

# SYVÄSTABILOINNIN PITKÄAIKAISET SEURANTATUTKIMUKSET

Miia Paatsema  
Heikki Kangas



Julkaisu 87/2003

Helsinki 2003  
ISBN 952-473-195-9  
ISSN1458-2198

# **SYVÄSTABILOINNIN PITKÄAIKAISET SEURANTA- TUTKIMUKSET**

**Miia Paatsema  
Heikki Kangas**





## TIIVISTELMÄ

Helsingissä on suurin osa pohjasuhteiltaan hyvistä rakennusalueista jo käytetty ja uudisrakentaminen on jouduttu suuntaamaan huonopohjaisille pehmeikköalueille. Tämän myötä ovat geotekniset ongelmat kasvaneet ja pohjarakennuskustannukset nousseet merkittävästi. Esirakentamisella voidaan parantaa pehmeikköalueiden laatua maarakennustekniikan keinoin ennen alueen varsinaista rakentamista. Esirakentamisella voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä pohjarakennus-, korjaus- ja kunnossapