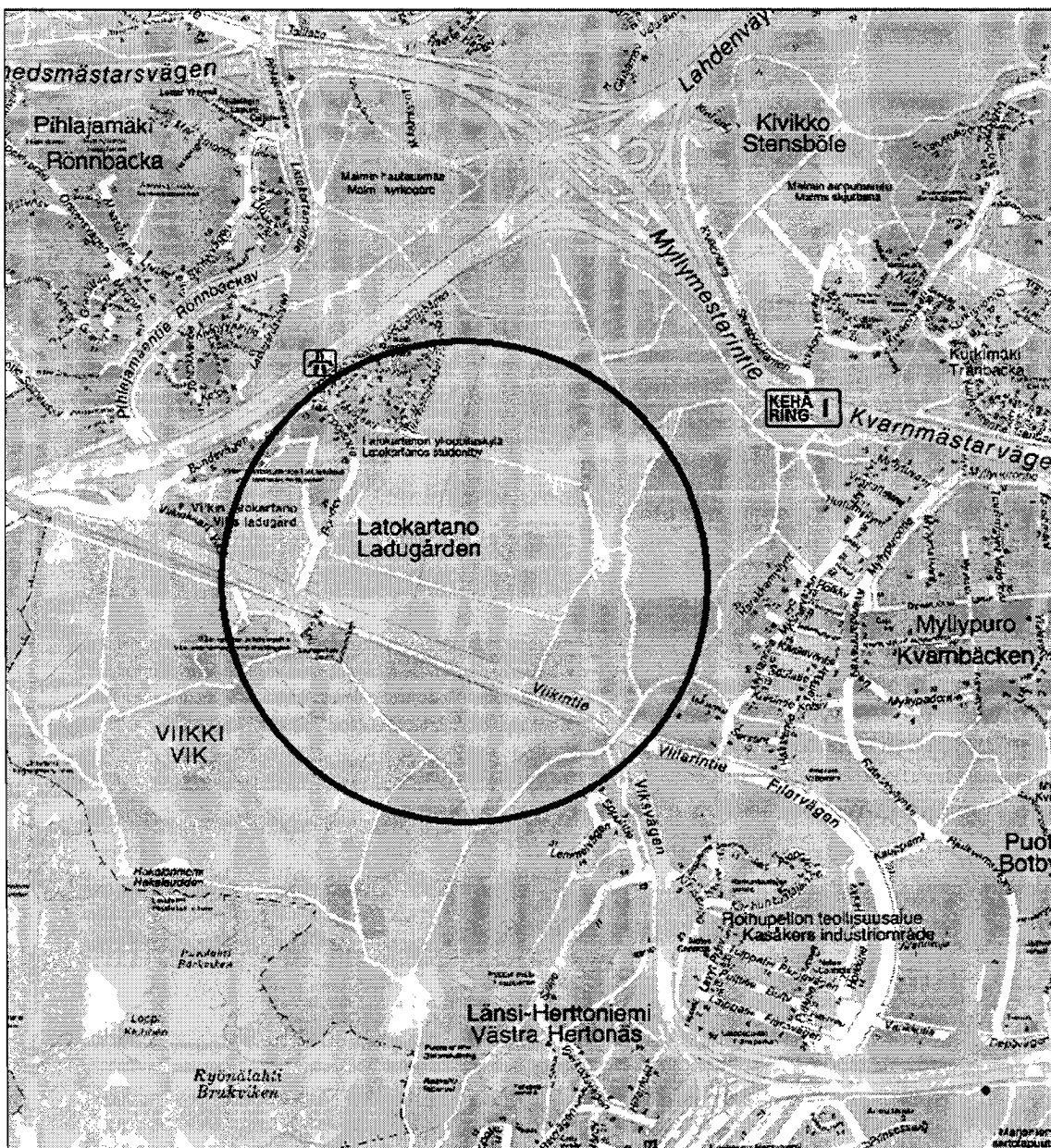
Viikin savikatu -projektin aikataulu on esitetty kuvassa 1. Projektin kokonaiskesto-aika on ollut vajaa neljä vuotta.



Kuva 1. Viikin savikatu -projektin aikataulu.

Viikin uudella asuntorakentamisen alueella noin 7 km etäisyydellä Helsingin kaupungin keskustasta sijaitsee Viikki-Latokartanon aluerakentamiskohde (Kuva 2), jossa yhtenä suunnittelun ja rakentamisen teemana on ekologiset asiat. Noin 20 hehtaaria koko 50 hehtaarin alueesta sijoittuu lujudeltaan heikolle savipehmeikölle, joten alueen rakentamisen yhteydessä joudutaan toteuttamaan erilaisia pohjanvahvistustoimia, joina on suunniteltu käytettäväksi syvä- ja massastabilointia.

Massastabiloinnilla pyritään vähentämään alueella tarvittavien luonnonkiivialaisten määrää sekä minimoimaan alueella syntyvät ylijäämämassat ja parantamaan heikkolaatuisten maamateriaalien ominaisuuksia siten, että niitä pystytään hyödyntämään esimerkiksi katurakenteissa, täytöissä ja meluvalleissa.



Kuva 2. Viikki-Latokartanon aluerakentamiskohde.

2. MATERIAALITUTKIMUKSET

2.1 Materiaalitutkimusten tarkoitus

Tutkimusprojektissa tehtiin laaja laboratoriotutkimusten ohjelma, jonka tarkoituksena oli selvittää massastabilointiin soveltuvat sideaineet ja niiden määrä sekä lujittuneen rakenteen kestävyys käyttötilassa. Oheisessa taulukossa 1 on esitetty tehdyt kokeet ja niiden tarkoitus.

Taulukko 1. Koekappaleille tehty kokeet ja niiden tarkoitus.

Koejärjestely	Kokeen tarkoitus
•Yksiakselialinen puristuslujuus •Routanousukoe •Jäädytys-sulatuskoe •Lämmönjohtavuus •CBR-kantavuuskoe •Dynaaminen kolmiakselialikoe •Vedenläpäisevyys •Liukoisuus-(diffuusio-)testi	Selvittää eri sideaineilla ja määrillä stabiloitujen koekappaleiden paras seossuhde. Määrittää stabiloitujen koekappaleiden routivuus segregatiopotentialin avulla. Saada selville stabiloitujen näytteiden pakka-kestävyys syklisissä jäädytys-sulatus olosuhteissa. Selvittää koekappaleiden lämmönjohtavuus sekä sulassa että jäätyneessä tilassa. Saada CBR-kantavuusluku, jolla arvioidaan stabiloitujen massojen soveltuvuutta katurakentamiseen. Saada selvitettyä stabiloitujen koekappaleiden käyttäytyminen dynaamisen kuormituksen alaisena. Arvioida tulosten perusteella stabiloitujen koekappaleiden routivuutta ja soveltuvuutta eri kohteisiin. Selvittää stabiloitujen näytteiden ympäristökelpoisuus hollantilaisen liukoisuustestin avulla.

2.2 Stabilointimenetelmien kuvaus

Laboratoriokokeilla pyrittiin aikaansaamaan olosuhteet, jotka vastaisivat mahdollisimman hyvin olosuhteita kahden rakentamismenetelmän eri vaiheissa. Mallinnetut rakentamismenetelmät olivat seuraavat:

Menetelmä 1:

Materiaalin stabilointi seulamurskaimella tai vastaavalla, stabiloidun massan kaivu ja kuormaus. Stabiloitu massa lujittuu tiivistämättömänä kasassa, minkä jälkeen massa kuljetaan käyttökohteeseen ja tiivistetään.

Laboratorio-olosuhteissa sideaineet sekoitettiin saveen kuivana mekaanisesti sekoitinkärjellä. Massaa sekoitettiin kunnes sideaine oli silmämääräisen tar-

kastelun perusteella täysin sekoittunut saveen. Sekoituksen jälkeen massa laitettiin tiivistämättömänä kahteen muovipussiin, joiden väliin asetettiin 2 kostutettua käsipaperia.

Routakestävyys määrittämistä varten lujittunut massa murskattiin ja murskeesta valmistettiin näytteet routanoususellin.

Menetelmä 2:

Stabilointi massa- ja pilaristabilointilaitteella. Stabiloitu massa lujittuu *in situ*, minkä jälkeen massa kaivetaan ja kuljetetaan käyttökohteeseen ja tiivistetään.

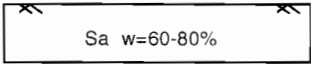
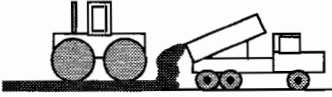
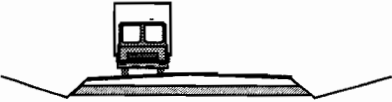
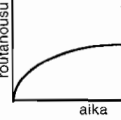
Sideaineet sekoitettiin saveen kuivana mekaanisesti sekoitinkärjellä. Massaa sekoitettiin kunnes sideaine oli silmämääräisen tarkastelun perusteella täysin sekoittunut saveen.

Massa sullottiin näyteputkeen ($h = 200$ mm ja $\varnothing = 100$ mm), johon asetettiin 3 kpl suodatinkankaasta leikattuja noin 10 mm leveitä liuskoja salaojiksi. Putken alapäähän asetettiin suodatinkangas, jonka päälle laitettiin rei'itetty muovikorkki.

Stabiloitu massa sullottiin näyteputkeen 6 kerroksena ja jokainen kerros tiivistettiin käsin muovisella sulloimella. Koekappaleesta pyrittiin saamaan mahdollisimman homogeeninen. Putken yläpäähän asennettiin suodatinkangas ja rei'itetty muovikorkki. Lopuksi näyteputki punnittiin tilavuuspainon määrittämistä varten.

Routakestävyys tutkimuksiin näytteet valmistettiin menetelmän 1 mukaisesti.

Rakentamismenetelmät ja niiden simulointi laboratorio-olosuhteissa on esitetty kuvassa 3.

VAIHE	RAKENTAMINEN		LABORATORIO	
Lähtö-tilanne				
Sideaineen sekoitus	<u>Menetelmä 1:</u> Seulamurskain tai vastaava	<u>Menetelmä 2:</u> Massa- ja pilaristabilointi- laite	$t=0$ vrk Sähköporakone	
Esilujittuminen	<u>Menetelmä 1:</u> tiivistämätön 	<u>Menetelmä 2:</u> in situ 	<u>Menetelmä 1:</u> Muovipussi (tiivistämätön) $t=0-28$ vrk $T=+8^{\circ}\text{C}$	<u>Menetelmä 2:</u>  $t=0...7$ vrk / $0...14$ vrk ¹ vesilupotus $T=+21^{\circ}\text{C}$ $t=7...28$ vrk / $14...28$ vrk ¹ vesilupotus $T=+8^{\circ}\text{C}$ $t=28$ vrk 
Massan kuormaus ja siirto			$t=28$ vrk Murskaus # < 10 mm	
Tiivistäminen ja jälkilujittuminen			$t=28$ vrk Murskatun materiaalin tiivistäminen routakestävyyssmäärityksiä varten  Jälkilujittuminen: $t=28...42$ vrk / $28...56$ vrk ² $T=+8^{\circ}\text{C}$	
Lopullinen rakenne			$t=42$ vrk / 56 vrk ²  ROUTAKESTÄVYYSMÄÄRITYKSET - routivuus - jäädytys-sulatuskestävyys - lämmönjohtavuus - kantavuus - sulamispehmeneminen	

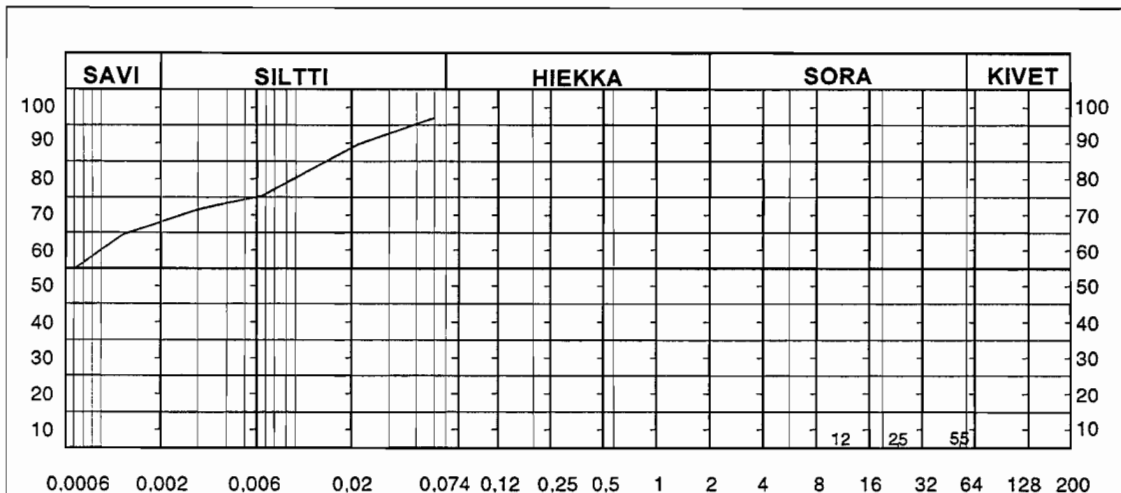
¹ CaO:ta sisältävät näytteet² Menetelmän 1 mukaisesti valmistetut näytteet

Kuva 3. Stabilointi- ja rakentamismenetelmien simulointi laboratoriotutkimuksissa /3/.

2.3 Maamateriaali ja sideaineet

Materiaalitutkimuksia stabiloiduille näytteille tehtiin sekä Lohja Rudus Oy Ab:ssa että Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Tutkimuksissa käytetty maamateriaali oli Viikki-Latokartanon alueelta otettua (syvyys 1,5 – 3,6 m). Oulussa tutkittu maamateriaali oli rakeisuudeltaan lihavaa savea (Kuva 4), jonka vesipitoisuus vaihteli 54...84 % välillä keskiarvon ollessa 71 %. Rakei-

suutensa perusteella materiaali on routivaa /9/. Plastisuusluvun ($I_p = 36,7 \%$) perusteella savi oli erittäin plastista. Saven hehkutushäviö oli $0,15 \%$ ja pH 7,3.



Kuva 4. Maamateriaalin rakeisuuskäyrä /3/.

Sideaineina käytettiin sementtiä, sementin ja kalkin seosta, Lohja Rudus Oy Ab:n toimittamia sideaineseoksia (Täyte C, E1, E3 ja E4) sekä sementtiaktivoitua masuunikuonaa. Sideainemäärät laskettiin prosentteina maamateriaalin märkämässasta. Taulukossa 2 on esitetty eri tutkimuksissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät.

Taulukko 2. Stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät /3/.

Sideaine (seossuhde)	Sideainemäärä märkämpainosta Oulun yliopiston geotekniikan laboratorio (%)	Sideainemäärä märkämpainosta Lohja Rudus Oy Ab (%)
Täyte C*	30	30
Täyte C*	-	50
E1*	10, 12, 14	6, 10, 14, 18
E3*	10, 12, 14	6, 10, 14, 18
E4*	10, 12, 14	6, 10, 14, 18
Se + CaO (1:1)	10, 12, 14	6, 10, 14, 18
Se + CaO (95:5)	10, 12, 14	6, 10, 14, 18
Se	6, 12, 14, 18	6, 10, 14, 18
JMk + Se (70:30)	10, 12, 14	6, 10, 14, 18

* Lohja Rudus Oy Ab:n sideaineseos

Ennen sideaineiden lopullista valintaa tutkittiin vielä uudelleen Oulun Yliopistossa taulukon 3 mukaisia sideaineita ja sideainemääriä.

Taulukko 3. Lisäkokeissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät /17/.

Sideaine (seossuhde)	Sideainemäärä märkämpainosta Oulun yliopiston geotekniikan laboratorio (%)
Se + CaO (95:5)	10, 14
JMk + Se (70:30)	10, 14

2.4 Puristuslujuus

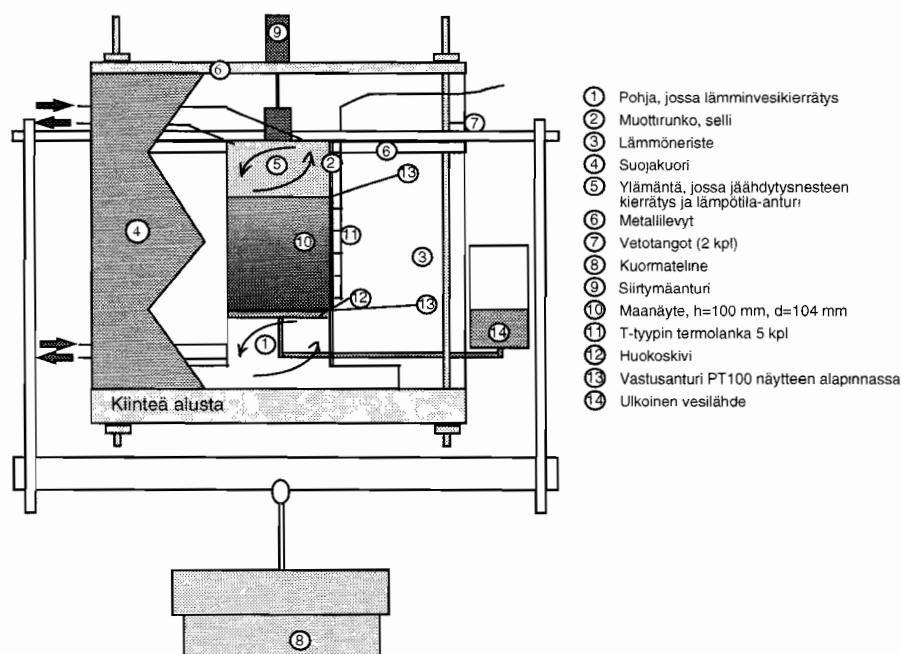
Stabiloitujen näytteiden puristuslujuuksia tutkittiin yksiakselisella puristuskokeella. Sideaineet ja sideainemäärät ilmenevät taulukosta 2. Näytteiden lujittumisajat olivat 28 vrk ja 60 vrk (Lohja Rudus Oy Ab).

Menetelmällä 2 valmistetut koekappaleet puristettiin 28 vrk:n ikäisinä, minkä jälkeen materiaali murskattiin nuijalla hakaten alle 10 mm rakeiksi, sullottiin uudelleen muottiin ja asetettiin uudelleen kovettumaan. Menetelmällä 1 valmistetut koekappaleet murskattiin 28 vrk:n ikäisenä edellä kuvatulla tavalla ja sullottiin näyteputkeen. Koekappaleiden annettiin lujittua 14 ja 28 vrk, minkä jälkeen ne koestettiin uudelleen.

2.5 Routivuus ja jäätymis-sulamiskäyttäytyminen

2.5.1 Routivuus

Stabiloitujen materiaalien routivuutta tutkittiin laboratoriossa routanousukokeilla. Kokeet suoritettiin vakioilämpötilakokeina, jossa jäädytyslämpötila oli -3°C ja syöttöveden lämpötila $+1.5^{\circ}\text{C}$. Vedensyöttö tapahtui alhaalta päin (Kuva 5). Kokeissa käytettiin 10 kPa pystykuormitusta, joka vastaa noin 0,5 m kerroksen aiheuttamaa kuormitusta katurakenteessa.



Kuva 5. Periaatekuva routivuuden määrittämiseen käytetystä routasellistä /3/.

Kokeen aikana tallennetut lämpötila- ja siirtymätiedot käsiteltiin Excel-taulukko-laskenta-ohjelmalla, jonka tulosteena saatiin routanousu, routan syvyys, routanoususuhte, segregatiopotentiaali ja näytteen lämpötilat ajan funktiona. Ohjelma laski seuraavat routivuutta ilmaisevat tunnusluvut:

- kokonaisroutanousu ja aika
- routanoususuhteet Z_{24h} ja Z_{48h}
- routanousunopeudet V_{24h} ja V_{48h}
- segregatiopotentiaali, SP.

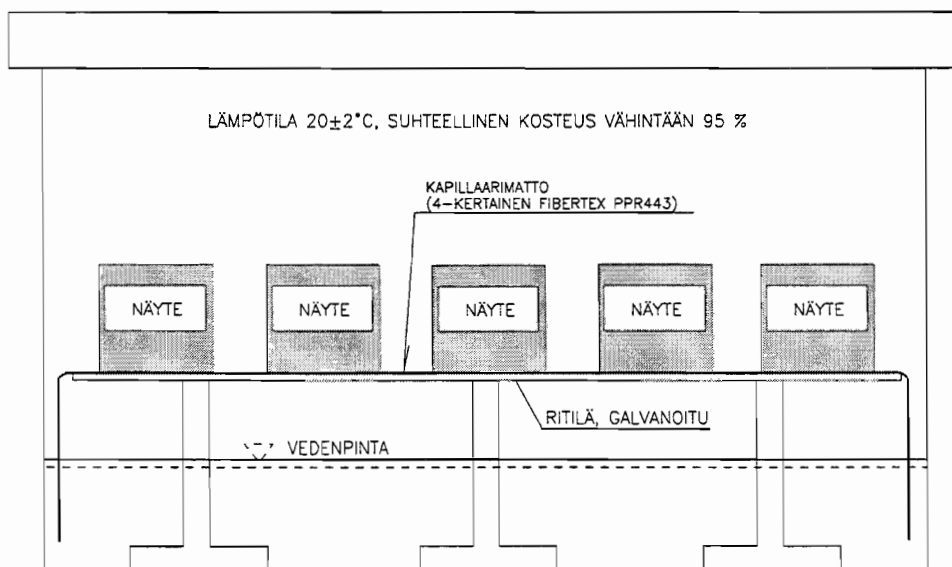
Maamateriaalin routivuutta ja routivuuden voimakkuutta voidaan arvioida mm. segregatiopotentiaalin perusteella /4/ (Taulukko 4). Segregatiopotentiaali määritetään stationääri- ja epästationääritilan rajakohdasta /5/.

Taulukko 4. Maamateriaalien routivuuden arviointi segregatiopotentiaaliin perustuvan routivuusluokituksen perusteella /4/.

Routivuus	Segregatiopotentiaali SP (mm ² /Kh)
Routimaton	< 0,5
Lievästi routiva	0,5 – 1,5
Keskinkertaisesti routiva	1,5 – 3,0
Erittäin routiva	> 3,0

2.5.2 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeen alussa koekappaleet asetettiin muovilaatikkoon 4 tunniksi 4-kertaisen kapillaarimaton päälle (tyyppi: Fibertex PPR 433), josta ne imivät vettä kapillaarisesti. Tällöin lämpötila oli $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ja ilman suhteellinen kosteus vähintään 95 % (Kuva 6).



Kuva 6. Näytteiden säilytys ennen ensimmäistä jäädytystä sekä jäädytys-sulatuskokeen sulatusjakson aikana /3/.

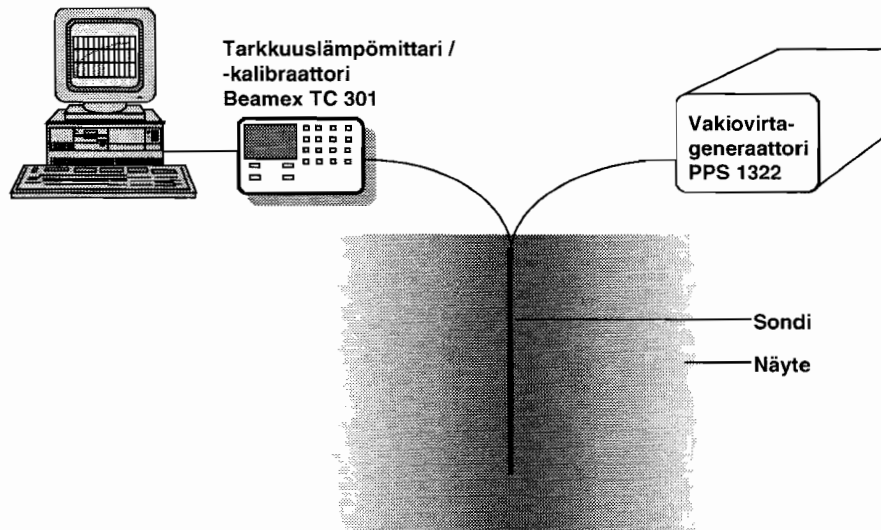
Jäädytysvaiheessa koekappaleet asetettiin jäädytyskaappiin, missä lämpötila laskettiin 0 C:sta -15 C:een $2,5 \pm 0,5$ tunnin aikana. Lämpötila pidettiin $-17,5 \pm 2,5$ C:ssa vähintään 8 tuntia. Sulamisvaiheessa koekappaleet laitettiin kuvan 4 mukaisiin olosuhteisiin 7 tunnin ajaksi ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$).

Jokaisen jäädytys syklin jälkeen näyte käännettiin 180° sekä punnittiin ja määritettiin koekappaleen tilavuus. Jäädytys-sulatuskokeessa tehtiin 12 kpl syklejä, joiden jälkeen koekappaleet testattiin yksiaksiaalisella puristuskokeella. Kokeessa vertailupuristuslujuutena käytettiin kuvan 4 mukaisissa olosuhteissa säilytetyn koekappaleen puristuslujuutta. Tätä koekappaletta ei siis altistettu jäädytys syklien vaikutukselle, ainoastaan näytteen kääntäminen suoritettiin kuten jäädytetyillä koekappaleilla. Jäädytys-sulatuskoe noudatti pääosin saksalaista ohjetta /7/.

2.5.3 Lämmönjohtavuuden määrittäminen

Stabiloitujen materiaalien lämmönjohtavuudet määritettiin yksisondimenetelmällä. Määritykset tehtiin jäädyttämättömässä (n. $+22^\circ\text{C}$) ja jäätyneessä (-10°C) tilassa.

Mittauslaitteistoon kuuluu vakiovirtageneraattori, tarkkuuslämpömittari, mikrotietokone tiedonkeruu- ja käsittely-yksikkönä sekä haponkestävästä teräksestä valmistetut sondit, joiden pituudet olivat 90 mm sekä halkaisijat 4 mm (Kuva 7).



Kuva 7. Periaatekuva lämmönjohtavuuden määrittämisestä lämmönjohtosondilla /3/.

Sondin sisällä olevaa vastuslankaa lämmitettiin siten, että lämmönnousu 15 minuutin aikana oli noin $1,5...2,0^\circ\text{C}$. Lämmönnousu mitattiin sondin keskipisteestä tarkkuuslämpömittarilla. Tiedot tallennettiin viiden sekunnin välein. Koea ohjattiin mikrotietokoneeseen tehdyn ohjelman avulla.

Sondit kalibroitiin kvartsihiekalla ja vedellä, johon oli lisätty Agar-hyytelöintiainetta konvektion estämiseksi. Tulosten perusteella laskettiin kullekin sondille kalibroitikertoimet. Lämmönjohtavuuden määrittäminen lämmönjohtosondilla perustuu sondin keskipisteessä mitattavan lämmönnousun havaitsemiseen ajan suhteen. Lämmönnousu ja ajan logaritmi muodostavat suoran, jonka kulmakertoimena saadaan lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuuden arvo korjataan lopuksi kalibroitikertoimella.

2.6 Kantavuus ja sulamiskäyttäytyminen

2.6.1 CBR-kokeet

CBR (*California Bearing Ratio*)-kokeesta saatavan CBR-arvon avulla voidaan arvioida tien tai kadun rakennekerrosten ja alusrakenteen kantavuutta. CBR-arvo ilmaisee prosentteina sen paineen, joka aiheuttaa tutkittavassa materiaallissa yhtä suuren painuman kuin ns. standardimateriaalissa (kalkkikivimurske).

CBR-kokeita tehtiin jäädyttämättömille ja sulaneille näytteille. Sulaneen näytteen jäädyttäminen tapahtui routanousukoetta vastaavissa olosuhteissa. Sulamisvaiheessa näytteen ylä- ja alapinnan lämpötilat olivat +1,5°C. Näyte koestettiin, kun se oli täysin sulanut.

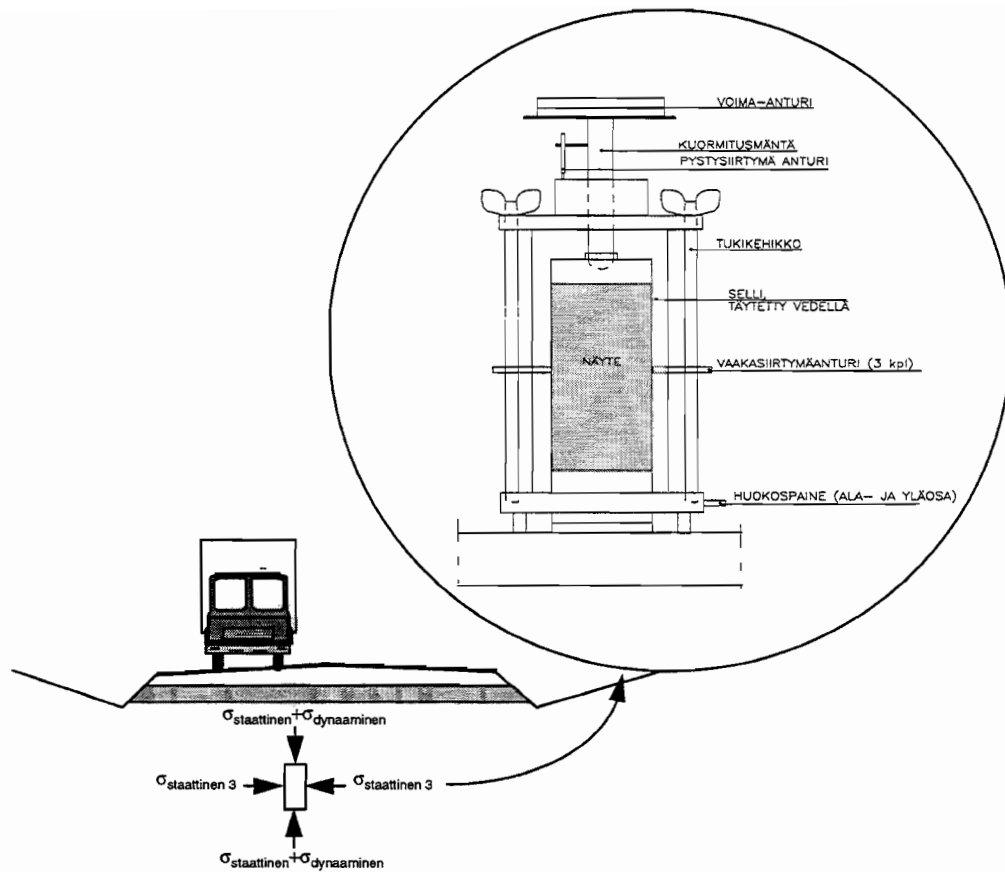
Kokeessa näytettä, jonka lähtökorkeus oli 116 mm ja halkaisija 152 mm, kuormitettiin kuormitusmännällä ($\varnothing = 50$ mm) vakionopeudella (1,27 mm/min). Koeistusvaiheessa näytteen päälle asetettiin 10 kPa:n pintakuormitus. CBR-arvot laskettiin 2,5 mm:n ja 5,0 mm:n painumien kohdalta yhtälön (1) avulla. Materiaalin CBR-arvona ilmoitetaan em. arvoista suurempi.

$$CBR = \frac{P}{P_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

missä P on näytteen kuormitus 2,5 mm / 5,0 mm painuman kohdalla (MPa)
 P_s standardimateriaalin 2,5 mm / 5,0 mm painumaa vastaava kuormitus (MPa)

2.6.2 Dynaaminen kolmiaksiaalikoe

Dynaamiset kimmomoduulit määritettiin dynaamisella kolmiaksiaalilaitteistolla. Laitteiston kuormitusyksikkönä on tietokoneohjattu servoventtiilillä varustettu kuormitussyylinteri, jonka maksimikuorma on 50 kN ja kuormitustaajuus 20 Hz. Koelaitteistolla on valmiudet tehdä 50, 100, 200 ja 300 mm halkaisijaltaan olevia näytteitä. Tässä tutkimuksessa kokeet tehtiin sylinterinmuotoisille näytteille, joiden korkeus oli 200 mm ja halkaisija 100 mm. Kokeen aikana mitattiin näytteen pysty- ja vaakasiirtymiä, dynaamista pystykuormitusta sekä huokospainetta (Kuva 8).



Kuva 8. Jännitystilä ja mittausjärjestelyt dynaamisessa kolmiakselikokeessa /3/.

Kokeet tehtiin neljällä sellipaineella (20, 40, 80 ja 160 kPa). Kussakin sellipaineessa dynaamista kuormitusta kasvatettiin portaittain. Jokaisessa portaassa tehtiin noin 300 iskua, jonka jälkeen lisättiin dynaamista kuormaa. Suurin dynaaminen kuorma pidettiin sellaisella tasolla, ettei näytteeseen aiheutunut merkittäviä plastisia muodonmuutoksia.

Näytteenottotaajuutena käytettiin 400 lukemaa sekunnissa mittauskanavaa kohti eli yhtä kuormituspulssia kohti tallennettiin 20 mittausmittauskanavaa kohti. Kokeen ohjaamiseen käytettiin DasyLab mittausohjelmaa.

Kokeet tehtiin jäädyttämättömille ja sulaneille näytteille. Sulaneen näytteen jäädyttäminen tapahtui routanousukoetta vastaavissa olosuhteissa. Näytettä jäädytettiin 4 vrk. Sulamisvaiheessa näytteen ylä- ja alapinnan lämpötilat olivat +1,5°C. Sulamisvaihe kesti vähintään 24 h.

Kokeen tuloksena saadaan dynaaminen kimmomoduuli (*resilient modul*), jonka riippuvuutta jännitystilasta kuvataan usein potenssifunktiolla /2/. Kokeiden tuloksista laskettiin potenssifunktion materiaaliparametrit K1 ja K2 SPSS-ohjelmiston epälineaarisen regressioanalyysin avulla sekä piirrettiin dynaaminen kimmomoduuli pääjännitysten summan funktiona.

2.7 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyyskokeet tehtiin Suomen Ympäristökeskuksen testimenetelmien mukaan kumiseinäisessä kolmiaksoililaitteistossa Lohja Rudus Oy Ab:n laboratoriossa. Stabiloitujen näytteiden sideaineet ja sideainepitoisuudet olivat seuraavat:

- E1/6%
- E1/14%
- Se/CaO/14%(1:1)
- Se/CaO/14%(95:5)
- JMk/Se/6%
- JMk/Se/14%

2.8 Liukoisuus- (diffuusio-)testi

Hollannissa on kehitetty stabiloiduille materiaaleille liukoisuustesti (diffuusiotesti), jolla voidaan tutkia sekä haitta-aineiden liukenemistapaa että tietyssä ajanjaksossa liukenevien haitta-aineiden määrää materiaalin pinta-alaa kohden. Hollannissa on ko. testille esitetty liuenneille metalleille myös alustavat ohjeet esimerkiksi tapaukselle, kun ko. materiaalia käytetään maarakentamiseen.

Diffuusiotesti tehdään standardin (Draf NEN 7345, 1994) mukaan ja siinä arvioidaan eri aineiden liukenemismekanismit. Diffuusiokertoimet lasketaan niille testijaksoille, joissa liukeneminen tapahtuu diffuusion kautta. Diffuusiokertoimen perusteella arvioidaan eri aineiden liukeneminen 64 päivän aikana diffuusion kautta. Tämä laskennallinen arvio 64 päivän aikana diffuusion kautta liuenneille määrille voi olla pienempi tai suurempi kuin mitattu tulos riippuen aineiden liukoisuuskäyttäytymisestä.

Liukoisuustesti tehtiin VTT:n kemiantekniikan osastolla /10/. Stabiloituja näytteitä oli kuusi kappaletta ja näytteiden sideaineet ja sideainemäärät on esitetty taulukossa 5. Diffuusiotestin koekappaleen tuli olla mieluiten lieriö eikä siinä saanut olla murtumia eikä halkeamia.

Taulukko 5. Stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät /10/.

Näyte/Sideaine (seossuhde)	Sideainemäärä märkäpainosta Lohja Rudus Oy Ab (%)
Näyte A/JMk + Se (70:30)	6
Näyte B/JMk + Se (70:30)	14
Näyte C/E1*	14
Näyte D/E1*	6
Näyte E/Se + CaO (95:5)	6
Näyte F/Se + CaO (95:5)	14

3. KOERAKENNETUTKIMUKSET

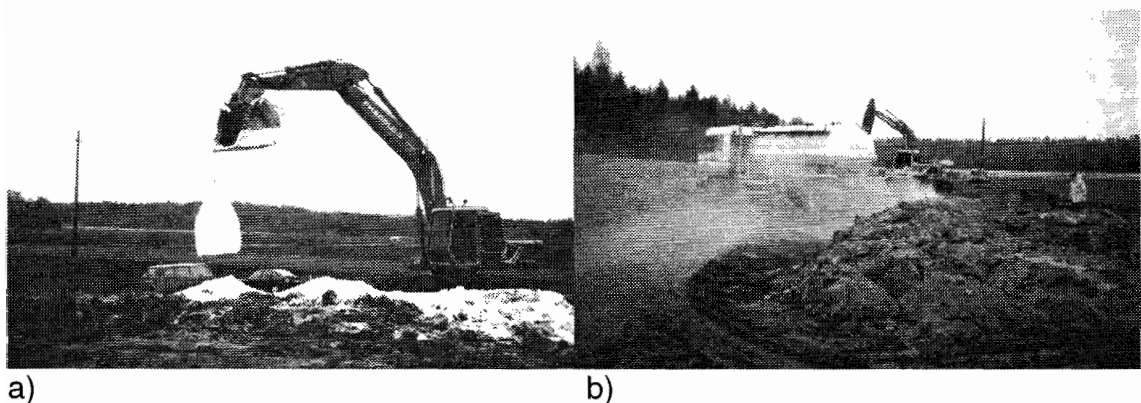
3.1 Esikokeet

Esikokeiden tarkoituksena oli selvittää koerakentamisen ehkä kriittisimmän osavaiheen - sideaineen annostelu ja sekoitus saveen - vaikutus lopputuotteen tasalaatuisuuteen, lujuuteen ja mitoituksessa käytettävään moduuliarvoon. Kokemuksen mukaan saven sekoitus tasalaatuiseksi massaksi onnistuu sitä helpommin mitä häiriintymisherkempää savi on. Sideaineen sekoittaminen kuiva-kuorisaveen tuottaa usein mururakennetta, kuorikoita, joissa sideaine on rakeen pinnalla. Rakeet rikkomalla ja uudelleen sekoittamalla sideainetta saadaan sekoitettua yhä paremmin. Nykyisillä laitteilla ja konekannalla ei ole myöskään mahdollista mitata sideainemääriä kovinkaan tarkasti. Pienimuotoisella kokeilulla selvitettiin ja tarkennettiin myös lopullisten koerakenteiden laatuvaatimuksia, laadunvarmistusta ja työselitystä.

Sideainesekoituksen ja rakenteen tekemisen esikokeet tehtiin 2.-3.12.1996. Päivälämpötila oli lähellä nollaa, sää osin sateinen. Kokeilun jälkeen muutaman päivän kuluttua tuli pakkasjakso, jolloin tehty rakenne jäättyi. Sideaineina kokeilussa käytettiin Lohja mix E1:tä ja sementti-kalkki seosta.

Savi otettiin tulevien vesiaihioiden alueelta peltoalueen alavimmalta paikalta Viikintien läheisyydestä. Saven plastisuus vaihteli melko vetelästä jäykkään saveen, minkä lisäksi kaivumassassa oli mukana hiekkaa ja silttistä hiekkaa, jota esiintyy Viikin savessa kerroksina saven välissä.

Sideaine toimitettiin työkohteeseen suursäkeissä (Kuva 9a) ja säiliöautolla (Kuva 9b). Sideaine purettiin sekoitusalueelle ajetun savikasan päälle. Suursäkistä sideaine purettiin suoraan savikasan päälle, jolloin ilmeni pientä sideaineen leviämistä ympäristöön. Pölyämisen estämiseksi säiliöautosta sideaineen purku tehtiin pressun alle (Kuva 10).

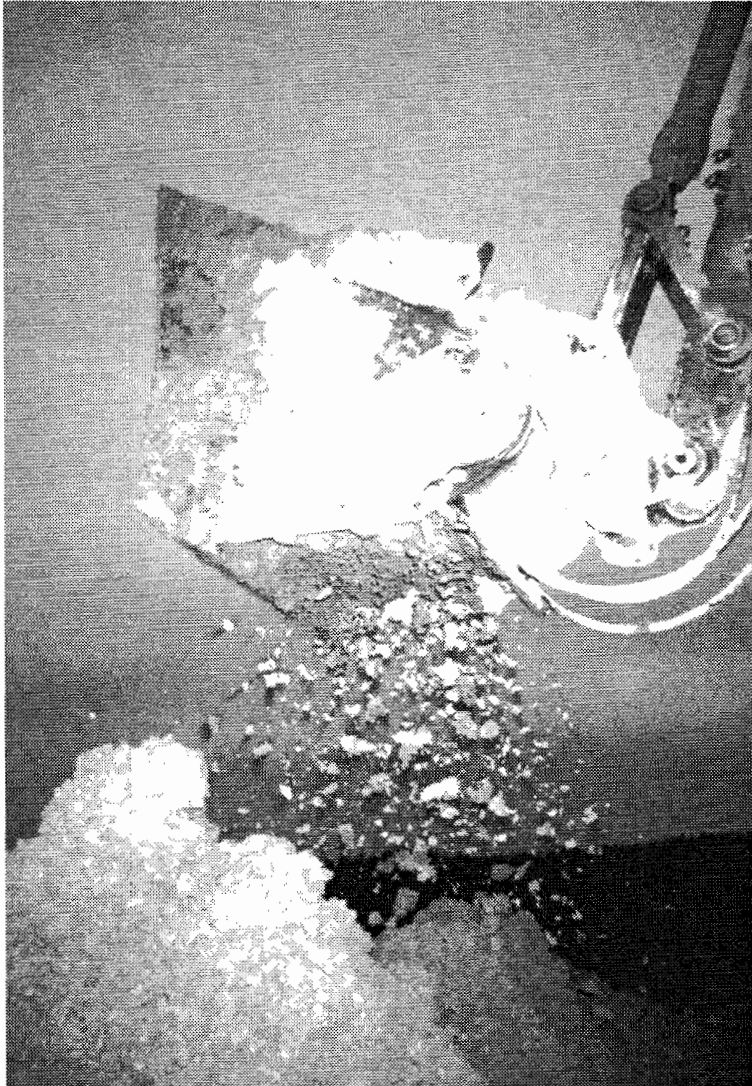


Kuva 9. Sideaineen toimitus kohteeseen a) suursäkeissä b) säiliöautolla.



Kuva 10. Sideaine puhallettiin suojapeitteen alle pölyämisen estämiseksi.

Sekoitus tehtiin Allu-seulamurskaimella SM 3-17 (Kuva 11), jota käytti 22...25 t hydraulikaivuri. Sekoitus tehtiin koko massalle kahdesta kolmeen kertaa. Sideaine mitattiin koko sekoitettavalle savimäärälle (30 m^3) ja sekoitettiin saveen tasaisesti annostellen niin, että ensin sekoitettiin sideaineesta runsaat puolet koko massaan ja toisella sekoituskerralla loput sideaineesta tasaisesti koko massamäärälle.



Kuva 11. Esikoevaiheessa sideaine sekoitettiin seulamurskaimella (Allu SM 3-17) saven sekaan.

Sekoitetut massat levitettiin noin 0,5 metriä paksuksi penkereeksi ja tiivistettiin kevyehkällä täryjyrällä (sorkkajyrällä). Massan tiivistymistä ja käyttäytymistä tiivistettäessä seurattiin silmämääräisesti. Rakenteesta otettiin näytteitä, jotka vietiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston laboratorioon lujittumaan ja jatkossa arvioitavaksi sideaineen sekoituksen laadun ja näytteiden lujittumisen osalta.

Näytteiden myöhemmässä tarkastelussa näytekappaleiden laatu vaihteli hauraasta mururakenteesta lujiin tasalaatuisiin näyteosiin. Rakenteen koko paksuudelta ei ollut tasalaatuiselta vaikuttavaa näytettä. Johtopäätöksenä oli, että toteutuksen ja erityisesti sekoituksen määrään ja laatuun tulee kiinnittää erityistä huomiota.

3.2 Viikin savikadun rakentamisvaihe

3.2.1 Koerakenteiden suunnittelu ja mitoitus

Toteutettavana koerakenteena oli ajoradan rakenne, jossa tukikerros tehtiin stabiloidusta savesta. Koerakenteeseen tarvittava teoreettinen savimäärä oli n. 420 m^3 , mutta käytännössä massastabiloidun saven lopullinen määrä oli vajaa 500 m^3 , koska savea levisi työn aikana myös alueen ulkopuolelle. Koealueen pinta-ala oli n. 760 m^2 . Koerakenteiden suunnittelu ja mitoitus tehtiin Oulun Yliopiston stabiloidun saven materiaalitutkimusten ja niiden johtopäätösten perusteella. Laboratoriotutkimukset on esitetty Oy:n raportissa /3/. Mitoittavaksi tekijäksi tuli rakenteen routakestävyys, jota hallitaan sideaineiden määrällä. Rakenteen kuormituskestävyyden mitoitus ja reseptien valinta tehtiin tukikerroksen tavoitekantavuudella 136 MN/m^2 . Rakenteen pituus- ja poikkileikkauskuvat sekä kartta on esitetty liitteessä 1. Kohteen katurakenne, joka toimii kokeilun referenssirakenteena, on katusuunnitelman mukaan ylhäältä lukien seuraava:

- päällysteen yläosa	AB 20/100	40 mm
- päällysteen alaosa	BS 2 * 30 /150	120 mm
- kantava kerros	murske	150 mm
- tukikerros	massastabiloitu savi	500 mm
Yhteensä		810 mm

Koerakenne on vastaavasti:

- päällysteen yläosa	AB 20/100	40 mm
- päällysteen alaosa	BS 2 * 30 /150	120 mm
- kantava kerros	murske	200 mm
- tukikerros	massastabiloitu savi	550 mm
- eristyskerros	hiekkä	200 mm
Yhteensä		1110 mm

Koerakenteiden suunnittelun oletuksena oli, että päällyste tehdään vaiheittain.

Koerakenteita suunniteltiin kolmelle eri sideaineelle siten, että koerakenne I tehtiin Lohjan E1:llä, koerakenne II sementti-kalkki seoksella (95:5%) ja koerakenne III jauhetun masuunikuonan ja sementin seoksella (70:30).

Lohja E1:n ja masuunikuonasegmentti/sementti koeosuuksille suunniteltiin lisäksi teräsverkot kantavaan kerrokseen. Verkkojen tyyppi on 7/5 - 200/200 - 7500/2350 B500K. Teräsverkon paksumpi 7 mm lanka sijaitsee kantavassa kerroksessa poikkisuunnassa katuun nähden.

3.2.2 Saviaines

Katurakenteeseen savi otettiin Viikin pelloilta noin 1...2,5 metrin syvyydeltä. Tarkoituksena oli ottaa savea myös syvemmmältä, mutta työteknisistä vaikeuksista (kaluston ulottumat jne.) ja kaivannon luiskien vakavuuden heikkenemisen

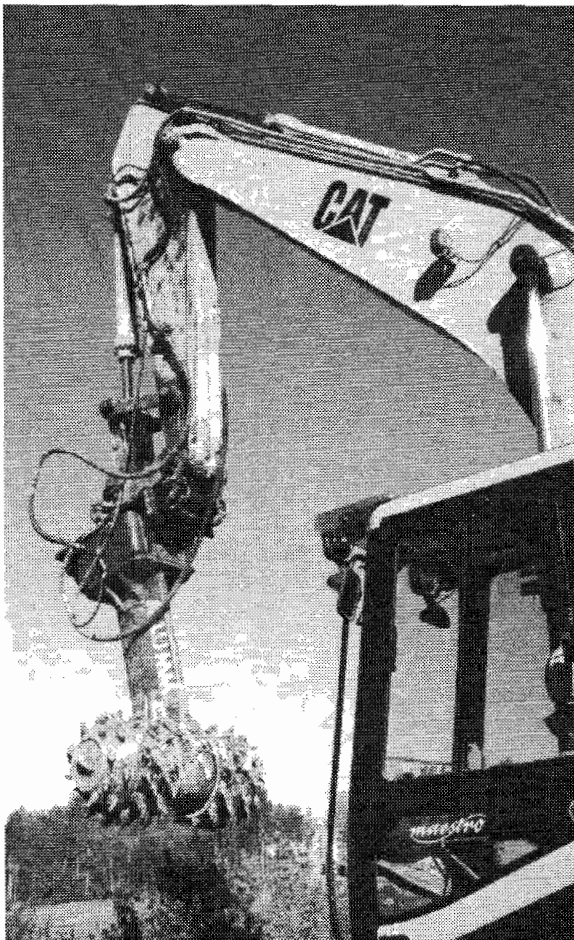
vuoksi syvyys rajoitettiin enimmillään 2,5 metriin. Saven oletettu lähtökosteus oli noin 50...60 paino-% . Lämpiminä päivinä saven kosteus aleni sekä käsittelyn eri vaiheissa että sideaineiden ottaman kosteuden seurauksena siten, että stabiloitu savi muuttui sekoituksen aikana jähmeäksi kuivaksi massaksi.

3.2.3 Sideaineet

Stabiloinnin sideaineina kokeiltiin Lohja Rudus Oy:n Ympäristötekniikan sideainetta E1, sementin ja kalkin (CaO) seosta suhteessa 95 % + 5 % sekä jauhetun masuunikuonan ja sementin seosta suhteissa 70 % + 30 %. Kutakin sideainetta käytettiin stabiloinnissa 14 % mitattuna saven märkápainosta.

3.2.4 Sekoitinkalusto

Massastabiloinnin ja rakentamisen periaate on esitetty kuvan 1 kaaviossa, jossa esitetään lähtötilanne, sideaineen sekoitustavat, lujittuminen, massan siirrot ja rakenteen tekeminen ja tiivistäminen. Sekoitustavaksi tähän kokeiluun valittiin uudentyyppinen massastabilointilaitteisto, jota Idechip Oy oli kehittänyt Tekesin Ympäristögeotekniikan tuotekehitysprojektina. Sekoitinlaite kiinnitetään hydrauliseen kaivukoneeseen kauhan tilalle (Kuva 12).



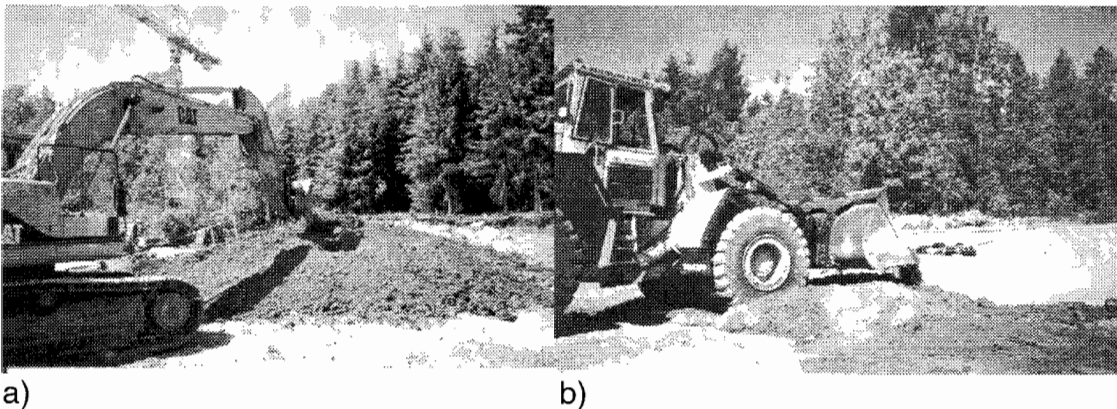
Kuva 12. Massastabiloinnin sekoituslaitteisto.

Sideaineen sekoitus ja esilujittuminen toteutettiin aluksi menetelmän 2 mukaisesti savenottokaivannossa ja koerakentamisen puolivälistä lähtien menetelmän 1 mukaisesti (kts. kaavio sivulla 9). Menetelmässä 2 sideaineet sekoitettiin kaivannossa olevaan luonnontilaiseen saveen, joka sekoituksen jälkeen kuormattiin autoon ja siirrettiin suoraan rakenteeseen (Kuva 13). Kaavioon nähden koerakentamisen erona oli massojen siirrot rakenteeseen välittömästi sideaineiden sekoittamisen jälkeen.



Kuva 13. Saven massastabilointia in situ kaivannossa.

Menetelmässä 1 savi kaivettiin ja kuormattiin autoon sekä siirrettiin koerakentamispaikan viereen kasalle ja mitattiin kaivetun saven tilavuus. Kasaan punnittiin ja levitettiin sideaine ja sekoitus tehtiin samalla massastabilointilaitteistolla (Kuva 14a). Sekoitettu massa siirrettiin sen jälkeen pyöräkuormaajalla 2-3 tunnin kuluessa rakenteeseen (Kuva 14b).



Kuva 14 a) Sideaineen sekoitusta savikasoihin b) Stabiloidun saven siirto rakenteeseen pyöräkoneella.

3.2.5 Rakenteen tekeminen

Tilanhoitajakaaren eli Viikin savikadun alusrakenteen ominaisuudet vaihtelevat savesta kalliioon, jota louhittiin mm. putkilinjojen alueelta. Tilanhoitajakaaren pehmeikköosuudet pilaristabilointiin talvella 1997. Koerakenteiden alueella alusrakenne pengerrettiin ja tiivistettiin tasoon $-1,10$ tasausviivasta. Penkereen päälle tehtiin suodatinhieasta kuivatus- ja tasauskerros paksuudeltaan noin $0,20$ metriä. Ajouradan molempiin reunoihin asennettiin kuivatuskerrokseen salaojat. Hiekkakerroksen päälle asennettiin kl 3 tyyppin kuitukangas. Hiekkakerroksen avulla kaikkien koe-osuuksien alusta on kosteudeltaan ja kantavuudeltaan mahdollisimman yhtenäinen ja vertailujen tekeminen rakenteiden käyttäytymisestä luotettavampaa kuin alueen muutoin vaihtelevissa olosuhteissa olisi.

Massastabilointityöt aloitettiin savenottokaivannossa 4. kesäkuuta 1997. Sideaine toimitettiin kohteeseen säiliöautolla noin $10...20$ tonnin erissä. Sideaine puhallettiin autosta kaivannon pohjalle asennetun suojapeitteen alle pölyämisen välttämiseksi. Kerralla toimitettu sideainemäärä levitettiin mitatulle ja merkitylle alueelle. Ennalta laskettiin seosmäärästä kerralla sekoitettavan savimäärän tilavuus ja sitä vastaava sideaineen määrä. Paksuudeltaan $0,5$ metrin savikerrokselle sideainemääräksi päätettiin 110 kg.

Stabiloidun savirakenteen nopea kuivuminen aiheutti saven pinnassa verkkohalkeilua (Kuva 15), joka joistakin kohdin tehdyin havainnoin näytti ulottuvan enintään $50...200$ mm:n syvyyteen eli ilman kuumuudesta ja auringonpaisteesta riippuen vaikutus jäi vain pintaan tai ulottui syvemmälle. Kuumalla ilmalla kosteuden haihtuminen rakenteesta on voimakasta ja haihtuminen voi olla nopeampaa kuin lujittumisessa tarvittava kosteuden säilyttäminen sallisi. Toimenpiteinä otollisen lujittumisen tarvitsevien olosuhteiden säilyttämiseksi tehtiin pinnan kastelua ja suojapeitteiden käyttö kahden kolmen päivän ajan rakenteen päällä.



Kuva 15. Nopea kuivuminen aiheutti saven pinnassa verkkohalkeilua.

3.3 Rakentamisen kustannukset

Kustannusseuranta toteutettiin koerakentamisesta sillä tarkkuudella kuin oli mahdollista mitata rakennusaineita ja rakentamiseen kohdistettuja työtunteja. Koerakentamisen kustannuksista ei ole suoraan nähtävissä vastaavan rakentamisen kustannuksia muutoin kuin arvioimalla massojen määriä, sekoittamisen kustannuksia, sideainekustannusta jne. Olettamalla jatkossa sideainetarpeeksi rakenneosasta riippuen 100...200 kg savikuutiota kohti saadaan sideainehinnaksi noin 35...110 mk, sekoittamisen kustannukseksi noin 5...10 mk savikuutiolle ja käsittelykustannuksiksi noin 10...30 mk savikuutiolle eli kokonaishinnaksi 50...150 mk rakennekuutiota kohti jälkitoimintaan ja yleiskustannuksineen.

Savirakenteen kustannukset rakennekuutiolle Viikin koerakentamisessa

	mk/m ³ -rtr
- sideainekustannus	90 - 110
- sekoitus	10
- siirrot, levitys, tiivistäminen	20 - 30
- jälkityöt	10
- yleiskustannukset	10
Yhteensä	140 - 160 mk/m ³ -rtr (75 - 90 mk/rakenne-m ²)

Tavoitekustannukset jatkossa katuluokasta ja lujuustarpeesta riippuen Viikin alueella

Tukikerroksena stabiloitu savi

	mk/m ³ -rtr
- sideainekustannus	60 - 80
- sekoitus	10
- siirrot, levitys, tiivistäminen	10
- jälkityöt	5
- yleiskustannukset	5
Yhteensä	90 - 110 mk/m ³ -rtr

Pengerrakenteena (pehmeä savi)

	mk/m ³ -rtr
- sideainekustannus	35 - 55
- sekoitus	5
- siirrot, levitys, tiivistäminen	10
- jälkityöt	-
- yleiskustannukset	5
Yhteensä	55 - 75 mk/m ³ -rtr

Melusuojaudet ja ympäristötäytöt

	mk/m ³ -rtr
- sideainekustannus	30
- sekoitus	5
- siirrot, levitys, tiivistäminen	10
- jälkityöt	-
- yleiskustannukset	5
Yhteensä	50 mk/m ³ -rtr

Kohteen referenssirakenteen kustannuksia ei myöskään pystytty erottelemaan, joten vertailuhintana tulee käyttää alueen kadunrakentamisen hintoja.

3.4 Savikadun mittaukset

Rakenteiden käyttäytymistä on seurattu mittaamalla päällysteen pinnan mahdollisia routanousuja ja painumia, rakenteiden kantavuutta sekä savirakenteen kosteutta ja lämpötiloja, jotta mahdolliset pinnan liikkeet ja kantavuuden muutokset pystytään arvioimaan ja syyt tulkitsemaan oikein. Routan kokonaissyvyys arvioidaan pakkasmäärätietojen ja savirakenteen lämpötilamittausten perusteella. Lisäksi mittauskerroilla tarkastetaan päällysteen pinnan mahdolliset vauriot.

3.4.1 Routanousumittaukset

Routanousujen mittaamista varten päällysteen pintaan asennettiin nastat, joiden korkeusasema on vaaittu tarkkavaaituksena ajoradan reunoilta (1,75 m keskilinjasta) ja keskilinjalta 5 metrin välein. Mittaukset on tehty talven kuluessa routan tunkeuduttua savirakenteen (tukikerroksen) läpi ja keväällä koko rakenteen sulattua. Talvella mittausvälit ovat olleet noin 1 kuukausi ja keväällä sulamisen alkaessa 2 viikkoa sulamisvaiheen loppuun asti.

3.4.2 Kantavuusmittaukset päällysteen pinnasta

Sulavan maan kantavuutta on mitattu levykuormituslaitteella stabiloidun savi-kerroksen sulamisen alkaessa. Kerroksen (0,55 m) arvioitu sulamisaika on noin kaksi viikkoa. Kantavuudet mitattiin ensimmäisenä sulamiskautena kadun molempien kaistojen keskeltä (keskilinjalta 1,75 m etäisyydeltä) 20 metrin välein (pl. 210, 230, 250, 270, 290, 310).

Tavoitteena on ollut tehdä kevätkantavuuden mittaus lujuuden ollessa alhaisimmillaan sulamisen aikana sekä sulamisen kokonaan tapahduttua, jolloin kantavuus yleensä paranee kesäolosuhteita vastaavaksi hyvinkin nopeasti.

3.4.3 Rakenteen kosteusmittaukset

Maaperän kosteuden mittaamiseen on käytetty TDR-menetelmää eli kaapelitutkaa. Mittauslaitteisto koostuu lähettimestä, vastaanottimesta ja oskilloskooppinäytöstä. Laite lähettää jatkuvaa nopean nousuajan omaavaa askeljännitettä laitteeseen liitettyyn siirtolinjaan (koaksiaalikaapeliin) ja mittaa takaisin heijastuvaa jännitettä kulkuajan funktiona. Maaperän kosteuden mittaaminen perustuu siihen, että siirtolinjan päähän asetetaan kaksi yhdensuuntaista metallisauvaa, joiden välissä oleva maa-aines toimii väliaineena. Menetelmällä määritetään se aika mikä jännitepulssilla menee, kun se kulkee metallisauvojen matkan. Mitatun ajan perusteella voidaan laskea maa-aineksen suhteellinen permittiivisyys eli dielektrisyysvakio. Maaperän vesipitoisuuden ja dielektrisyyden välillä on voimakas riippuvuus, joten vesipitoisuus voidaan määrittää mitatusta dielektrisyysvakioista.

3.4.4 Rakenteen ja pohjamaan lämpötilamittaukset

Stabiloidun rakenteen lämpötilat on mitattu vastusanturilla, jossa lämpötila muuttaa sen resistanssia, jonka vuorosuhde taas tunnetaan materiaaliakohtaisesti. Vastusanturin materiaalina on platina ja anturien tyyppi Pt 100.

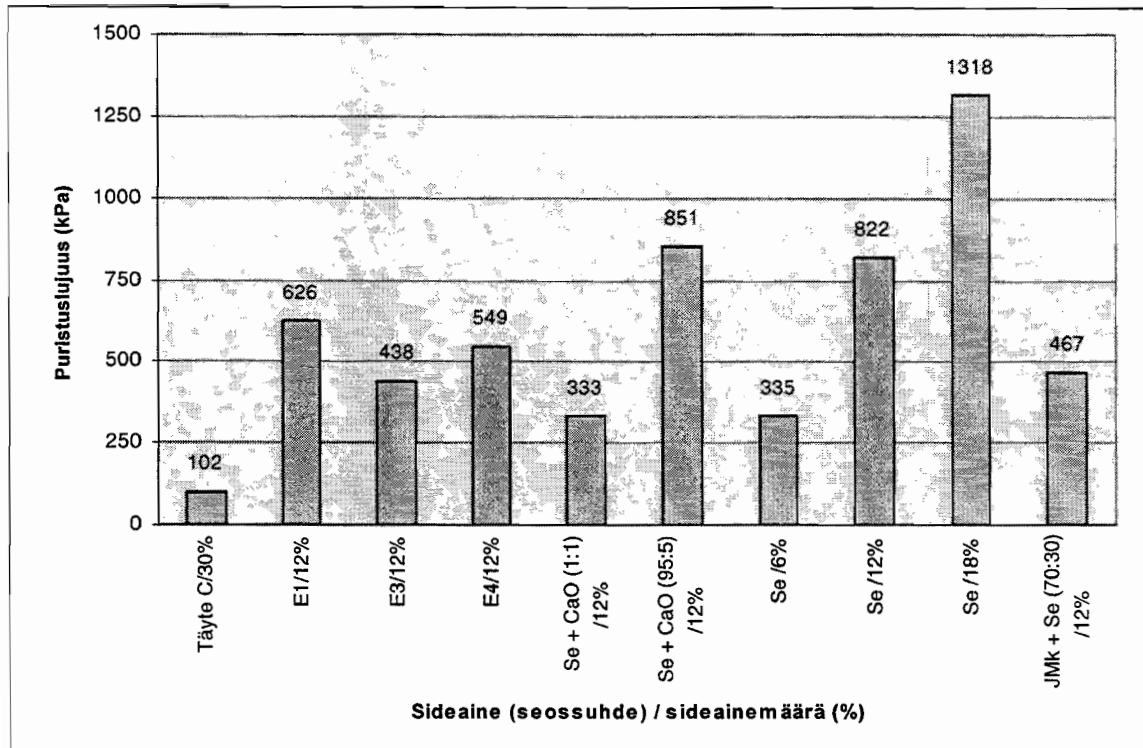
4. TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU

4.1 Materiaalitutkimukset

4.1.1 Ennakkokokeet

Tutkimusmateriaalien puristuslujuuksissa ei ollut merkittäviä eroja vertailtaessa Lohja Rudus Oy Ab:n ja Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion tekemiä kokeiden tuloksia. Stabiloitu savi oli molemmissa koesarjoissa otettu samasta paikasta (Viikki-Latokartanon alue) ja käytetyt sideaineet ja sideainepitoisuudet on esitetty taulukossa 2 (2.3 maamateriaali ja sideaineet).

Oulun yliopistossa tutkittujen stabiloitujen savimateriaalien puristuslujuudet 28 vrk:n lujittumisen jälkeen vaihtelivat sideainemäärällä 12 % 333...851 kPa välillä. Suurin puristuslujuus saatiin sementillä sideainemäärällä 18 % ja alhaisin täyteaineella C sideaine määrällä 30 % (Kuva 16).

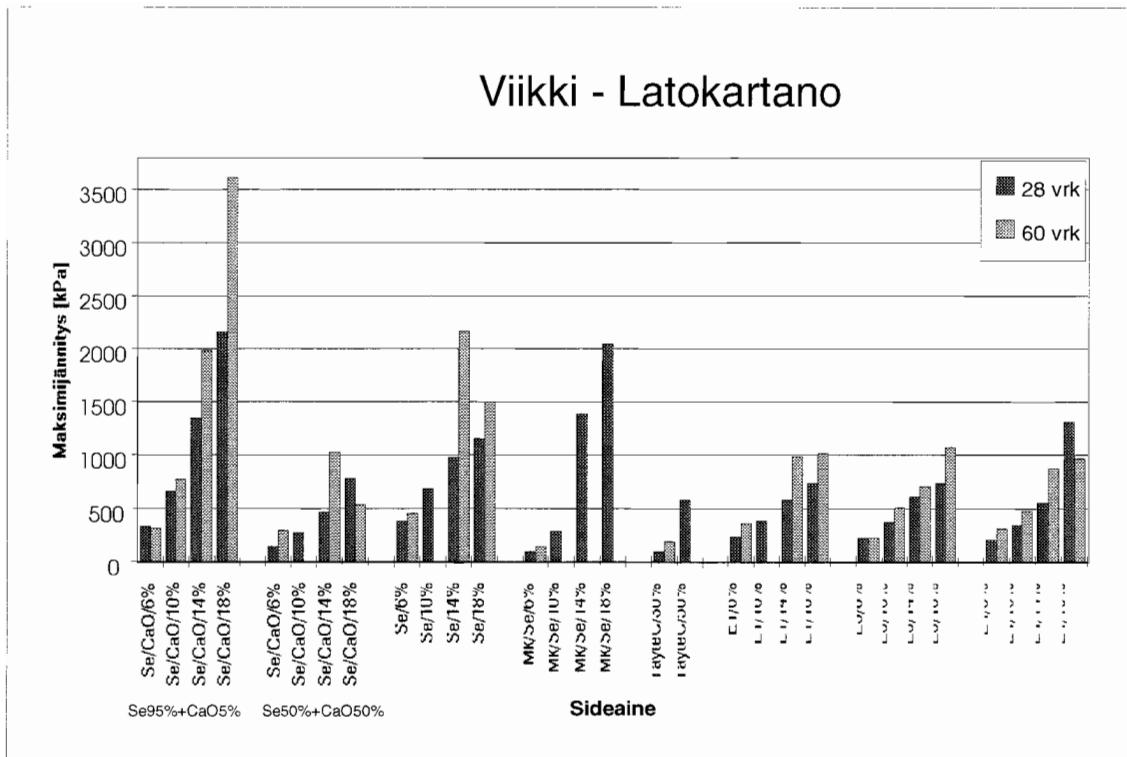


Kuva 16. Stabiloidun savimateriaalin puristuslujuudet 28 vrk:n ikäisinä. Puristuslujuus on laskettu kolmen rinnakkaisen koekappaleen puristuslujuuksien keskiarvona /3/.

Lohja Rudus Oy Ab:n sideaineseoksia E1, E3 ja E4 tarkastellen suurin puristuslujuus saavutettiin seoksella E1 (626 kPa). Erot lujuuksissa näiden kolmen sideaineseoksen välillä olivat kuitenkin pieniä. Sementillä ja Se+CaO (95:5) -sideaineseoksella saatiin lähes yhtä suuret puristuslujuudet. Se+CaO (1:1) -sideaineseoksella puristuslujuus oli 333 kPa ja sementtiaktivoitulla maasuonikuonalla vastaavasti 467 kPa. Sementillä stabiloidusta savesta havaitaan, että sideainemäärän kasvaessa puristuslujuus kasvaa lähes lineaarisesti.

Puristuslujuudet olivat suuruusluokaltaan yhtä suuria kuin Helsingin kaupungin Kiinteistöviraston geoteknisessä laboratoriossa valmistettujen näytteiden puristuslujuudet. Myös Lohja Rudus Oy Ab:n tekemiin puristuskokeisiin verrattuna Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion tulokset ovat samansuuntaisia (Kuva 17). Koekappalekohtaiset tulokset yksiaksiaalista puristuskokeista on esitetty Oy:n tutkimusraportissa /3/.

Lohja Rudus Oy Ab:n tekemissä kokeissa puristettiin sekä 28 vrk:n että 60 vrk:n ikäisiä koekappaleita (Kuva 17). Lisäksi puristuskokeen jälkeen koekappaleet hienonnettiin ja sullottiin uudelleen ja annettiin lujittua 14 vrk:ta ja 28 vrk:ta.



Kuva 17. Stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuudet 28 vrk:n ja 60 vrk:n ikäisinä (Lohja Rudus Oy Ab).

Sementin ja kalkin (CaO) sekoituksella (95%+5%) stabiloiduissa näytekappaleissa lujuuden kasvaminen ei ole aivan lineaarista vaan sideainepitoisuuksilla 14 % ja 18 % puristuslujuus on huomattavasti suurempi (1348 kPa ja 2158 kPa). Seossuhteella on myös selvä vaikutus puristuslujuuteen sementin ja kalkin sekoituksessa. Seossuhteella sementtiä 95 % ja kalkkia 5 % saadaan selvästi parempia puristuslujuuksia kuin seossuhteella 50 % ja 50 %. 60 vrk:n ikäisillä koekappaleilla puristuslujuuden kasvu on merkittävä vasta sideainepitoisuuksilla 14 % ja 18%.

Sementillä stabiloitujen 28 vrk:n ikäisten koekappaleiden puristuslujuudet kasvavat lähes lineaarisesti sideainepitoisuuden kasvaessa (vrt. Kuva 16). Maksimi puristuslujuus on Se/18%:lla (1152 kPa). Sementtipitoisuudella 14 % saatiin 60 vrk:n ikäisillä näytteillä suurin puristuslujuus, mikä on ristiriidassa vastaavan 28 vrk:n koekappaleisiin verrattuna.

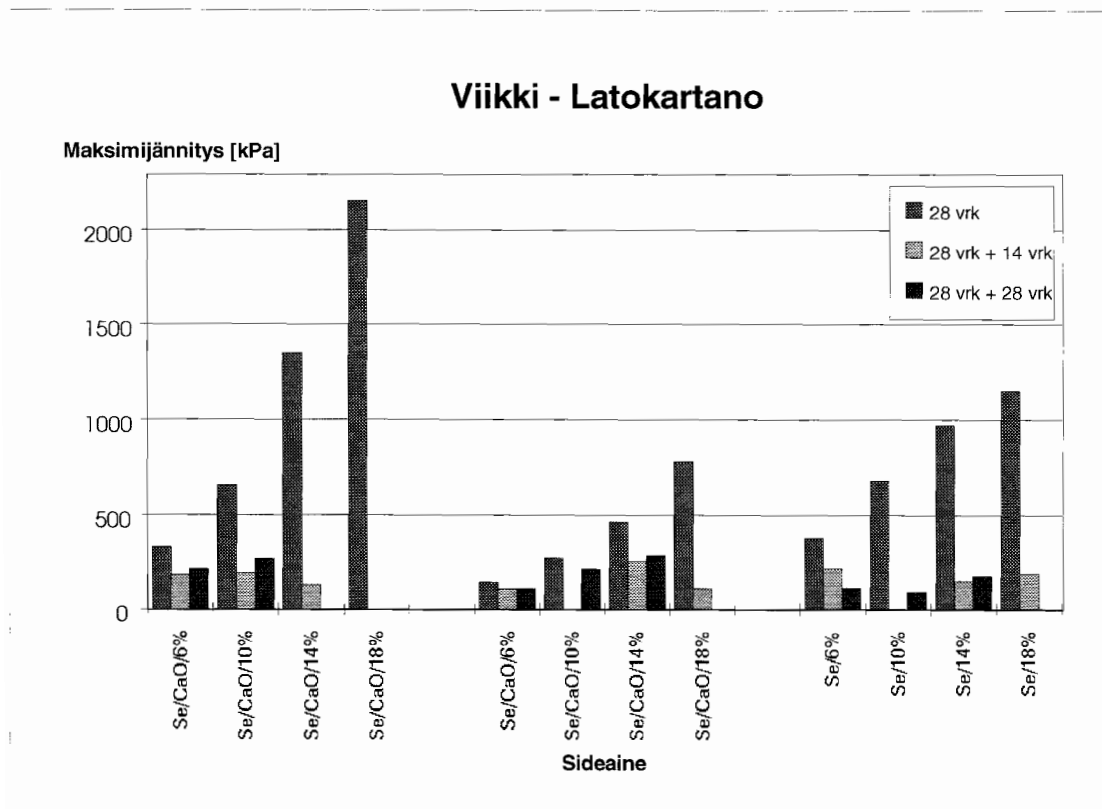
Masuunihiekalla ja sementillä stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuus alkoi kasvaa selvästi vasta pitoisuudella 14 % ja 18 %. Tällöin saavutettiin 28 vrk:n näytteillä puristuslujuudet 1389 kPa ja 2044 kPa. Saadut tulokset ovat samaa luokkaa kuin sementin ja kalkin sekoituksella saavutetut puristuslujuudet.

Täyteaineella C 28 vrk:n puristuslujuus oli suurempi 50 %:n pitoisuudella eli sideaineen lisäys antoi huomattavan paljon suuremman tuloksen (579 kPa) kuin pitoisuudella 30 %:a (95 kPa).

Sideaineilla E1, E3 ja E4 puristuslujuus kasvoi 28 vrk:n koekappaleilla lähes lineaarisesti sideainepitoisuuden kasvaessa lukuun ottamatta E4/18%:n huomattavasti korkeampaa puristustulosta (1311 kPa). Myös 60 vrk:n ikäisten koekappaleiden puristuslujuuksissa voidaan nähdä lineaarista kasvua sideainepitoisuuden kasvaessa.

Ensimmäisen testauksen jälkeen uudelleen sullottujen koekappaleiden puristuslujuudet sementin ja kalkin (CaO) sekoituksella eivät saavuttaneet 28 vrk:n ikäisinä samoja lujuuksia kuin ensimmäisellä kerralla (Kuva 18). Kaikilla sideainepitoisuuksilla tulokset olivat 20...40 % alhaisemmat.

Sementillä stabiloitujen koekappaleiden uudelleen sullonnan jälkeiset puristuslujuudet (28 vrk) jäivät selvästi alle ensimmäisen testauksen tulosten (Kuva 18).

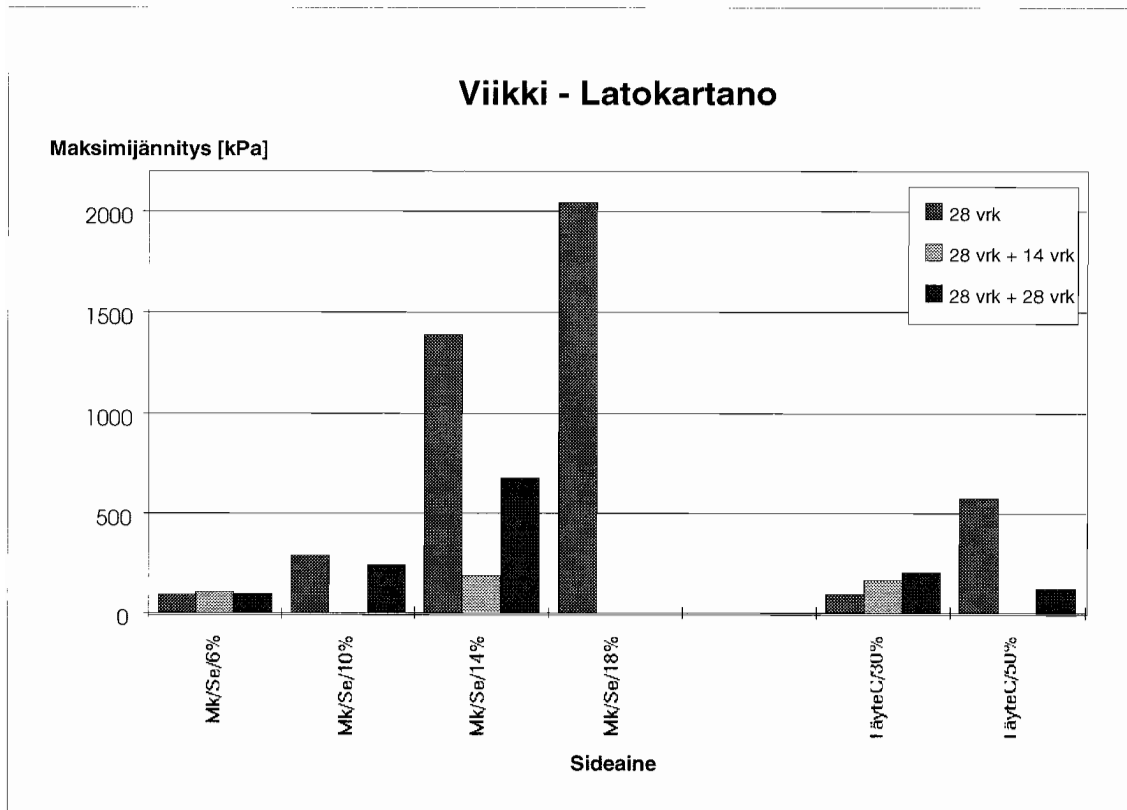


Kuva 18. Sementin ja kalkin (CaO) seoksella (70:30) stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuudet ensimmäisen ja toisen puristuskokeen jälkeen.

Sementin ja masuunihiekan sekoituksella stabiloitujen koekappaleiden uudelleen sullottujen näytteiden puristuslujuudet eivät vastanneet ensimmäisen koestuksen tuloksia (Kuva 19). Sideainepitoisuudella 6 % erot olivat melko pieniä mutta sideainepitoisuudella 18 % puristuslujuuksissa oli jo selvempi ero.

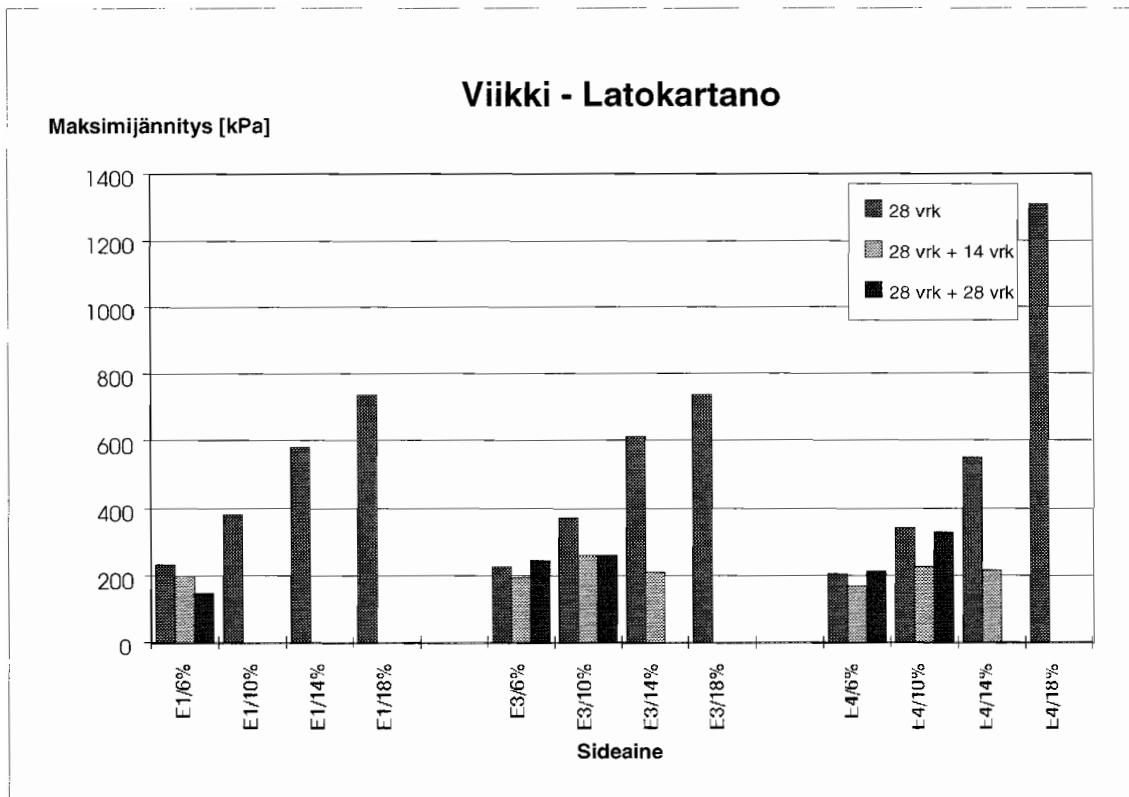
Lohjan sideaineella täytteellä C uudelleen sullottujen näytteiden puristuslujuudet paranivat 28 vrk:n ikäisillä näytteillä 30 %:n pitoisuudella. Sideainepitoisuudella 50 % sen sijaan ei saavutettu ensimmäisen koestuksen puristuslujuutta. Ensimmäisellä koestuskerralla 30 %:n sideainepitoisuudella puristuslujuuden

tulos oli 28 vrk:n ikäisenä oli 95 kPa ja toisella kerralla 176 kPa (28 + 14 vrk) ja 204 kPa (28 + 28 vrk).



Kuva 19. Sementin ja masuunihiekan seoksella (70:30) ja Lohjan seoksella täyte C:llä stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuudet ensimmäisen ja toisen puristuskokeen jälkeen.

Lohjan sideaineilla E1, E3 ja E4 stabiloitujen koekappaleiden uudelleen sulletujen näytteiden puristuslujuudet eivät kasvaneet verrattuna ensimmäiseen koestamiseen. Tulokset 28 vrk:n ikäisinä puristuslujuudet olivat joko samaa luokkaa tai alhaisempia (Kuva 20).



Kuva 20. Sementin ja E1, E3 ja E4 seoksella (70:30) stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuudet ensimmäisen ja toisen puristuskokeen jälkeen.

4.1.2 Routivuus

Routanousukokeen tulosten perusteella kaikki tutkitut materiaalit olivat routimiskertoimeen eli segregaatiopotentiaaliin perustuvan routivuusluokituksen /4/ mukaan routivia (Taulukko 6). Se+CaO (95:5) -seoksella sideainemäärällä 12 % sekä sementillä sideainemäärällä 18 % stabiloitu savimateriaali oli lievästi routivaa ($0.5 < SP < 1.5$). Sementtiaktivoidulla masuunikuonalla stabiloitu savi-materiaali oli routimiskertoimen perusteella keskinkertaisesti routivaa ($SP = 2.0$). Kaikki muut tutkitut materiaalit olivat erittäin routivia ($SP > 3$).

Sementillä stabiloidusta savesta havaitaan, että sideainemäärän suurentaminen pienentää materiaalin routivuutta. Massan tiivistäminen sideaineen sekoittamisen jälkeen (menetelmä 2) pääsääntöisesti pienensi murskatun ja uudelleentiivistetyn materiaalin routivuutta. Routivuuden muutos oli kuitenkin ainoastaan sementtiaktivoidulla masuunikuonalla stabiloidulla savimateriaalilla niin suuri, että routimiskertoimen arvon perusteella määritetty routivuusluokka muuttui. Koekohtaiset tulokset ja routivuutta kuvaavien tunnuslukujen välisiä riippuvuuksia on esitetty Oy:n tutkimusraportissa /3/.

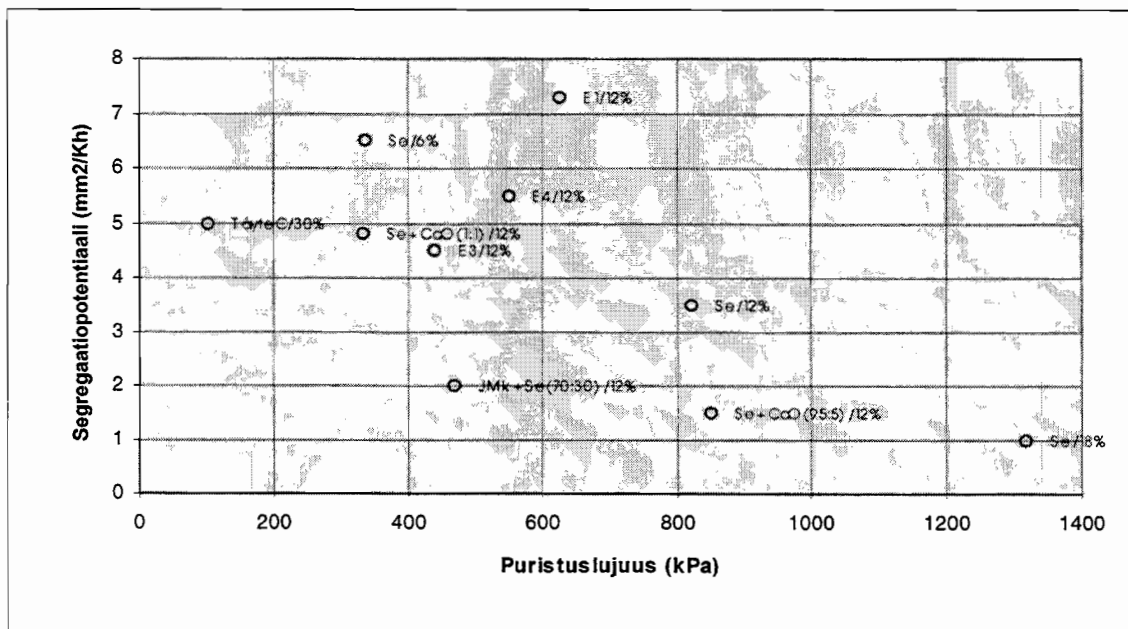
Taulukko 6. Routanousukokeiden tunnusluvut /3/.

Sideaine/ (seossuhde)/ sideainemäärä (%)	Kokonais- routanousu 96h h (mm)	Routanousu- suhde Z _{24h}	Routanousu- nopeus V _{24h} (mm/h)	Routimis- kerroin SP (mm ² /Kh)	Routimiskerto- meen perustuva routivuusluokitus
Täyte C /30% *)	7,7	0,13	0,26	5,0	Erittäin routiva
E1 /12% *)	11	0,12	0,31	7,3	Erittäin routiva
E3 /12% *)	11	0,14	0,34	4,5	Erittäin routiva
E4 /12%	14	0,09	0,21	5,5	Erittäin routiva
Se+CaO (1:1) /12%	10	0,06	0,19	4,8	Erittäin routiva
Se+CaO(95:5)/12%	5.3	0,03	0,06	1,5	Lievästi routiva
Se /6%	16	0,10	0,26	6,5	Erittäin routiva
Se /12%	9.8	0,04	0,12	3,5	Erittäin routiva
Se /18%	3.5	0,01	0,04	1,0	Lievästi routiva
JMk+Se(70:30)/12%	6.5	0,04	0,10	2,0	Keskinkertaisesti routiva
E1 /12% B	16	0,10	0,29	7,8	Erittäin routiva
Se+CaO (1:1) /12% B	12	0,07	0,22	7,3	Erittäin routiva
Se /12% B	8.7	0,05	0,14	3,8	Erittäin routiva
JMk+Se (70:30) /12% B	16	0,11	0,30	6,3	Erittäin routiva

B = näytteet valmistettu menetelmän 1 mukaisesti

*) Routanousukokeen kesto aika 45.5 h

Tulosten perusteella murskattavan massan 28 vrk:n iässä määritetty puristuslujuus korreloi murskauksen jälkeen tiivistetyn ja lujittuneen materiaalin routivuuden kanssa siten, että lujuuden kasvaessa routivuutta kuvaavien tunnuslukujen arvot pienenevät (Kuva 21). Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että voimakkaasti sitoutuneella materiaalilla on parempi kyky vastustaa routimisen aikaansaama raerungon löyhtymispyrkimystä.



Kuva 21. Ennakkokokeissa määritetyn puristuslujuuden (28 vrk) ja routanousukokeen perusteella määritetyn segregaatiopotentiaalin välinen riippuvuus /3/.

4.1.3 Jäätymis-sulamiskestävyys

Tilavuuden muutos kapillaarimatolla säilytetyillä koekappaleilla vaihteli 0...2.3 %:n välillä. Kokeen aikana materiaaleihin imeytyi vettä kapillaarisesti, mikä voitiin todeta koekappaleiden massan ja tilavuuspainon kasvamisena kokeen aikana. Kokeen jälkeen näiden materiaalien puristuslujuudet vaihtelivat 95...372 kPa:n välillä, lukuun ottamatta Jmk+Se (70:30) -sideaineseoksella sideainemäärällä 12 % stabiloidun savimateriaalin puristuslujuutta, joka oli 842 kPa. Tällä sideaineella ja sideainemäärällä myös menetelmällä 1 valmistetun puristuslujuus oli huomattavasti suurempi (897 kPa) kuin muilla sideaineilla. Tämä osoittaa, että sementtiaktivoidun masuunikuonan reaktiot jatkuvat materiaalin murskauksen ja tiivistämisen jälkeen voimakkaampina kuin muiden tässä tutkimuksessa käytettyjen sideaineiden reaktiot (Taulukko 7).

Taulukko 7. Materiaalien puristuslujuudet ja tilavuuden muutokset jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määritettynä /3/.

Sideaine/ (seossuhde)/ sideainemäärä	Koekappaleiden käsittely					
	Kapillaarimatto		Jäädytys-sulatus koekappale 1		Jäädytys-sulatus koekappale 2	
	Tilavuuden muutos ΔV (%)	Puristuslujuus s (kPa)	Tilavuuden muutos ΔV (%)	Puristuslujuus s (kPa)	Tilavuuden muutos ΔV (%)	Puristuslujuus s (kPa)
Täyte C /30%	1,0	95	2,8 (1)	-	2,0 (1)	-
E1 /12%	0,0	187	2,3 (1)	-	4,6 (1)	-
E3 /12%	1,3	103	5,6 (2)	-	7,7 (2)	-
E4 /12%	1,0	273	18	39	16	45
Se+CaO (1:1) /12%	0,2	372	15	90	18	57
Se+CaO (95:5) /12%	1,7	234	20	69	5,0 (3)	-
Se / 6%	0,2	180	12 (11)	-	19	42
Se /12%	1,8	172	12 (5)	-	8,7 (4)	-
Se /18%	2,3	198	7,4 (3)	-	7,3 (3)	-
Jmk+Se (70:30) /12%	1,3	842	16	67	17	45
E1 /12% B	1,8	149	4,3 (2)	-	9,8 (5)	-
Se+CaO (1:1) /12% B	0,6	363	1,6 (2)	-	16	56
Se /12% B	0,4	243	12 (5)	-	8,7 (4)	-
Jmk+Se (70:30) /12% B	1,0	897	16	59	160	65

B = näyte valmistettu menetelmän 1 mukaisesti

Huom! Tilavuuden muutosta osoittavissa sarakkeissa suluissa oleva luku on syklin numero, jossa koekappale rikkoontui.

Suurin osa jäädytys-sulatussyklejä (17/28 kpl) läpikäyneistä koekappaleista särkyi ennen kokeen lopetusta. Ehjänä säilyneiden näytteiden puristuslujuudet vaihtelivat 39...90 kPa:n välillä eli sideaineesta riippumatta puristuslujuudet olivat huomattavasti alhaisempia kuin kapillaarimatolla säilytettyjen. Kaikissa koekappaleissa havaittiin tilavuuden kasvua, joka 12 jäädytys-sulatussykliä kestäneillä koekappaleilla vaihteli 15...20 %:n välillä. Materiaalit imivät vettä kapillaarisesti, jonka seurauksen koekappaleiden massat kasvoivat kokeen aikana. Materiaalien tilavuuspainot kuitenkin pienenivät samalla johtuen materiaalien voimakkaasta jäätymislaajenemisesta (Taulukko 7).

Jäädytys-sulatussykliä välillä tehtyjä määrittelyjä ja materiaalien käsittelyä vaikeutti koekappaleiden pinnan liettyminen ja hauras rakenne. Koekappaleiden käsittelyn yhteydessä syntyi näytehävikkiä ja osa koekappaleista särkyi siirtämisen ja mittausten yhteydessä. Näytehävikin vuoksi koekappaleista mitattuja tilavuuden muutoksia on pidettävä materiaalien laajenemista kuvaavina minimiarvoina ko. kokeessa.

4.1.4 Lämmönjohtavuus

Jäädettämättömässä tilassa lämmönjohtavuudet vaihtelivat 0,54...0,67 W/Km välillä. Lämmönjohtavuus ei kasvanut merkittävästi materiaalin jäätyessä, vaikka materiaalin vesipitoisuus vaihteli kokeissa 52...58 % välillä (Taulukko 8). Pieni lämmönjohtavuuden arvo johtuu tn. siitä, että materiaalin murskauksen ja tiivistämisen jälkeen rakenteeseen jää ilmalla täyttyneitä lämpöä eristäviä huokosia.

Taulukko 8. Materiaalien jäädettämättömän ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet /3/.

Sideaine/ (seossuhde)/ sideainemäärä (%)	Kuivatiheys ρ_d (t/m ³)	Vesipitoisuus		Lämmönjohtavuus			
		w (%)	w _w (%)	jäädettämätön tila		jäätyneen tila	
				λ_d (W/Km)	λ_w (vesiupotus) (W/Km)	λ_i (W/Km)	λ_i (vesiupotus) (W/Km)
Täyte C /30%	0.976	52	66	0,67	0,76	0,73	1,04
E1 /12%	0.952	52	67	0,59	0,76	0,61	0,78
E3 /12%	0.921	57	73	0,58	0,65	0,66	0,53
E4 /12%	0.978	53	66	0,54	1,03	0,81	0,66
Se+CaO(1:1)/12%	0.845	58	79	0,62	0,78	0,62	0,72
Se+CaO(95:5)/12%	0.977	52	65	0,61	1,00	0,79	1,09

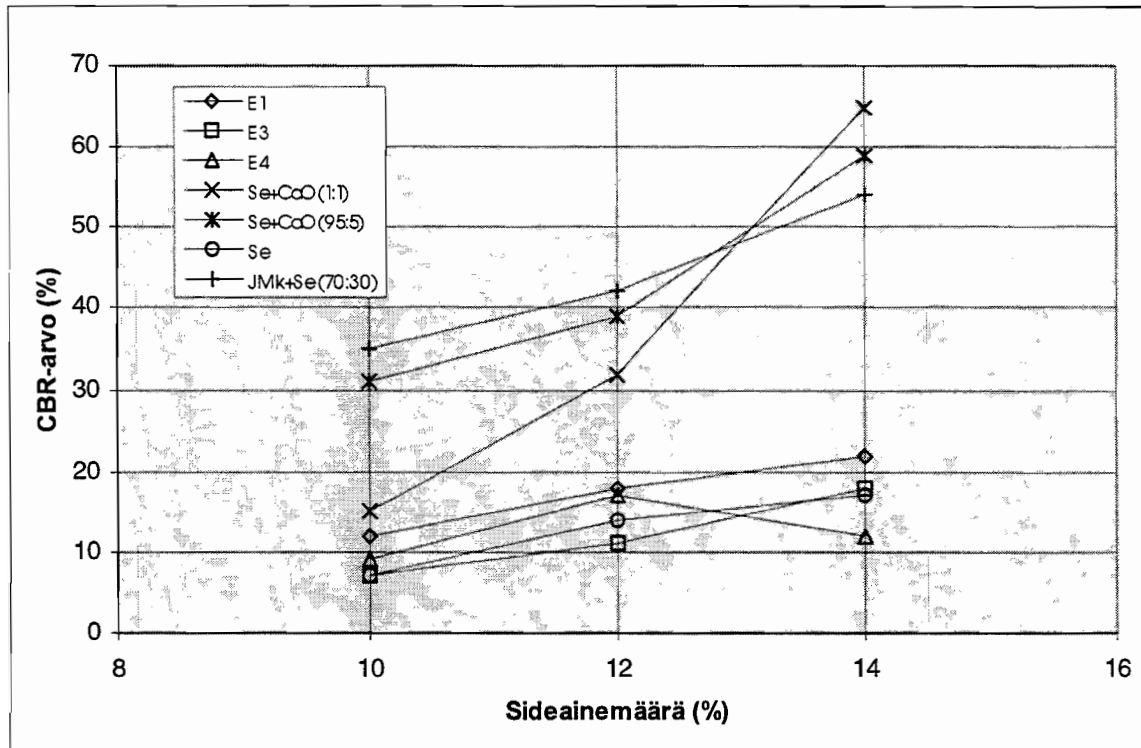
2 vrk:n vesiupotuksen jälkeen materiaalien jäädettämättömän tilan lämmönjohtavuudet vaihtelivat 0.76...1.03 W/Km välillä, eikä lämmönjohtavuus kasvanut merkittävästi materiaalin jäädyttyä (Taulukko 8). Vesipitoisuuden kasvu vesiupotuksen aikana on niin pieni (13...21 %-yksikköä), ettei se merkitsevästi kasvata materiaalin jäätyneen tilan lämmönjohtavuutta. Lisäksi materiaali laajenee jäätyessään, jolloin rakenteeseen voi syntyä ilmalla täyttyneitä lämpöä eristäviä huokosia.

Murskatun ja uudelleen tiivistetyn stabiloidun savimateriaalin lämmönjohtavuus oli sideaineesta riippumatta suuruusluokaltaan sellainen, että se toimii kuivissa olosuhteissa lämpöä jossain määrin eristävänä kerroksena katurakenteessa.

4.1.5 CBR-arvot

Jäädettämättömän materiaalin CBR-arvot vaihtelivat voimakkaasti sideaineesta ja sideainemäärästä riippuen. Sideaineilla E1, E3, E4 ja Se ei havaittu merkittävää CBR-arvon kasvamista sideainemäärän kasvaessa kymmenestä neljään-toista prosenttiin. Kalkkisementeillä ja sementtiaktivoidulla masuunikuonalla CBR-arvo kasvoi selvästi sideainemäärää lisättäessä. Voimakkainta kasvu oli Se+CaO (1:1) -sideaineseoksella. Se+CaO (95:5) ja JMk+Se (70:30) -sideaineseoksilla saavutettiin sideainemäärällä 10 % ja 12 % selvästi suurempi CBR-arvo kuin muilla käytetyillä sideaineilla (Kuva 22).

Sulaneen materiaalin CBR-arvot määritettiin Se+CaO (95:5) sideainemäärällä 12 % sekä JMk+Se (70:30) sideainemäärällä 14 % stabiloiduille materiaaleille. Muutokset jäädettämättömän materiaalin CBR-arvoihin olivat vastaavasti -1 % ja +11 %. Sementtiaktivoidulla masuunikuonalla tulos ei ollut johdonmukainen ja tulokset varmennettiin lisäkokeilla /17/.



Kuva 22. Jäädymättömän materiaalin CBR-arvot sideainemäärän funktiona /3/.

Verrattaessa lisäkokeiden tuloksia aikaisemman tutkimusvaiheen tuloksiin havaitaan, että Se+CaO (95:5) sideaineella CBR-arvot ovat suuruusluokaltaan yhtä suuria (Taulukko 9). Sitä vastoin Jmk+Se (70:30) sideaineella lisäkokeiden tulokset poikkeavat aikaisemmista tuloksista. Sideainepitoisuudella 10 %:a saatiin tässä tutkimuksessa noin puolet pienempi CBR-arvo kuin aikaisemmassa tutkimusvaiheessa. Vastaavasti 14 %:n sideainepitoisuudella saatiin noin 1,6 kertaa suurempi CBR-arvo kuin aikaisemmassa tutkimuksessa /17/.

Taulukko 9. Näytteiden CBR-arvot. Sulkuihin on merkitty aikaisemman tutkimusvaiheen tulokset.

Sideaine	Säilytys	CBR-arvo (%)
Se+CaO (95:5)/10%	vertailu	25 (31)
Se+CaO (95:5)/10%	olosuhde 1	5
Se+CaO (95:5)/10%	olosuhde 2	17
Se+CaO (95:5)/14%	vertailu	56 (59)
Se+CaO (95:5)/14%	olosuhde 1	21
Se+CaO (95:5)/14%	olosuhde 2	35
JMk+Se (70:30)/10%	vertailu	18 (35)
JMk+Se (70:30)/10%	olosuhde 1	4
JMk+Se (70:30)/10%	olosuhde 2	4
JMk+Se (70:30)/14%	vertailu	86 (54)
JMk+Se (70:30)/14%	olosuhde 1	19
JMk+Se (70:30)/14%	olosuhde 2	26

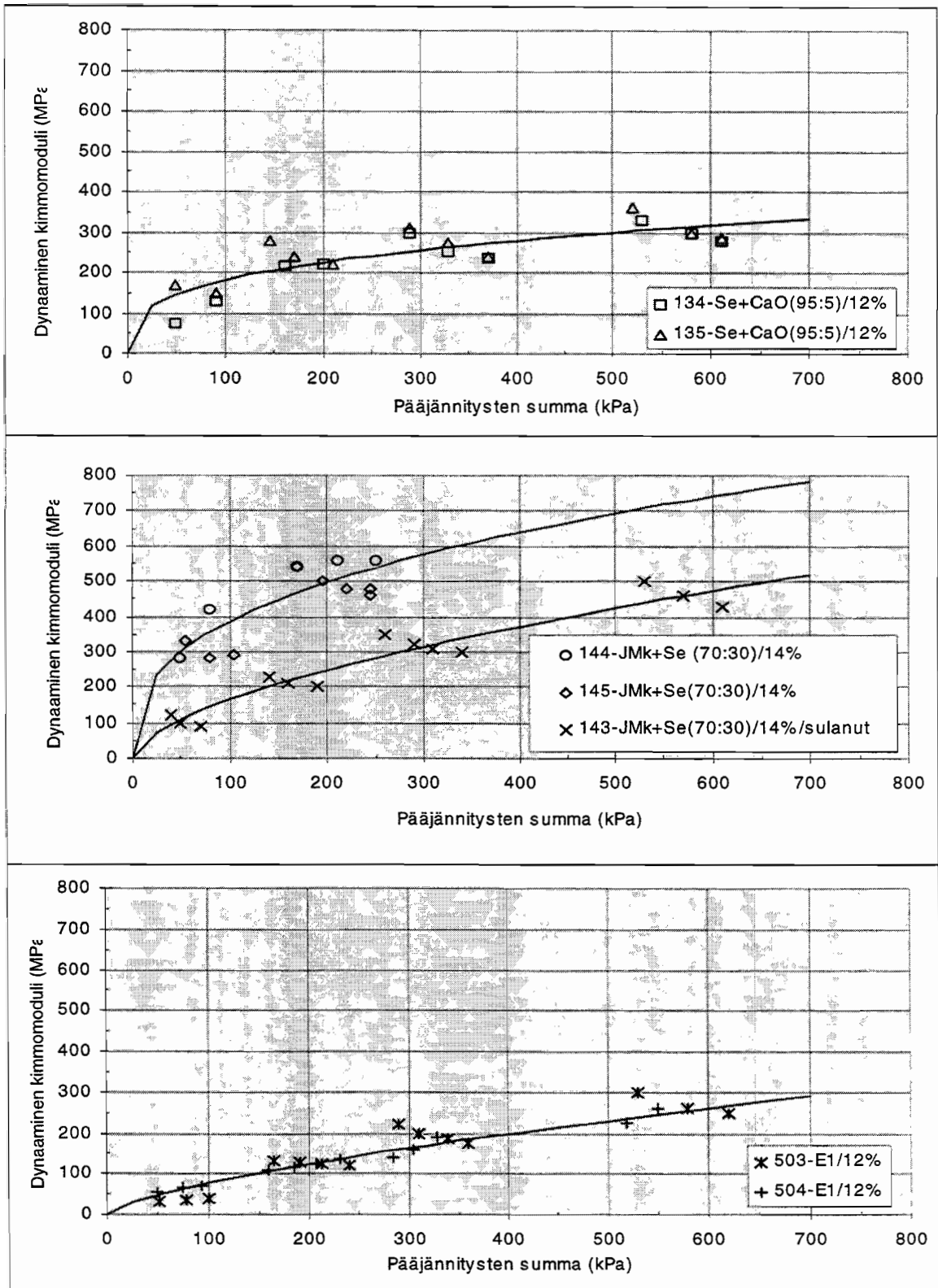
4.1.6 Dynaamiset kimmomoduulit

Jäädettämättömän materiaalin dynaamisten kimmomoduulien arvot pääjännitysten summalla $\theta = 100$ kPa vaihtelivat 77...386 MPa välillä (Taulukko 10, Kuva 23). Pienimmät arvot vastaavat suuruusluokaltaan esimerkiksi suodatinhiekan dynaamisen kimmomoduulin arvoja. Suurimmat mitatut arvot vastaavat esimerkiksi hyvälaatuisen murskeen dynaamisen kimmomoduulin arvoja /4/. Suurimmat jäädettämättömän materiaalin moduulit olivat JMk+Se (70:30)/14% sideaineella. Sideaineella Se+CaO (95:5)/12% moduulit olivat jännitystasosta riippuen noin 50 % pienemmät ja E1/12% sideaineella vastaavasti noin 80 % pienemmät. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin CBR-kokeissa.

Taulukko 10. Materiaaliparametrit K1 ja K2, suoritettujen regressiosovitusten selitysaste sekä dynaamiset kimmomoduulit eri pääjännitysten summien arvoilla /3/.

Sideaine	K1	K2	R ²	Dynaaminen kimmomoduuli (MPa)		
				$\theta = 50$ kPa	$\theta = 100$ kPa	$\theta = 150$ kPa
E1/12%	769	0.683	0.976	48	77	101
Se+CaO(95:5)/12%	1812	0.312	0.692	146	181	206
JMk+Se(70:30)/14%	3858	0.364	0.700	300	386	447
JMk+Se(70:30)/14%/sulanut ¹⁾	1636	0.593	0.925	108	164	208

¹⁾ ei rinnakkaisnäytettä (koekappale hajosi)

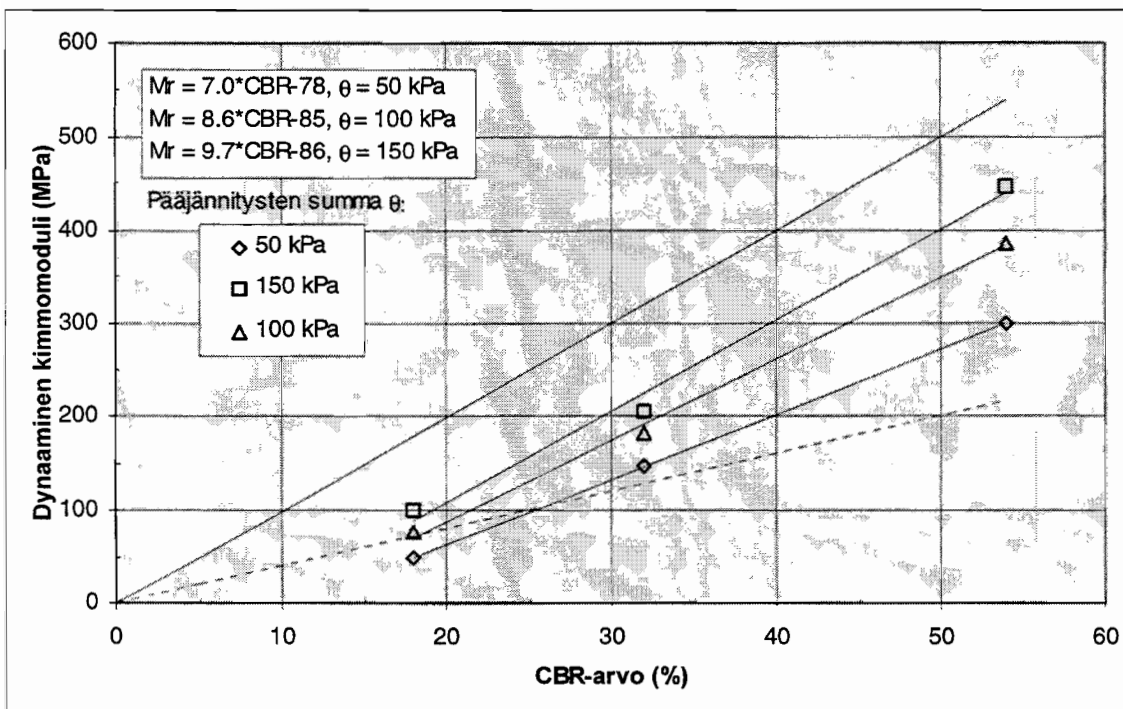


Kuva 23. Stabiloidun materiaalin dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan funktiona /3/.

Sideaineella JMk+Se (70:30)/14% sulaneen materiaalin moduulit olivat selvästi jäädyttämättömän materiaalin moduuleja pienemmät. Esimerkiksi pääjännityk-

sen summalla $\theta = 100$ kPa moduulit alenivat jäädytys-sulatusjakson läpikäyneellä materiaalilla 58 %. Tulos on ristiriitainen vastaavalla materiaalilla tehtyjen CBR-kokeiden tulosten kanssa. Kyseinen näyte imi vettä jäädytysvaiheessa, joten ilmeisesti vesipitoisuuden kohoaminen jäädytysjakson aikana pienensi materiaalin moduulia. CBR-kokeessa näytteeseen kohdistuva kuormitus on dynaamisesta kokeesta poiketen luonteeltaan staattinen ja hidas sekä mittaus tapahtuu näytteen pinnasta, jolloin kokeessa syntyy eroja dynaamiseen kokeeseen verrattuna.

Kuvassa 24 on esitetty sideaineilla E1/12%, Se+CaO(95:5)/12% ja JMk+Se(70:30)/14% stabiloitujen savien dynaamiset kimmomoduulit CBR-arvojen funktiona. CBR-arvojen ja dynaamisten kimmomoduulien välillä on havaittavissa selvä lineaarinen riippuvuus, joka on sidoksissa dynaamisen kolmiaksiaalikokeen aikana vallitsevaan pääjännitysten summaan.



Kuva 24. Jäädettämättömän materiaalin CBR-arvon ja dynaamisen kimmomoduulin välinen riippuvuus kolmella pääjännitysten summalla /3/.

Esimerkiksi pääjännitysten summalla $\theta = 100$ kPa saatiin yhtälön 2 mukainen riippuvuus dynaamisen kimmomoduulin ja CBR-arvon välille.

$$M_r = 8.6 * CBR-85 \quad (2)$$

Kirjallisuudessa on esitetty useita empiirisiä yhtälöitä, joiden avulla voidaan laskea dynaaminen kimmomoduuli CBR-arvon perusteella. Tielaitoksella on ollut käytössä yhtälön 4 /9/ mukainen menettely ja SHELL:n mitoitusmenetelmässä /6/ käytetään yhtälöä 3. Kyseisissä yhtälöissä ei huomioida jännitystasoa, jolla moduuli on määritetty.

$$E = 10 \cdot CBR \quad (3)$$

$$E = 4 \cdot CBR \quad (4)$$

Lisäkokeissa sideaineella JMk+Se (70:30) sideainepitoisuudella 14% vertailunäytteen moduulit olivat noin puolet pienempiä kuin aikaisemmassa tutkimusvaiheessa (Taulukko 11). Ilmeisesti tässä tutkimuksessa määritetyt tulokset ovat näiltä osin virheelliset. Virhe aiheutunee näytteen valmistuksen yhteydessä tapahtuneesta inhimillisestä erehdyksestä. Kokeita ei voitu uusida, koska varakoeappareita ei ollut valmistettu. Sideaineella Se+CaO (95:5) saatiin aikaisemmassa tutkimusosassa sideainepitoisuudella 12% lähes yhtä suuria moduuleja kuin tässä tutkimuksessa vastaavalla sideaineella 10 %:n sideainepitoisuudella.

Taulukko 11. Näytteiden dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan arvoilla 50, 75, 100 ja 150 kPa. Sulkuihin on merkitty aikaisemman tutkimusvaiheen tulokset.

Sideaine	Säilytys	Dynaaminen kimmomoduuli (MPa)			
		$\theta = 50 \text{ kPa}$	$\theta = 75 \text{ kPa}$	$\theta = 100 \text{ kPa}$	$\theta = 150 \text{ kPa}$
Se+CaO (95:5)/10%	vertailu	160	185	205	235
Se+CaO (95:5)/10%	olosuhde 1	58	64	68	74
Se+CaO (95:5)/14%	vertailu	143 (146 ¹)	188	228 (181 ¹)	300 (206 ¹)
Se+CaO (95:5)/14%	olosuhde 1	63	74	83	97
JMk+Se (70:30)/10%	vertailu	199	212	222	237
JMk+Se (70:30)/10%	olosuhde 1	x	x	x	x
JMk+Se (70:30)/14%	vertailu	125 (300)	140	151 (386)	168 (447)
JMk+Se (70:30)/14%	olosuhde 1	59	76	90	114

x = tiedostot tuhoutuivat

¹⁾ sideainepitoisuus 12%

Dynaamiset kimmomoduulit määritettiin myös jäädytys-sulatussykliä jälkeen CBR-kokeella koestetulle murskatulle materiaalille. Materiaali murskattiin CBR-kokeen jälkeen alle 10 mm rakeiksi, tiivistettiin muottiin ja koestettiin välittömästi (ei lujittumista) dynaamisella kolmiakselikokeella. Moduulien arvot ovat pääjännitysten summan arvolla $\theta = 75 \text{ kPa}$ 26...27 MPa (Taulukko 12) eli moduulit olivat yli puolet pienempiä kuin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määritetyt dynaamiset kimmomoduulit.

Taulukko 12 . CBR-kokeen jälkeen murskatun ja uudelleen tiivistetyn materiaalin dynaamiset kimmomoduulit pääjännitysten summan arvoilla 50, 75 100 ja 150 kPa.

Sideaine	Dynaaminen kimmomoduuli (MPa)			
	$\theta = 50 \text{ kPa}$	$\theta = 75 \text{ kPa}$	$\theta = 100 \text{ kPa}$	$\theta = 150 \text{ kPa}$
Se+CaO (95:5)/10%	24	27	30	34
Se+CaO (95:5)/14%	20	26	32	43

4.1.7 Vedenläpäisevyys

Stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyydet ovat $1 \cdot 10^{-9} \dots 3.5 \cdot 10^{-11}$ välillä eli arvot vastaavat hienon siltin ja saven vedenläpäisevyyksiä (Taulukko 13). Itse sideaineiden välillä vedenläpäisevyyksien erot ovat marginaalisia. Lohjan E1 sideaineella pitoisuuksien 6 % ja 14 % vedenläpäisevyydet ovat samaa luokkaa. Sementin ja kalkin (CaO) seoksella stabiloitujen näytteiden sideainepitoisuuksilla 6 % ja 14 % mitatut vedenläpäisevyydet ovat lähes samat. Masuunihiekalla ja sementillä stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyyksissä on suurempi ero.

Taulukko 13. Stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyyksiä.

Sideaine/ (seossuhde)/si- deainemäärä	Märkälavuuspaino	Vesipitoisuus	Vedenläpäisevyys K _{20°C}	
(%)	[kN/m ³]	[%]	(m/s)	(m/s)
E1 /6%	15.68	33.6	-8.99	1.001E-09
E1 /14%	16.67	33.2	-9.75	1.771E-10
Se+CaO(95:5)/6%	15.77	38.4	-9.51	3.114E-10
Se+CaO(95:5)/14%	14.94	30.9	-9.68	2.093E-10
JMk+Se(70:30)/6%	14.63	37.3	-8.45	3.527E-09
JMk+Se(70:30)/14%	17.18	31.3	-10.45	3.547E-11

4.2 Savtien rakennetutkimukset

4.2.1 Seurantajärjestelmän valinta

Seurantajärjestelmän valinnan perusteena oli stabiloidun savikerroksen merkityksetön kokoonpuristuminen, jolloin mahdolliset painumat tapahtuvat alemmissa kerroksissa ja pohjamaassa. Lämpötila-anturien asennuksella varmistettiin riittävä tiedonsaanti roudan etenemisestä katurakenteessa, jolloin mahdollisten routanousujen paikantaminen katurakenteessa on mahdollista. Lisäksi rakenteeseen asennettiin kosteusanturit, joiden avulla pystytään arvioimaan rakenteen vesipitoisuutta ja sen vaikutusta mahdollisiin routanousuihin ja kantavuuden heikentymiseen. Kadun pinnan routanousut päätettiin vaaita ja kantavuus mitata levykuormituskokeella seurantaohjelman mukaisesti useamman vuoden ajan. Näiden edellä esitettyjen näkökohtien perusteella luovuttiin mm. erityisten painumalevyjen käytöstä, koska riittävä tieto kadun routanousuista ja painumista sekä kantavuudesta katsottiin saatavan em. lähtöoletuksilla ja mit-

tauslaitteilla. Seurantaohjelmaan sisällytettiin myös päällysteen vauriokartoitus tietyin väliajoin.

Stabiloidusta savesta oli tarkoitus ottaa häiriintymättömiä näytekappaleita mutta kerroksen kovuuden ja haurauden takia ehjiä koekappaleita ei saatu.

4.2.2 Routanousumittaukset

Talvikautena 1997-98 savikadun pinnan vaaitustulosten mukaan pinnassa tapahtui pientä rakenteen jäätymisestä aiheutunutta nousua. Routanousun suuruus oli maksimissaan kadun keskilinjalla yhdessä vaaituspoikkileikkauksessa yli 10 mm ja muualla koeosuuksilla 1 ja 2 enintään 5...7 mm. Koeosuudella 3 on tapahtunut tien pientä painumista ja sillä osuudella routanousun tarkka arviointi on vaikeaa, mutta sen suuruus on enintään noin 5 mm kadun keskilinjalla. Kadun reunoissa routanousua oli keskimäärin 2...5 mm keskilinjan routanousua suurempi, mihin syynä voi olla rakenteen reunan hieman suurempi kosteus.

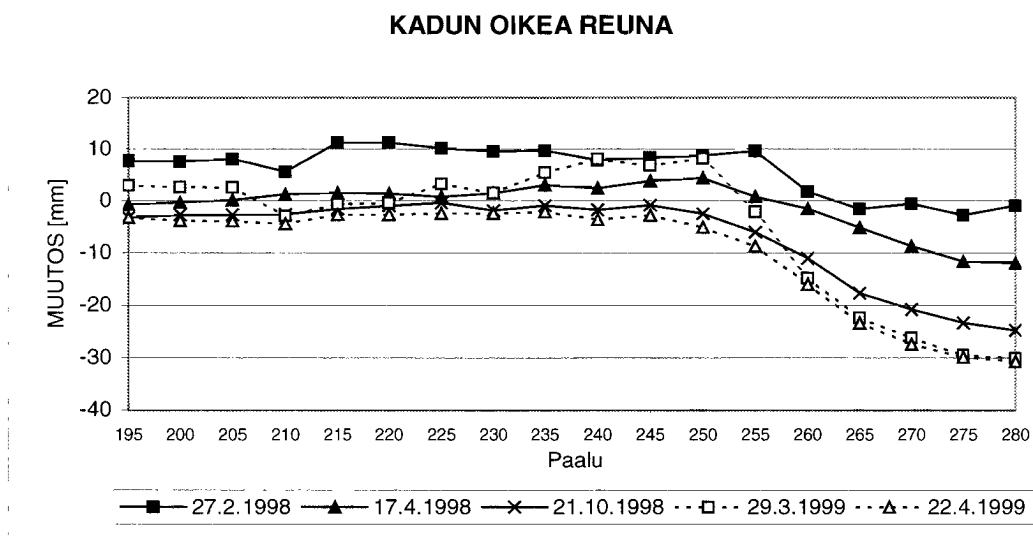
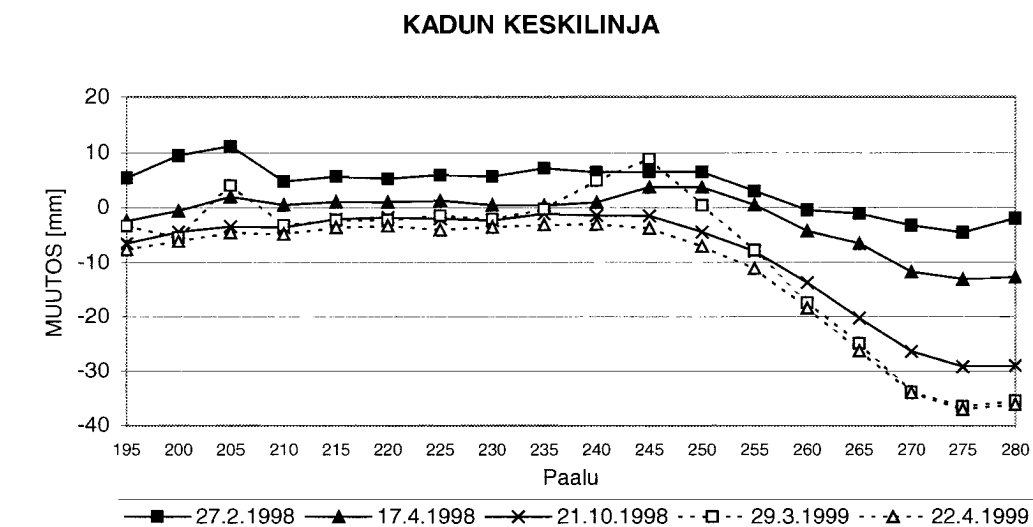
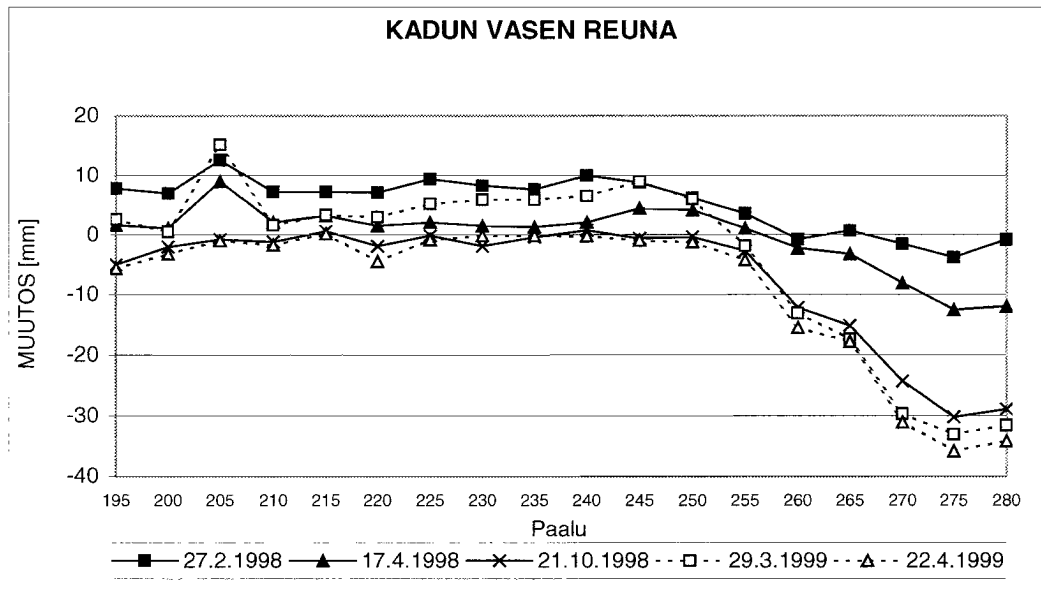
Talvikausi 1998-99 oli tammikuun osalta tavallista kylmempi ja sen jälkeen edellisvuotta hieman leudompi ja erittäin runsasluminen. Lumen määrällä toisin ei ole paljoakaan merkitystä roudan syvyyteen eikä routanousuihin, koska katu oli aurattuna koko talven. Kevään 1999 vaaitustuloksista nähdään, että kadussa edelleen tapahtui pientä routanousua, tosin nousujen suuruus oli edellisvuotta pienempi.

Routanousu talvikaudella 1998-99 on laskettu syksyn 1998 vaaituksen ja talven 1999 erotuksesta. Maksimi routanousu (16 mm) oli samassa poikkileikkauksessa kuin edellisvuonnakin. Tällä kertaa kuitenkin kadun vasemmassa reunassa. Keskilinjalla koeosuuksilla 1 ja 2 routanousu oli keskimäärin pientä noin 0...5 mm. Koeosuus 3 painui edelleen, jolloin routanousun tarkka arviointi oli vaikeaa. Routanousun suuruus oli samaa luokkaa kuin talvikaudella 1997-98 eli enintään noin 5 mm kadun keskilinjalla. Kadun reunoissa routanousu oli yhä keskimäärin 2...5 mm keskilinjan routanousua suurempi.

Routanousu- ja painumamittausten tulokset on esitetty kuvassa 25 kadun keskilinjalta sekä molemmilta kaistoilta (1,75 m vasemmalle ja oikealle keskilinjasta).

Kaikkiaan routaliikkeet ovat pieniä ja ne ovat aiheutuneet veden jäätymisestä ja siitä seuranneesta rakenteen laajenemisesta eikä niinkään routimisen tapahtumisesta. Koko rakennepaksuudelle jakautuva jäätymislaajeneminen ei riko rakennetta siten kuin routiminen jäälinsien muodostuessa rikkoisi.

Paalusta 255 lähtien on tapahtunut pientä kadun painumaa, joka johtuu kadun pohjasuhteiden muuttumisesta kalliosta pehmeäksi saveksi. Savialueella katu on perustettu osin syvästabiloinnille ja osin ilman pohjanvahvistusta massanvaihdoilla. Savikadun louhitut ja syvästabiloidut alueet on esitetty liitteessä 1.

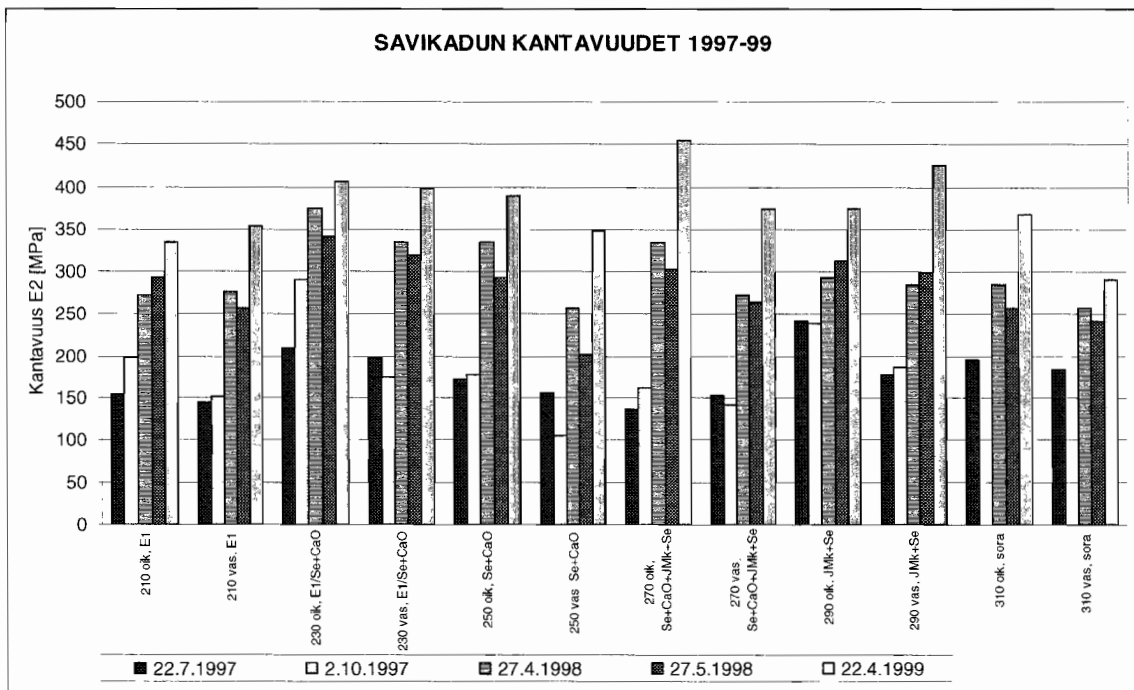


Kuva 25. Viikin savikadun routanousu- painumamittaukset (1998-1999).

4.2.3 Kantavuusmittaukset päällysteen pinnasta

Kantavuusmittaustulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2. Mittauksia on tehty kesästä 1997 kevääseen 1999 asti. Mittausten mukaan savikadun kantava kerros ja mahdollisesti myös stabiloitu jakava kerros ovat löyhtyneet jäätyminen vaikutuksesta. Kantavuusarvojen E_2 ja E_1 suhteen (E_2/E_1) suuresta arvosta ($>2,2$) päätellen nimenomaan kantavan murskekerroksen löyhtyminen on ilmeisempää. Kosteus- ja lämpötilahavaintojen perusteella on pääteltävissä, että vain osa stabiloidun rakenteen vedestä on jäänyt talven 1997-98 ja 1998-99 pakkasilla. Tästä johtuen myöskään rakenteen mahdollista jäätymislaajenemista ei ole tapahtunut merkittävästi. Kevätkantavuuden mittaus tehtiin lujituksen ollessa alhaisimmillaan sulamisen kokonaan tapahtuttua mutta rakenteen ollessa kosteimmillaan. Kantavuus yleensä paranee kesäolosuhteita vastaavaksi hyvinkin nopeasti ja tämä varmistettiin kesäkantavuuksien mittauksella vuonna 1998. Vuoden 1999 kantavuusmittauksista nähdään, että stabiloidut rakenteet ovat lujittuneet edelleen viime vuoden mittauksista.

Kadulta mitattuja levykuormituskokeiden kantavuuksia E_2 (Kuva 26) voidaan yrittää verrata laboratorioissa saatuihin CBR-kokeiden tuloksiin muuntamalla E_2 -luvut kaavojen 3 ja 4 avulla CBR-luvuksi. Liitteessä 3 on esitetty sekä levykuormituskokeen E_2 muunnokset CBR-luvuiksi. Vertailusta nähdään, että kaavaa 4 soveltamalla saadaan $CBR=E_2/4$. Tämä kaava antaa savikerroksen päältä samansuuntaisia kantavuusarvoja. Sen sijaan päällysteen päältä mitattujen levykuormituskokeiden kantavuusarvot poikkeavat jo enemmän johtuen siitä, ettei laboratorioissa ollut mahdollisuutta tutkia päällysteen alla olevan stabiloidun saven CBR-lukua.



Kuva 26. Viikin savikadun kantavuusmittaukset (E_2) vuosina 1997-1999. Kantavuudet mitattiin levykuormituskokeella.

4.2.4 Rakenteen kosteusmittaukset

Kaudella 1997-98 tehtyjen kosteusmittausten perusteella stabiloidun savirakenteen vesi jäättyi vain osittain. Syynä oli talven lämpimyys ja stabiloidun saven ominaisuudet, jolloin jäätyminen tapahtuu kokonaisuudessaan vasta -5...-7 °C lämpötiloissa. Leutona talvena on siten mahdollista, että rakenteeseen kerääntyy lisää kosteutta, jos sitä "mahtuu" rakenteeseen. Tilanne, jossa kaikki vesi ei ole jäätynyt, on toisaalta helpompi, koska tällöin jäätyvällä vedellä on laajentumista varten vapaata tietä huokostilassa. Talvikauden 1998-99 kosteusmittauksissa ei tapahtunut suuria muutoksia verrattuna edellisvuoteen. Stabiloidut rakenteet jäättyivät jälleen vain osittain. Kosteusmittausten (Taulukko 14) perusteella sitomattomat kerrokset ovat jäätyneet kokonaan.

Taulukko 14. Koerakenteista mitatut kosteuspitoisuudet vuosina 1997-1999. Suluissa annetuissa arvoissa rakenne on ollut osittain jäässä.

Mittauspisteet	Mittauskohtien kosteudet, tilavuus-%								
Vuosi	1997		1998					1999	
Pvm	21.08	25.11.	13.2.	27.2.	22.4.	23.6.	13.10.	3.3.	21.4.
Koerak 1 pl. 210	32,7	40,0	(21,1)	29,5	45,5	42,5	40,0	(30,2)	40,8
Koerak 2 pl. 250	36,1	45,3	(31,7)	29,4	53,0	42,1	40,4	(30,1)	44,2
Koerak 3 pl. 290	40,0	39,3	(36,4)	37,2	43,6	38,6	43,6	(34,6)	42,2
Referenssirak. pl. 330	18,4	19,0	(-)	< 1	20,4	12,4	14,4	(3,1)	15,8

Savirakenteen kosteudet tulisi mitata jatkossa muutosten suuruuden ja suunnan selvittämiseksi. Rakenteen kestävyys kannalta on oleellista, ettei savirakenne ime itseensä vettä ennen pakkaskauden alkua vuoden 1997 syksyä enempää. Kevään 1998 mittauksen mukaan kosteudet kohosivat vajaa kymmenen prosenttia viime vuoden tasosta. Rakenne kuivui kesäkuun 1998 puoliväliin mennessä viimevuotiselle tasolle ja lokakuussa kosteus oli samaa luokkaa. Maalis- huhtikuun vaihteessa 1999 kovimman pakkasjakson jälkeen kosteudet mitattiin jälleen ja tulosten mukaan stabiloitujen kerrosten kosteudet ovat aikaisempien vuosien tasolla ja muutokset hyväksyttävän pieniä.

4.2.5 Rakenteen ja pohjamaan lämpötilamittaukset

Talvikausi 1997-98 oli alkutalven osalta poikkeuksellisen lauha ja tästä johtuen koerakenteiden jäätymistä ei tapahtunut ennen helmikuun lopulla alkanutta pakkaskautta. Rakenteen lämpötila on kuitenkin ollut hyvin lähellä nollaa joulukuusta lähtien. Lumikerroksen paksuus on lauhasta ilmasta johtuen ollut pieni eikä koerakenteiden reunoilla ole ollut mainittavia kinoksia.

Talvikauden 1998-99 alku oli kylmempi varsinkin tammikuussa edellisvuoteen verrattuna mutta loppukausi taas oli normaalia lauhempi, ja koerakenteet jäättyivät jo alkutalvesta. Rakenteen lämpötilat olivat samalla tasolla kuin talvikaudella 1997-98. Lumikerroksen paksuus oli poikkeuksellisen suuri mutta aurauksen takia koerakenteiden reunoilla ei ole kuitenkaan ollut tavallista suurempia kinoksia.

Lämpötilamittausten tulokset on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Mittauspisteiden lämpötilat mitattuna eri ajankohtina vuosina 1997-1999.

Mittauspisteet	Lämpötilat °C, 1997-99									
Vuosi	1997		1998					1999		
Pvm	21.08.	25.11.	13.2.	27.2.	22.4.	23.6.	13.10.	19.1.	3.3.	21.4.
Koerak 1 pl. 210										
pinta (musta)	22,2	0,5	-4,1	-1,6	8,1	15,6	8,9	-0,8	-1,7	11,4
keskik. (sin.)	20,5	1,5	-2,7	-1,9	6,0	16,6	9,8	-0,8	-1,5	9,7
pohja (vihr.)	19,5	3,1	-1,4	-1,0	4,4	16,3	10,7	0,0	-0,7	7,6
Koerak 2 pl. 250										
pinta (musta)	20,2	1,0	-2,9	-1,5	6,8	15,0	9,1	-0,7	-1,3	10,0
keskik. (sin.)	18,8	2,7	-1,3	-1,0	4,2	15,1	10,4	-0,1	-0,9	7,6
pohja (vihr.)	17,7	3,8	-0,4	-0,2	3,4	14,1	10,8	1,4	0,4	6,5
Koerak 3 pl. 290										
pinta (musta)	20,5	0,9	-3,6	-1,7	6,5	14,9	8,8	-1,0	-1,7	9,7
keskik. (sin.)	19,7	1,9	-2,3	-1,7	4,1	15,5	9,4	-1,1	-1,5	8,4
pohja (vihr.)	19,5	3,3	-1,3	-1,1	3,0	15,6	10,3	-0,4	-1,0	7,1
Referenssirak pl. 330										
pinta (lyhin)	21,5	1,2	-3,6	-1,7	5,5	14,7	8,6	-0,6	-1,6	8,7
keskik. (keskim.)	20,4	1,5	-3,1	-1,6	3,3	15,8	9,6	-0,5	-1,5	8,5
pohja (pisin)	20,6	2,6	-1,8	-1,0	2,2	14,2	10,1	0,2	-0,6	8,6

4.2.6 Päällysteen vauriokartoitus

Päällysteen päältä tehdyissä silmämääräisissä tarkasteluissa ei ole nähtävissä päällysteen halkeilua tai muuta vaurioitumista lukuun ottamatta päällysteen kulumista varsinkin kadun keskialueella. Teräsverkein varustetut kohdat eivät myöskään poikkea muista alueista. Vaaituksissa (4.2.2 routanousumittaukset) havaittavat painumat eivät ole nähtävissä päällysteen pinnan epätasaisuutena tai muuna hähtana. Tilanne on pysynyt samana sekä talvikaudella 1997-98 että 1998-99.

4.3 Ympäristöominaisuudet

4.3.1 Diffuusiotesti

Näytteiden A, B, C, D, E ja F diffuusiotestissä liuenneet määrät (64 d) on koottu taulukkoon 16. Vesisuodosten molybdeenin-, kalsium-, kromi- ja kuparipitoisuudet sekä pH-arvot, ominaissähkönjohtokyky ja redox-potentiaali (E_h) on esitetty graafisesti VTT:n tutkimusraportissa /10/.

Taulukko 16. Diffuusiotestissä stabiloiduista näytteistä liuenneet (mitatut) määrät (mg/m²/64 d) ja diffuusiotestin lasketut pitoisuudet (mg/m²64 d) /10/.

Näyte	Diffuusiotestin tulokset (pitoisuudet mg/m ² /64 d)									
	Molybdeeni (Mo)		Kalsium (Ca)		Kromi (Cr)		Sulfaatti (SO ₂)		Kloridi (Cl)	
	Mi-tattu ¹⁾	Laskettu ²⁾	Mi-tattu ¹⁾	Laskettu ²⁾	Mi-tattu ¹⁾	Laskettu ²⁾	Mi-tattu ¹⁾	Laskettu ²⁾	Mi-tattu ¹⁾	Laskettu ²⁾
A	4,8	6,8...12 ³⁾	15 500	17 000-27 300	0,20	³⁾	7 600	15 000-17 000	3 300	8 400-17 000
B	2,2	³⁾	20 200	17 100-33 600	0,24	³⁾	2 800	2 000-3 800	3 400	4 100-5 200
C	4,3	3,2...4,7	29 200	31 700-54 700	1,3	1,4...2,0	1 600	1 300-1 900	1 900	1 400-2 200
D	6,8	6,5...9,5	22 100	17 000-37 800	1,2	1,0...2,0	4 100	3 600-5 600	3 500	4 100-7 600
E	3,9	3,4...4,7 ³⁾	28 700	21 600-33 300	1,1	0,85...2,0	2 800	2 200-3 400	2 700	2 400-3 800
F	0,86	³⁾	53 100	59 800-93 100	1,1	1,0...1,5	810	670-1 100	1 100	970-1 200

1) Taulukossa esitetyt arvot ovat diffuusiotestissä saatuja kumulatiivisia mittaustuloksia (ϵ_8).

2) Taulukossa esitetyt arvot ovat laskennallisia arvioita diffuusion kautta liukenevista määristä 64 päivän aikana (ϵ_{64}). Koska tässä työssä ei ole laskettu aineen keskimääräistä diffuusiokerrointa, voidaan tässä esittää vain karkeat arvot laskennallisten määrien vaihteluvälistä. Laskennallinen tulos riippuu tarkastellusta ajanjaksosta.

3) Aineen pitoisuudet vesisuodoksissa olivat pienet (vesisuodoksista määritetyn aineen pitoisuuksien keskiarvo verrattuna aineen määrittämisraja-arvoon (CF_{1-8})<1,5), joten tässä tapauksessa ei arvioida laskennallisia määriä vaan $\epsilon_{64} = \epsilon_8$.

Hollannissa on julkaistu viranomaisten tutkimusinstituutin RIVM raportti /1/, jossa on eräälle esimerkkitapaukselle (materiaalin paksuus sijoituskohteessa 0.3 m ja tarkkailtavien aineiden diffuusiokertoimet $< 10^{-11}$ m²/s) esitetty diffuusiotestissä liukeneville aineille kahdet ohjearvot. Taulukossa 17 on esitetty tutkituille aineille esitetyt enimmäispitoisuusarvot sijoitusluokassa 1A sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen) ja sijoitusluokassa 1B (sijoitus eristämättömänä ajoittain kosteisiin sijoituspaikkoihin). Materiaali on kuitenkin sijoitettava siten, että se voidaan myöhemmin tarvittaessa ottaa erilleen.

Analyysitulosten mukaan näytekappaleista liukenee molybdeenia, kromia, sulfaattia ja kloridia alle ohjearvojen 1A. Näytekappaleiden suodosten pH-arvot olivat emäksisiä, pH-arvot olivat 10.8 ja 12.1 välillä.

Taulukko 17. Hollantilaisen diffuusiotestin ohjearvoehdotukset (mg/m²/64 d) kiinteille maanrakennusmateriaaleille esimerkkitapauksessa, jossa materiaalin paksuus sijoituskohteessa on 0.3 m ja tarkasteltavien aineiden diffuusiokertoimet ovat alle 10^{-11} m²/s /1/.

Aine	Ohjearvoehdotukset mg/m ² 64 d	
	Sijoitusluokka 1A	Sijoitusluokka 1B
Molybdeeni (Mo)	14	48
Kalsium (Ca)	ei annettu	ei annettu
Kromi (Cr)	140	480
Sulfaatti (SO ₄)	27 000	80 000
Kloridi (Cl)	18 000	54 000

VTT:n tutkimusselostuksen /10/ mukaan näytekappaleiden kaltaista stabiloitua (lajiteltua) savea voidaan sijoittaa ryhmän 1A kriteerin perusteella eli eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen. Lausunnossa kuitenkin suositellaan tapauskohtaista riskin arvioimista, mikäli materiaali sijoitetaan tärkeälle pohjavesialueelle.

4.3.2 Stabiloidun saven ympäristövaikutukset ja -selvitysten tarve

Stabiloidusta rakenteesta mahdollisesti liukenevien haitta-aineiden selvittämiseksi olisi tehtävä pohjavesihavaintoja ja luotava tarkkailujärjestelmä. Suunnitelmia varten on selvittävä pohjavesiputkien asennuspaikat ja siihen liittyen otettava huomioon mm. seuraavat asiat:

- Kadun alle on rakennettu johtokanaalit ennen kadun rakentamista ja stabiloidun jakavan kerroksen saven alla on salaojitettu hiekkakerros. Katurakenne kuivattuu kuitenkin käytännössä keskialueelta johtokanaaliin, joka jatkuu noin paalulta 180 Tilanhoitajankaarelta kohtisuoraan alaspäin Viikin pelloille. Katu on myös varustettu sadevesiviemäröinnillä, johon salaojat on yhdistetty.

- Viikin alueella toteutetaan pintavesien imeytystä maaperään mm. imeytyskaivojen kautta. Imeytyksistä ei ole tiettävästi tehty seurantaohjelmaa tai pohjavesien laadun ja määrän mittauksia tällä Viikki-Latokartanon I-alueella.

Savikadun ainoat sopivat pohjavesien asennuspaikat ovat putkikanaalien kohdilla, joskin tällöinkin vesi on kosketuksissa alla olevaan stabiloituun saveen ja siksi johtopäätösten teko jakavasta kerroksesta mahdollisesti liuenneista sideaineista voi olla mahdotonta.

Katurakenteen ympäristöolosuhteita sekoittaa lisäksi mm.

- Kadun vierustan rakentaminen eli rakennuspohjia ja paikoitusalueita on kaivettu auki. Esimerkiksi Koerakenteen 3 vierellä tehtiin n. 4 metrin syvyinen kaivanto louhintana ja massanvaihtona louherakenteeseen ja hyvin mahdollisesti tähän kaivantoon kuivattuu myös viereinen savikatu.

- Savikadun alle virtaa ylärinteen puolelta vesiä, joihin on mahdollista sekoittua rakentamisesta syntyviä aineita.

- Savikadun ja rinteen väliin on läjitetty maa-ainesmassoja, joiden puhtautta ei tunneta. Samalla alueella on myös jäännökset saven stabiloinnista.

Varmin paikka löytää savirakenteesta irtoavia aineita on salaojat, jotka on liitetty kadun sadevesiviemäriin. Salaojat ovat olleet kuivana tai enintään kosteita eikä vettä ole siten tullut havaintoaikoina salaojien kautta sadevesiviemäriin. Salaojista olisi odotettavissa purkautuvia vesiä riittävän suuren sademäärän jälkeen, jolloin maahan imeytyviä vesiä voisi kulkeutua myös salaojiin. Oletettavaa onkin, että salaojissa on vettä vasta alueen ollessa valmiimpi ympäristöltään ja kadun pintavesien imeytyminen rakenteeseen ja maaperään tapahtuu viherkaistoilta ajoradan vierellä.

Viikin savikadun alla olevasta salaojasta otettiin vesinäyte toukokuussa 1998. Fysikaalis-kemialliset tutkimukset tehtiin SFS- ja ISO-standardeihin perustuvilla määritysmenetelmillä. Taulukossa 18 on esitetty vesinäytteelle tehtyjen kokeiden tulokset.

Taulukko 18. Viikin savikadun alla olevasta salaojasta 6.5.1998 otetun vesinäytteen tulokset ja lääkintöhallituksen asettama raja-arvot.

Määritettävä ominaisuus yhdiste/alkuaine	Yksikkö	Tutkimustulos
pH		11,6
Sähkönjohtavuus	ms/m	261,0
Kokonaistyyppi	µg/l	3900
Nitraattityppi	µg/l	1100
Ammoniumtyppi	µg/l	460
Kokonaisfosfori	µg/l	20
Kloridi	µg/l	440,0
SO ₄	µg/l	23
Alumiini (Al)	µg/l	2400
Rauta (Fe)	µg/l	41
Kadmium (Cd)	µg/l	<0,20
Kromi (Cr)	µg/l	17
Kupari (Cu)	µg/l	34
Mangaani (Mn)	µg/l	<0,5
Nikkeli (Ni)	µg/l	5
Lyijy (Pb)	µg/l	<2
Sinkki (Zn)	µg/l	<20

Vesinäytteen korkea pH-luku johtuu stabiloinnissa käytetyistä sideaineista eli kalkista ja sementin sisältämästä CaO:sta. Sähkönjohtavuus korreloi suoraan suhteellisen korkean kloridipitoisuuden kanssa. Kloridipitoisuus selittyyneen suolauksen aiheuttamasta pitoisuuksien noususta. Saven luontainen kloridipitoisuus ei aiheudu vanhan meren pinnan sijainnista, koska kloridipitoisuus on sulfaattipitoisuuteen nähden yleensä 3-kertainen vanhojen meren pohjien alueella. Sulfaattipitoisuus on kaiken kaikkiaan pieni.

Kokonaistyyppipitoisuus on melko korkea verrattuna luonnontilaiseen saveen. Mutta kun otetaan huomioon peltoalue, jolta stabiloitu savi on peräisin, voidaan todeta typen joutuneen maahan peltojen lannoituksen mukana. Tämä selittyy varsinkin korkealla nitraattityypen määrällä, joka on peräisin lannoitteista. Toisaalta savikadun humuspitoinen pintamaa on paikoin läjitetty kadun vierialueille, mistä tyyppiä on suotovesien mukana päässyt kadun kuivatuskerrokseen ja salaojiin. Jätevesien tyyppipitoisuuksiin verrattuna kokonaistyyppimäärä on kuitenkin n. 10-kertaa pienempi kuin puhdistamattoman jäteveden ja n. 3...5 kertaa pienempi kuin puhdistetun jäteveden.

Kalkki sitoo toisaalta fosforia, jonka kokonaispitoisuus on verrattain pieni, ja toisaalta raskasmetalleja, jotka ovat hyvin niukkaliukoisia. Alumiinin hieman kohonnut arvo saattaa johtua masuunikuonassa olevasta Al₂O₃:sta.

Tutkittaessa haitta-aineiden liukenemista pohjaveteen ja maaperään on otettava huomioon koerakennuskohteen keskeneräinen tilanne. Nyt saadut tulokset kuvaavat enemmänkin rakentamisen aikaista tilannetta kuin pitkän ajan käyttötilannetta. Toisaalta rakentamisen kesto alusta rakenteiden pintojen valmistu-

miseen kestää yleensäkin useita vuosia riippuen ympäristön rakentamisen etenemisestä.

Kunkin koerakenteen keskialueelle olisi asennettava pohjavesiputket (siiviläputket) putkikaivannon kohdalle. Asennukset tulee tehdä varovasti, ettei johtoja vaurioiteta. Putket asennetaan siten, että siiviläosalla kerätään vesinäytteitä kaivannon pohjalta. Vesinäytteiden otossa tulee käyttää ristiinkontaminaation estävää menettelyä, kuten esimerkiksi GWM-Engineeringin tyyppiä Standard Flow noutoputki ja pohjaventtiili -järjestelmää. Kuhunkin pohjavesiputkeen asennetaan oma noutoputki ja pohjaventtiili, jotta pienetkin haitta-aineiden pitoisuuserot saadaan selville.

Salaojakaivoista mahdolliset vesinäytteet otetaan suoraan näytepulloon. Pohjaveteen ja maaperään liukenevien haitta-aineiden mittaamisen ongelmana tulee olemaan syvästabiloinnista huuhtoutuvien aineiden sekoittuminen mahdollisiin savirakenteesta liukeneviin aineisiin. Savirakenteen alta suodatin-/salaojakerroksesta otettavasta näytteestä on teoriassa saatavissa tieto rakenteesta irtoavista aineista, mutta tässäkin kerroksessa voi olla sideainetta, joka on liuennut kerrokseen rakentamisen aikana jo ennen rakenteen lujittumista. Nämä pitoisuudet ovat ilmeisesti hyvin pieniä mutta riskinä asioita tulkittaessa. Salaojista ei ole mahdollista eritellä koeosuuksien välisiä haitta-aineliukoisuuksia, mutta suuntaa antavia tietoja saatetaan saada.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOEHDOTUKSET

5.1 Laboratoriotutkimukset

Esikokeina tehtyjen yksiaksiaalisten puristuskokeiden tulosten perusteella eri sideaineiden pitoisuuden lisääminen stabiloitavaan näytteeseen kasvatti niiden puristuslujuuksia sekä 28 vrk:n että 60 vrk:n ikäisillä näytteillä. Esilujittumisen jälkeen määritetty puristuslujuus vaihteli sideainetyypistä ja pitoisuudesta riippuen 95...2158 kPa:n välillä. Suurimmat puristuslujuudet saatiin Se+CaO/18%(95:5) ja Mk/Se/18%- sideaineseoksella ja alhaisimmat Täyte C/30% ja Mk/Se/6%-sideaineseoksella. Sideainemäärän kasvattaminen suurensi sementtistabiloidun savimateriaalin puristuslujuutta lähes lineaarisesti. Saavutetut lujuustasot Lohja Rudus Oy:n ja Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion välillä olivat suuruusluokaltaan lähes yhtä suuria. Tällöin eri paikoissa suoritettujen koetulosten vertailtavuuden kannalta merkittävimmit epävarmuustekijöiksi jää materiaalien murskauksessa ja sen jälkeisessä tiivistämisessä sekä jälkilujittumisolosuhteissa olleet erot.

Ensimmäisen koestuksen jälkeen 28 vrk:n ikäisten koekappaleiden uudelleen sullottujen näytteiden puristuslujuudet eivät saavuttaneet samoja arvoja kuin ensimmäisessä puristuskokeessa. Koestukset tehtiin 14 vrk:n ja 28 vrk:n jälkeen uudelleen sullonnasta.

Vedensaannin kannalta avoimina suoritettujen routanousukokeiden perusteella kaikki tutkitut materiaalit olivat routivia. Materiaalin segregatiopotentiaalit

vaihtelivat sideaineesta ja sideainemäärästä riippuen 1,0...7,8 mm²/Kh välillä. Sementillä stabiloidun murskatun ja uudelleentiivistetyn materiaalin routivuus pieneni sideainemäärän kasvaessa. Myös massan tiivistäminen sideaineen sekoittamisen jälkeen näyttäisi pienentävän hieman routivuutta. Routivuuden rajoittamiseen sideainemäärällä 12 % soveltuivat parhaiten JMk+Se (70:30) ja Se+CaO (95:5) -sideaineseokset.

Jäädymättömän materiaalin lämmönjohtavuus vaihteli 0,6...0,7 W/Km välillä ollen siten sideaineesta riippumatta suuruusluokaltaan sellainen, että se toimii kuivissa olosuhteissa jonkin verran lämpöä eristävänä kerroksena katurakenteessa.

Jäädytys-sulatuskokeen aikana särkyi 17 koekappaletta 28:sta. Koekappaleiden tilavuus kasvoi 12 jäädytys-sulatussyklin läpikäynnin aikana 15...20 % ja yksiaksiaalinen puristuslujuus aleni merkittävästi kokeen aikana huoneenlämmössä kapillaarimatolla säilytettyjen näytteiden puristuslujuuteen verrattuna. Massan tiivistämisellä sideaineen sekoittamisen jälkeen ei havaittu olevan sannottavaa merkitystä materiaalin käyttäytymiseen tässä kokeessa. Kaikki koekappaleet imivät kokeen aikana vettä kapillaarisesti.

Jäädymättömän materiaalin CBR-arvot vaihtelivat sideaineesta ja sideainemäärästä riippuen 7...65 % välillä. Sideainemäärillä 10...14 % sementtiaktiivoidulla masuunikuonalla ja Se+CaO (95:5) -sideaineseoksella saavutettiin suuruusluokaltaan suurempia CBR-arvoja kuin muilla sideaineilla. CBR-arvon kasvaminen sideainemäärillä 10...14 % oli voimakkainta kalkkisementillä seossuhteella 1:1. Sulaneen materiaalin CBR-arvot eivät poikenneet merkittävästi jäädymättömän materiaalin arvoista.

Jäädymättömän materiaalin CBR-arvon ja dynaamisen kimmomoduulin välille saatiin lineaarinen riippuvuus. Riippuvuutta kuvaavan suoran kulmakertoimen ja vakion arvon määrää pääjännitysten summa, joka on puolestaan riippuvainen paitsi materiaaliominaisuuksista myös materiaalin jännitystilasta rakenteessa. Sulaneen materiaalin dynaaminen kimmomoduuli aleni selvästi jäädymättömän tilan arvoon verrattuna.

Stabiloimalla saavutettava lujuustaso määrää materiaalin pakkasenkestävyyttä ja kantavuutta siten, että lujuuden kasvaessa mainittuja materiaaliominaisuuksia kuvaavat arvot kasvavat. Lujuuden kasvaessa myös routivuus pienenee.

Jos tarkastellaan tässä tutkimuksessa käytettyjä sideaineita laadullisesti (ts. ei huomioida esimerkiksi sideaineen hintaa, saatavuutta yms.), stabiloidun kaivumassan routakestävyyden kannalta potentiaalisimmiksi sideainevaihtoehtoiksi osoittautuivat JMk+Se (70:30) ja Se+CaO (95:5) -seokset.

Suunniteltaessa tutkitun materiaalin käyttämistä katurakenteessa on huomioitava seuraavat asiat:

- Materiaali on routiva, jos pohjaveden pinta on lähellä ja kapillaarinen veden nousu on mahdollista. Routivuuden voimakkuuteen vaikuttaa sideaine ja sideainemäärä.
- Materiaali löyhtyy routimiselle alttiissa olosuhteissa. Jäädytys-sulatuskokeessa tutkittujen materiaalien tilavuudet kasvoivat.
- Materiaalin kantavuus alenee keväällä routimiselle alttiissa olosuhteissa. Dynaamisessa kolmiaksiaalikohteessa JMk+Se (70:30)/14% -sideaineseoksella sulaneen materiaalin moduulit olivat selvästi jäädyttämättömän materiaalin moduuleja pienemmät. CBR-kokeissa Se+CaO(95:5)/12% ja JMk+Se(70:30)/14% -sideaineseoksilla sulaneen materiaalin CBR-arvot eivät poikenneet jäädyttämättömän materiaalin arvoista. Koetulokset ovat näiltä osin ristiriitaisia ja vaativat jatkotutkimuksia. Todennäköisesti tietyn lujuustason alapuolella sulaneen materiaalin kantavuus alenee jäädyttämättömän materiaalin kantavuuteen verrattuna. Kantavuuden alenemisen suuruuteen vaikuttaa sideaine ja sideainemäärä.

Stabiloitujen kaivumassojen käytön edellytyksenä katurakenteessa on vedensaannin rajoittaminen, jolloin materiaalin routivuuden voidaan olettaa olevan hyvin vähäinen. Tällöin ei myöskään tapahdu tilavuuden muutosta. Kantavuusmitoituksessa voidaan stabiloidusta kaivumassasta rakennetun kadun jakavan kerroksen ($\theta=70$ kPa) E-moduulina käyttää Se+CaO(95:5) ja JMk+Se(70:30) -sideaineilla sideainemäärällä 12 % alustavasti arvoa 150 MPa.

Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää esilujittumisajan vaikutusta materiaalin routakestävyyteen sekä laboratorio- ja *in situ*-olosuhteiden vastaavuutta. Lisäksi tulisi selvittää tarkemmin syklisen pakkasrasituksen vaikutus materiaalin kantavuuteen vedensaannin kannalta erilaisissa olosuhteissa, esimerkiksi avoin ja puoliavoin vedensaanti. Sulaneen materiaalin kantavuus tulisi määrittää sekä CBR-että dynaamisella kolmiaksiaalikohteella. Tällöin saataisiin laajempi tutkimusaineisto sulaneen materiaalin kantavuuden arviointiin sekä lisätietoja CBR-kokeen soveltuvuudesta ko. tilan kantavuuden määrittämiseen.

Lisätutkimusten perusteella CBR-arvot ja dynaamiset kimmomoduulit alenivat syklittäisen jäädytys-sulatusrasituksen seurauksena 60...80 %, mikäli kapillaarinen vedensaanti oli mahdollinen sulamisvaiheen aikana. CBR-kokeiden perusteella kantavuuden aleneminen on pienempi, mikäli kapillaarinen vedensaanti on estetty sulamisvaiheessa.

5.2 Viikin koerakenne

Saven massastabiloinnin käyttökelpoisuutta Viikin rakentamisen tyyppisissä kohteissa voidaan tarkastella toteutuneiden kustannusten ja arvioitujen kustannusten perusteella. Savirakenteen kilpailukykyisyyteen tulee vaikuttamaan keskeisenä sideainekustannusten alentaminen Viikin kokeiluun nähden. Tarvittavaan sideainemäärään vaikuttaa ratkaisevasti rakenneosan lujuus- ja kestä-

vyysvaatimukset, jotka ovat seurausta rakenneosan sijainnista, katuluokasta jne.

Kehittämistarpeina jatkotöitä ajatellen todettiin olevat mm.

- Reseptiikka (halpojen sideaineiden käyttö), sideaineiden sekoitus ja sekoituksen määrä sekä tasalaatuisuuden tarkkailu (ohje sekoitus häiriintyvään kosteaan massaan, kuivassa savessa syntyy seulamurskaimella ja maamyrrällä palleroita, joiden pinnassa on sideainetta mutta sisus savea >kalkkiseosten kokeilu tällaisissa tapauksissa).
- Sekoituslaitteiston kehittäminen (tehonlisäykset, maamyrrään piikitys toisin tarttuvuuden vähentämiseksi).
- Työvaiheet, massan tiivistäminen rakenteeseen (kerrospaksuudet, kalusto, kunnolliset sorkkajyrät käyttöön, massan kuivuminen, jälkijyräys, kerrosten peittämistarve).
- Jatkossa tarvitaan lyhyet ytimekkäät rakentamisohjeet, joissa käsitellään saven ottotekniikka, saven kuivumisen merkitys ja kuljetukset vakavuus- ja kantavuuskysymyksiin, sideaineen sekoittamisen menetelmät ja vaiheet, odotusajat reunaehtoina sääolot, lujittumisajat jne.

Savirakenteen halkeilu tulee olemaan todennäköistä kuivumisen seurauksena, varsinkin kuumina kesinä. Halkeilun ehkäisemiseksi tulisi stabiloidun saven yläpuolinen jakava/kantava yms. kerros tehdä jo tiivistetyn savikerroksen kuivumisen aikana tai mahdollisimman pian sen jälkeen. Tämä edellyttää kuitenkin työtapatarkkailua, jotta savikerros on kovettunut riittävästi eikä ole vaaraa savikerroksen rikkoutumisesta. Jälkijyräys yläpuolisen kerroksen päältä on ilmeisesti tarpeen tehdä hyvin raskaalla kalustolla. Mikäli seuraavaa yläpuolista kerrosta ei päästä rakentamaan riittävän ajoissa tai ilma on aurinkoinen, halkeilua voidaan ehkäistä kastelemalla saven pintaa sekä suojaamalla pinta peitteellä.

Kuivumiskutistumaa tulisi vielä selvittää laboratoriossa yksinkertaisin koekuutio- tai sylinteritestein, joissa mitataan kuivumisen aiheuttama kutistuma huoneenlämmössä ja kuumentaen esimerkiksi 40 ja 50°C asteeseen koekuutioita samalla mitaten vesipitoisuuden alenemaa. Rakenteen todellisesta kosteuskäyttäytymisestä saadaan lisätietoa savikadun pitkäaikaisten kosteusmittausten avulla. Ensimmäiset kahden vuoden havainnot osoittavat muutosta kuivan kauden kosteuksista sateisen syksyn kosteuksiin.

Muita selvitettäviä asioita ovat lisäksi mitoitusasiat ja rakenteen halkeilun sekä kevätkantavuuden merkitys loppulujuuteen sekä lujuuden kehitykseen. Tähän asti stabiloidun savikerroksen lujuus katurakenteessa on saavuttanut suunnitelmissa asetetut vaatimukset eikä sulamisen ja jäätymisen vaikutuksesta ole tapahtunut kantavuuden heikkenemistä. Näihin seikkoihin saatiin vielä lisätietoa kauden 1998-99 mittauksilla. Jo tähän asti saatujen tietojen perusteella voidaan todeta stabiloidun saven toimivan hyvin katurakenteessa. Savikadusta saatujen kokemusten perusteella on todennäköistä, että stabiloitua savea pystytään tulevaisuudessa käyttämään hyvinkin vaihtelevissa, katurakenteita vaatimattomissa, kohteissa.

5.3 Laboratorio- ja maastokokeiden kantavuustulosten vertailua

Laboratoriokokeissa kantavuudelle saadaan suoraan arvo CBR-kokeen sekä dynaamisessa kolmiaksaalikokeen tuloksena. Erilaisia kaavoja soveltaen kimmoduulille (E) voidaan laskea likimääräisiä arvoja myös yksiaksaalisen puristuskokeen tuloksista. Viikin savikadun maastotutkimuksissa kantavuutta mitattiin levykuormituskokeella kovettuneen stabiloidun saven pinnasta kerran rakennustöiden aikana sekä useita kertoja päällysteen päältä vuosina 1997-99.

Stabiloidun saven päältä kantavuusvaatimus oli 136 MPa ja päällysteen päältä lopullisesta rakenteesta 188 MPa. Levykuormituskokeiden tulosten mukaan stabiloidut koerakenteet saavuttivat niille asetetut kantavuusvaatimukset (E_2) reilusti. Kevätkantavuuksissa stabiloidut rakenteet eivät täytäneet vaatimuksia kantavuussuhteen E_2/E_1 suhteen. Tämä johtuneen ylemmän kantavan murskekerroksen löyhtymisestä. Toisaalta kantavuus E_2 kasvaa vuosi vuodelta, mikä viittaa stabiloidun kerroksen yhä kovettuvan.

Maastossa suoritettujen levykuormituskokeiden kantavuustulosten vertaaminen laboratoriokokeisiin on hankalaa, koska laboratoriossa tehtyjen kokeiden tulokset eivät aivan vastaa maastokokeita. Vertailua vaikeuttaa lisäksi se, ettei savikadun stabiloidusta kerroksesta saatu porattua ehjiä koekappaleita. Tällöin laboratorio-olosuhteissa ei ollut mahdollista toistaa samoja kokeita kuin esitutkimusvaiheessa Lohja Rudus Oy:n ja Oulun yliopiston laboratoriokokeissa. Lisäksi laboratoriossa ei tutkittu tapausta, jossa stabiloitu koekappale oli päällysteen alla. Suurin osa levykuormituskokeista tehtiin juuri päällysteen päältä, jolloin kantavuudet ovat luonnollisesti korkeampia.

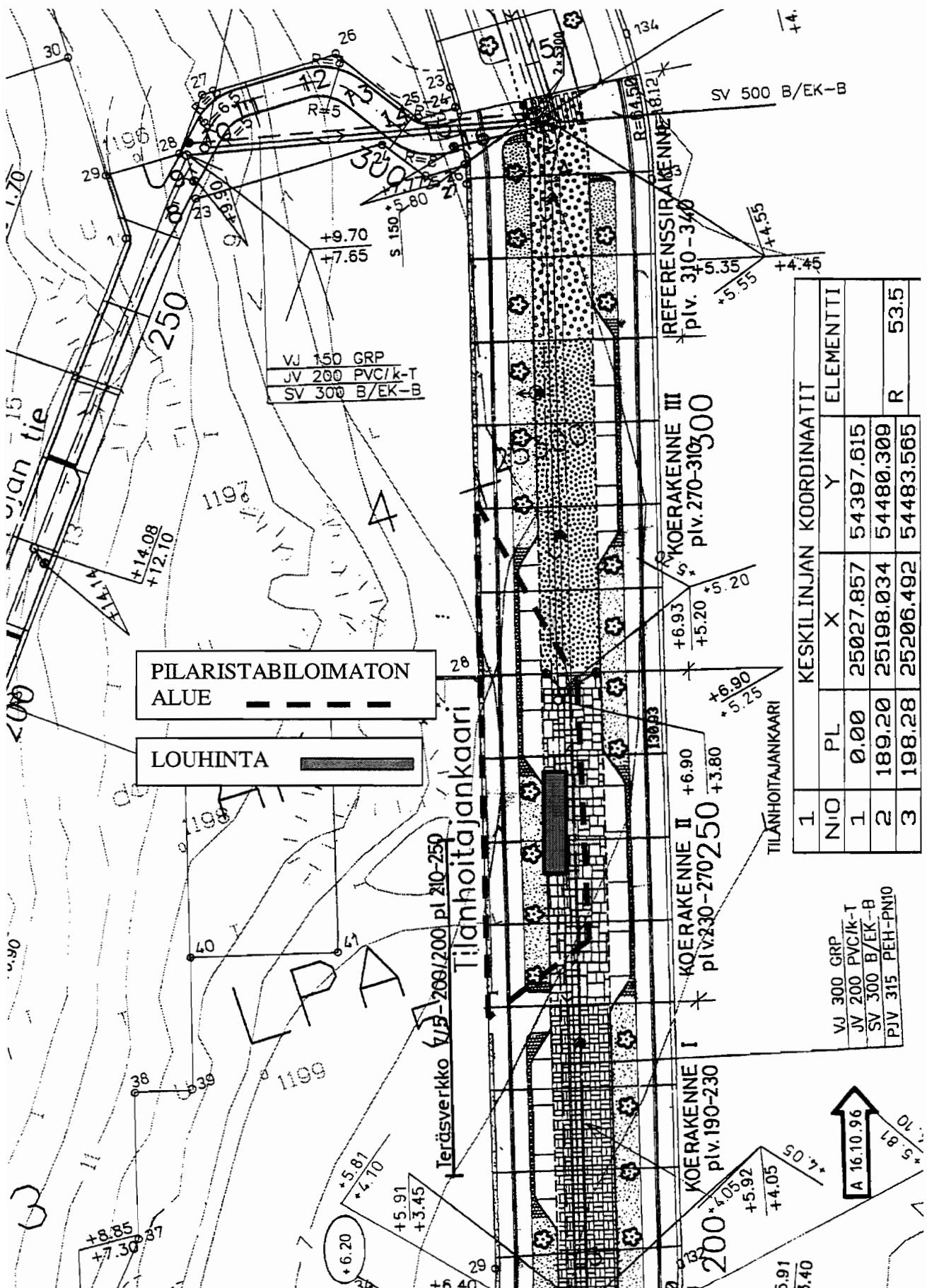
Laboratoriokokeissa eri sideaineseosten välille saatiin selviä eroja, mutta koerakenteessa eri sideaineilla saavutetut kantavuudet ovat saman suuruisia.

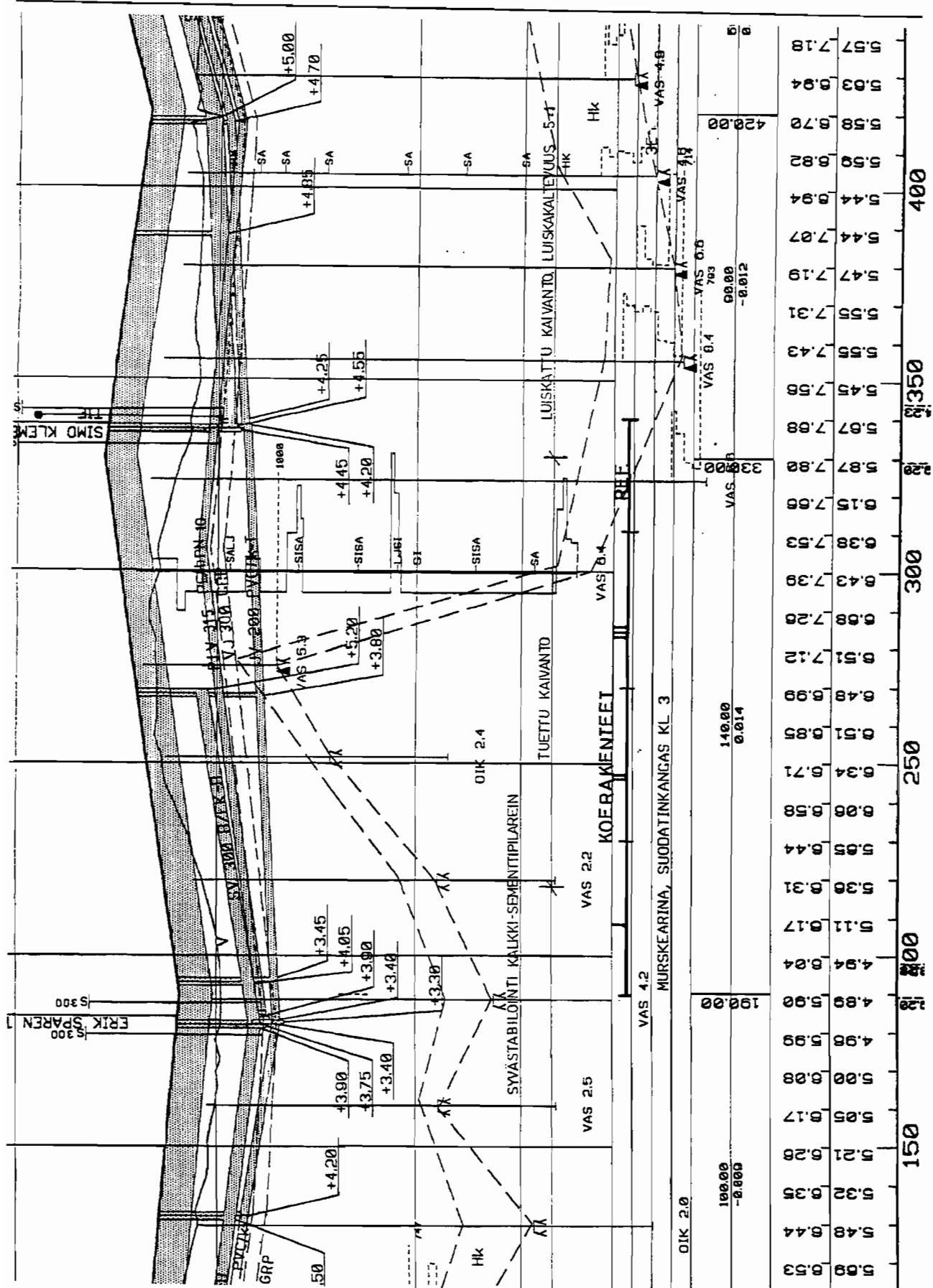
Kaiken kaikkiaan hyvinkin likimääräisiä kaavoja käyttäen laboratoriokokeiden antamat kantavuusarvot ovat moninkertaisesti pienempiä kuin mitä itse Viikin savikadusta mitatut levykuormituskokeen kantavuusarvot. Tulevaisuudessa tulisi kehittää näytekappaleiden ottomenetelmiä koerakenteesta, jotta koekappaleet saataisiin pysymään ehjinä ja koestettua laboratoriossa. Tällöin maastokokeiden ja esikokeiden tulosten vertailu olisi helpompaa.

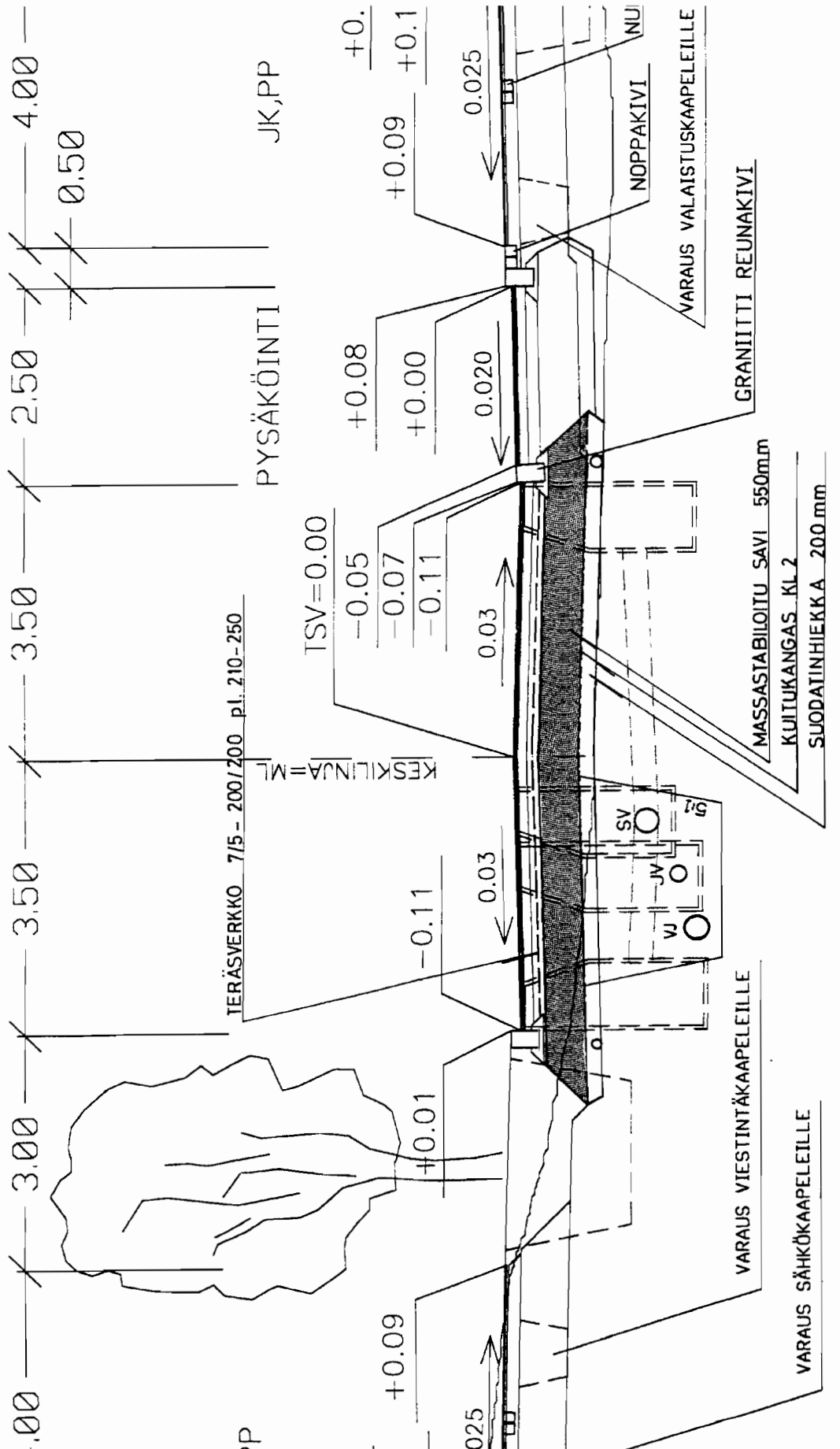
KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Aalbers, Th. G. et al, (1993), RIVM-rapport no. 771402006.
- /2/ Brown, S.F. & Pell, P.S. An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads. Proceedings of the Second International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1967. s. 487-504.
- /3/ Huttunen, E., Ahonen, M. 1996. Stabiloitujen kaivumassojen routa-kestävyys. Oulun yliopisto, geotekniikan laboratorio. Oulu 1996. 33.
- /4/ ISSMFE Technical Committee on Frost. Work report 1985-1989. Frost in Geotechnical Engineering Vol. 1. International Symposium Saariselkä, Finland 13-15. March, 1989. VTT symposium 94. ss.15-70.
- /5/ Konrad, J-M. 1987. Procedure for determining the segregation potential of freezing soils. Geotechnical testing journal. Vol. 10, s. 51-58.
- /6/ Shell International Petroleum Company Limited Shell Pavement Design Manual. London, 1978.
- /7/ Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT). TP HGT- StB 86 1986. s. 23.
- /8/ Tie- ja vesirakennushallitus (TVH). Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa II. Helsinki 1970. 153 s.
- /9/ Tie- ja vesirakennushallitus (TVH). Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa V. Materiaalit, massojen käyttö ja työmenetelmät. Helsinki, 1985.
- /10/ Valtionteknillinen tutkimuslaitos VTT, Kemiantechniikka, Ympäristöteknikka. Tutkimusselostus no. KET2600/96. Espoo 1996.
- /11/ Karlstedt Paul & Halkola Hannu, Ylijäämäsavien massastabilointi. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Tiedote 61/1993. 70 s + liitt.
- /12/ Rekonen Rita & Halkola Hannu, Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Tiedote 64/1994. 69 s + liitt.
- /13/ Viikki-Latokartanon aloitusalueen kunnallistekniikan vaihtoehtosuunnittelu - vaihtoehtoiset katurakenteet. Helsingin kaupunki Rakennusvirasto, Viatek-Yhtiöt Oy, raportti 13.12.1995, 9 s + liitt.

- /14/ Massastabiloitujen kaivumassojen hyötykäyttö katurakenteissa -
tyyppirakenteiden ja mitoitusparametrien määrittäminen. Helsingin kau-
punki geotekninen osasto, Lohja Rudus Oy Ab Ympäristöteknologia,
Viatek-Yhtiöt Oy. 20.12.1995. 21 s + liitt.
- /15/ Teollisuuden sivutuotteiden ja ylijäämämassojen hyötykäyttö Viikin
ekorakentamisprojektissa. Loppuraportti Viatek-Yhtiöt Oy 10.5.1995.
26 s + liite.
- /16/ Massastabiloitujen savien hyötykäyttö katurakenteissa Helsingin Vii-
kissä. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, Geotekninen osasto.
Loppuraportti Innogeo Oy. 24.9.1998. 26 s + liitt.
- /17/ Huttunen, E., Ahonen, M. 1997. Stabiloitujen kaivumassojen routa-
kestävyys. Lisäkokeet. Oulun yliopisto, geotekniikan laboratorio.
Oulu 1997.







VIIKIN SAVIKADUN LEVYKUORMITUSKOEIDEN TULOKSET VUOSINA 1997-1999

Taulukko 2.1. Kantavuusmittaukset, levykuormituskoe, **savikerroksen** päältä 22.7.1997.

Paalu / koerakenne	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E ₂ /E ₁	Tavoite E ₂ [MPa]	Huom.
210 oik, E1	84	154	1,83	136	
210 vas, E1	93	145	1,55	136	
230 oik, E1/Se+CaO	126	210	1,66	136	siirtymäkohta
230 vas, E1/Se+CaO	115	199	1,73	136	siirtymäkohta
250 oik, Se+CaO	86	172	2,00	136	
250 vas, Se+CaO	87	155	1,78	136	
270 oik, Se+CaO+JMk+Se	70	137	1,96	136	siirtymäkohta
270 vas, Se+CaO+JMk+Se	67	153	2,28	136	siirtymäkohta
290 oik, JMk+Se	127	242	1,90	136	
290 vas, JMk+Se	108	177	1,63	136	
310 oik, sora	98	195	1,98	136	siirtymäkohta
310 vas, sora	73	184	2,52	136	siirtymäkohta
Keskiarvot	94	176	1,90		

Taulukko 2.2. Kantavuusmittaukset, levykuormituskoe, **päällysteen** päältä 1997-99.

Paalu / koerakenne	2.10.1997		27.4.1998		27.5.1998		22.4.1999			Tavoite E ₂ [MPa]	Huom.
	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E ₂ /E ₁	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E ₂ /E ₁	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E ₂ /E ₁		
210 oik, E1	199	354	1,77	143	273	1,90	189	294	1,55	188	
210 vas, E1	151	324	2,14	124	277	2,23	118	258	2,18	188	
230 oik, E1/Se+CaO	290	425	1,46	163	375	2,30	189	341	1,80	188	siirtymäkohta
230 vas, E1/Se+CaO	175	390	2,22	105	335	3,19	169	319	1,88	188	siirtymäkohta
250 oik, Se+CaO	177	324	1,83	139	335	2,41	180	294	1,63	188	
250 vas, Se+CaO	106	299	2,82	80	258	3,22	83	203	2,44	188	
270 oik, Se+CaO+JMk+Se	162	348	2,14	95	335	3,52	123	303	2,46	188	siirtymäkohta
270 vas, Se+CaO+JMk+Se	142	277	1,95	75	273	3,63	141	265	1,87	188	siirtymäkohta
290 oik, JMk+Se	239	407	1,70	101	294	2,91	174	313	1,79	188	
290 vas, JMk+Se	187	375	2,00	70	285	4,07	154	299	1,94	188	
310 oik, JMk+Se				96	285	2,96	100	258	2,57	188	
310 vas, JMk+Se				60	258	4,29	76	242	3,18	188	
Keskiarvot	182	352	2,00	104	298	3,05	141	282	2,11	188	

LEVYKUORMITUSKOKKEEN JA LABORATORIOKOKKEIDEN CBR-LUKUJEN VERTAILU

LITE 3

Päätlukema	E2		CBR-arvo		E2		CBR-arvo		E2		CBR-arvo		Oulun laboratoriokokeet	
	22.7.1997	CBR=E/10	CBR=E/4	2.10.1997	E2	CBR-arvo	CBR=E/10	CBR=E/4	27.4.1998	CBR=E/10	CBR=E/4	27.5.1998	CBR=E/10	CBR-luku (sidainetta 14%)
210 olk. E1	154	15,4	38,5	354	273	27,3	68,25	294	29,4	73,5	22	-	-	-
210 vas. E1	145	14,5	36,25	324	277	27,7	69,25	258	25,8	64,5	22	-	-	-
230 olk. E1/Se+CaO	210	21	52,5	425	375	37,5	93,75	341	34,1	85,25				
230 vas. E1/Se+CaO	199	19,9	49,75	390	335	33,5	83,75	319	31,9	79,75				
250 olk. Se+CaO	172	17,2	43	324	335	33,5	83,75	294	29,4	73,5	58	56		
250 vas. Se+CaO	155	15,5	38,75	299	258	25,8	64,5	203	20,3	50,75	58	56		
270 olk. Se+CaO+JMk+Se	137	13,7	34,25	348	335	33,5	83,75	303	30,3	75,75				
270 vas. Se+CaO+JMk+Se	153	15,3	38,25	277	273	27,3	68,25	265	26,5	66,25				
290 olk. JMk+Se	242	24,2	60,5	407	294	29,4	73,5	313	31,3	78,25	54	86		
290 vas. JMk+Se	177	17,7	44,25	375	285	28,5	71,25	299	29,9	74,75	54	86		
310 olk. sora	195	19,5	48,75		285	28,5	71,25	258	25,8	64,5				
310 vas. sora	184	18,4	46		258	25,8	64,5	242	24,2	60,5				

Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO PL 2202 00099 HELSINGIN KAUPUNKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 http://www.kv.hel.fi/geo	Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston julkaisu 81/2000 Marraskuu 2000	
Tekijä(t) Harri Mäkelä Harri Höynälä Hannu Halkola Ari Kettunen	Projektinnumero(t) 5426	Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO
Nimike VIIKIN SAVIKATU		
Tiivistelmä Tutkimus on jatkoa Helsingin kaupungin rakennusviraston ja kiinteistöviraston geotekniikan osaston selvityksille kehittää saven hyötykäyttöä massastabiloinnilla. Aikaisemmin julkaistuja tiedotteita aiheesta ovat mm. "Ylijäämä-saven massastabilointi" ja "Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla". Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää massastabiloidun saven soveltuvuutta katurakenteen tukikerrokseen Viikin ekorakennusalueella Tilanhoitajankaarella. Ennen kohteen rakentamista tehtiin Viikin savelle perusteelliset ennakkokokeet laboratorioissa. Laboratoriokokeissa tutkittiin eri sideaineilla ja seossuhteilla stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuuksia, joiden perusteella kartoitettiin parhaiten soveltuvat sideaineet ja seossuhteet. Stabiloidun saven routakestävyttä tutkittiin mm. routanousu- ja jäädytys-sulatus-kokein. Stabiloidun saven routakestävyys kannalta potentiaalisiksi sideainevaihtoehdoiksi osoittautuvat jauhettu masuunikuona-sementti-seos (70:30) ja sementti-kalkki-seos (95:5) sekä sivutuotepohjainen E1-sideaine. Näitä kolmea sideaineyhdistelmää käytettiin koerakenteissa ja sideainemääränä 14 paino-%:a saven massasta. Ennen varsinaista koerakentamista tehtiin Viikin alueella esikoe, jolla selvitettiin sideaineen annostelua ja sekoitusta saveen ja tämän vaikutusta lopputuotteen tasalaatuisuuteen, lujuuteen ja mitoituksessa käytettävään moduuliarvoon. Koerakenne Viikissä muodostui kolmesta eri rakenteesta ja referenssiosasta. Stabiloitua savea käytettiin kadun tukikerroksessa ja vaihtelevien pohjasuhteiden takia kaikkien osuuksien alle rakennettiin 200 mm:ä paksu suodatinkerros varmistamaan tasavertaiset kuivatusolosuhteet. Savikerroksen tiivistämisen jälkeen ilmeni kuumasta kestäilmästä johtuen rakenteen pintahalkeilua voimakkaan kuivumisen takia. Halkeilu estettiin suojaamalla rakenne ja kastelemalla sitä. Koerakenteen kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa seurataan mittausantureilla ja päällysteen pinta vaaitaan rakenteen jäätyessä ja sulaessa, jotta saadaan selville roudan vaikutukset. Kuormituskestävyyttä mittaukset levykuormituskokeilla sulamisvaiheesta kesän olosuhteisiin ovat osoittaneet rakenteen toimivuuden. Savietekokeilun keskeisimmät tulokset ovat, että stabiloidun kerroksen lujuus on suunnitellun mukainen ja kantavuuden alenemaa jäätymisen ja sulamisen vaikutuksesta ei ole tapahtunut. Stabiloidun saven hyötykäytössä tulee jatkossa kehittää edelleen seuraavia asioita: • Sideaineiden sekoitus ja sekoituksen määrä sekä tasalaatuisuuden tarkkailu • Sekoituslaitteiston kehittäminen • Työvaiheet ja massan tiivistäminen rakenteeseen • Saven ottotekniikkaa, sideaineen sekoittamisen menetelmiä, saven kuivumisen hallintaa kesän lämpiminä päivinä rakennettaessa ja tämän vaikutuksia kantavuuteen.		
Avainsanat savi, stabilointi, sideaine, routakestävyys, koerakenne, massastabilointi		
ISSN 0788-6209	ISBN 951-718-521-9	Luokitus (UDK) 624.13
Kieli suomi, ruotsi, engl. tiivistelmä	Sivuja 61 s. + liitteet	

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION P.O Box 2202 00099 THE CITY OF HELSINKI FINLAND PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555 http://www.kv.hel.fi/geo		Series title, number and date Geoteknisen osaston julkaisut 81/2000 November 2000	
Author(s) Harri Mäkelä Harri Höynälä Hannu Halkola Ari Kettunen		Project number(s) 5426	
Commissioned by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION			
Title THE VIIKKI CLAY ROAD			
Abstract The research project was conducted at the geotechnical department of the real estate of the City of Helsinki. The examination is related to the earlier settlements to investigate possibilities for reducing construction costs incurred through transportation and disposal clays by means of mass stabilization and clarify alternatives to locating surplus soils on deposition areas. The aim of this study was to investigate the possibility to use stabilized clay to the sub-base layer of the street structure at the eco-construction area in Helsinki. Numerous laboratory tests were done for clay before the construction work began. Unconfined compression tests were made at the laboratory for stabilized clay to discover the best clay-binder combinations and mixture ratio. The frost heave strength of stabilized clay was investigated by frost heave and freeze-thaw tests. The most potential binder combinations were blast furnace slag-cement mixture (70:30), cement-lime mixture (95:5) and by-product based E1 mixture according to frost heave strength. These three binder combinations were used to stabilized clay. The binder amount was 14 weight-% per clay mass. Before constructing the actual street a preliminary test was done at the eco-construction area to clarify the proportioning of binder and mixing to clay and how this affects to homogeneity and strength of stabilized clay and to the designed module. The test street was divided in four different sections: Three different binder mixtures and a reference section. Stabilized clay was used to the support layer and because of very varying sub grade 200 mm thick drainage-course was build under the support layer to ensure equal drainage conditions for all sections. It appeared after compaction that due to very hot summer the surface of the stabilized clay layer was cracking. Covering and pouring out water on the stabilized clay surface avoided cracking. Sensors installed into layer measure moisture ratio and temperature of stabilized clay. Bearing capacity of the street is measured by the plate-bearing test. The most important results of the experiment are that strength of stabilized layer is as planned and bearing capacity has not decreased because of freezing-thawing conditions. The utilization of stabilized clay needs development to the following things: • Product formulation, binder mixtures, amount of mixing and supervising homogeneity • Development of the mixing machines • Working methods and compaction of stabilized bulk • Excavation techniques, methods of mixing binders, controlling drainage of stabilized clay surface during construction in warm days and how this affects to the bearing capacity.			
Keywords clay, stabilization, binder, frost heave strength, test construction, mass-stabilization			
ISSN 0788-6209		ISBN 951-718-521-9	Class (UDC) 624.13
Language Finnish, Swedish, Engl. Abstr.		Pages 61 p. + app.	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 1(2)

1	<i>Anttikoski, Usko</i>	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	1973	*
2	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1973	*
3	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1974	*
4	<i>Mäkinen, Reino</i>	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	1974	*
5	<i>Saarela, Matti</i>	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	1974	*
6	<i>Hartikainen, Jorma</i>	Kitkapaalujen kantavuus	1976	
7	<i>Petäjä, Jouko</i>	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	1977	
8	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Metrotunnelien injektointi	1977	*
9	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kalliotunnelien käyttö varastointiin	1977	*
10	<i>Tikkanen, Heikki</i>	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	1978	
11	<i>Arkima, Olli</i>	Kluuvin ruhjeen jäädytys	1978	*
12	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Puiset perustusrakenteet	1979	
13	<i>Havukainen, Jorma</i>	Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	1979	
14	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	1979	*
15	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Pohjavesitarkkailu -80	1980	*
16	<i>Anttikoski, Usko</i>	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	1979	*
17	<i>Roinisto, Jarmo</i>	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	1981	
18	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	1981	*
19	<i>Roinisto, Jarmo</i>	Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys	1981	
20	<i>Vuola, Pekka</i>	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	1981	
21	<i>Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo</i>	Tonttialueiden maarakenteet	1981	
22	<i>Havukainen, Jorma</i>	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	1981	
23	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	1982	
24	<i>Latvala, Ahti</i>	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	1982	
25	<i>Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti</i>	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	1982	
26	<i>Halkola, Hannu</i>	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torppanmäessä	1982	*
27	<i>Paavola, Pertti</i>	Kunnallistekniikan tunnelien louhintakustannusselvitys	1982	
28	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	1982	*
29	<i>Gulin, Kai</i>	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	1982	
30	<i>Halkola, Hannu</i>	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	1982	
31	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	1983	
32	<i>Havukainen, Jorma</i>	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	1983	
33	<i>Havukainen, Jorma</i>	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	1983	
34	<i>Salmelainen, Juha</i>	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	1983	
35	<i>Havukainen, Jorma</i>	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	1983	
36	<i>Hytty, Pekka</i>	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	1984	
37	<i>Leinonen, Jukka</i>	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	1984	
38	<i>Pirinen, Jussi</i>	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	1984	*
39	<i>Latvala, Ahti</i>	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	1984	*
40	<i>Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael</i>	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennusselvitys (Jäli-selvitys)	1984	
41	<i>Lahtinen, Eeva-Riitta</i>	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	1985	
42	<i>Korpi, Juha</i>	In Situ -kuormituskoe painumien määrittämiseksi	1985	
43	<i>Havukainen, Jorma</i>	Esirakentamisen kehittäminen	1985	
44	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Jäähdytysmenetelmän käyttö	1987	
45	<i>Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti</i>	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	1987	*
46	<i>Julkunen, Arto</i>	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	1987	
47	<i>Hutri, Kaisa-Leena</i>	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	1988	
48	<i>Melander, Kari</i>	Puristin-heijankairaus kairausmenetelmänä	1989	
49	<i>Leppänen, Mikko</i>	Vahvisinkakaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	1989	
50	<i>Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu</i>	Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa	1989	
51	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	1989	
52	<i>Koskela, Pekka</i>	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	1989	
53	<i>Saari, Mauri & Korhonen, Osmo</i>	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	1990	
54	<i>Saari, Mauri & Volanen, Niilo</i>	Ruoholahden koepaalu	1990	
55	<i>Yrjänä, Jouni & Korhonen, Osmo</i>	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	1991	
56	<i>Niinimäki, Risto & Raudasmaa, Pekka</i>	Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	1992	
57	<i>Nieminen, Jarmo & Johansson, Erik & Holopainen, Pekka</i>	Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	1992	
58	<i>Ahola, Jukka & Viitala, Raimo</i>	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunnelieissa	1992	
59	<i>Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo</i>	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	1992	
60	<i>Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo</i>	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	1992	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 2(2)

61	<i>Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu</i>	Ylijäämäsavien massastabilointi	1993
62	<i>Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Maankäytön geotekninen suunnittelu	1993
63	<i>Anttikoski, Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo</i>	Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti)	1993
64	<i>Rekonen, Rita & Halkola, Hannu</i>	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	1994
65	<i>Ulmala, Ola & Halkola, Hannu</i>	Puristin-porakonekairaus	1994
66	<i>Havukainen, Jorma</i>	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus)	1995
67	<i>Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko</i>	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	1996
68	<i>Puumalainen Niina & Havukainen Jorma</i>	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	1996
69	<i>Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo</i>	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	1998
70	<i>Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko</i>	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	1996
71	<i>Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96	1996
72	<i>Wegelius, Arto & Viitala, Raimo</i>	Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	1996
73	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset	1996
74	<i>Rantala, Kalle & Halkola, Hannu</i>	Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla	1997
75	<i>Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka</i>	Paisuvat kalliosavet	1997
76	<i>Leivo, Pekka & Halkola, Hannu</i>	Maa- ja kallioperätietojen tulkinta porakonekairauksen rekisteröintituloksista	1998
77	<i>Nauska, Jari & Havukainen, Jorma</i>	Esirakentaminen 1998	1998
78	<i>Svanström, Terhi & Raudasmaa, Pekka</i>	Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojele ja vaikutus rakentamiseen	1998
79	<i>Pitkänen, Juha & Vähäaho, Ilkka & Raudasmaa, Pekka</i>	Puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn tarkastaminen	1999
80	<i>Mikkola, Jannis & Viitala, Raimo</i>	Pitkien vesitunnelien sortumat ja lujitus	1999
81	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen Ari</i>	Viikin savikatu	2000
82	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen Ari</i>	Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakentamisessa, suunnitteluohjeet, työselitykset ja laatuvaatimukset	2000

GEO 10 K	Kallioperäkarta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1978
GEO 10 M	Maaperäkarta - Jordmänskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10.000, Helsinki - Hels	1989

*) painos loppuunmyyty

Helsingin kaupunki
Kiinteistövirasto
geotekninen osasto
PL 2202
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Käyntiosoite: Malmin asematie 3 A, Helsinki 70
Vaihde (09) 1691, asiakaspalvelu (09) 169 4559, fax (09) 169 4555
Email geo@kv.hel.fi
<http://www.kv.hel.fi/geo>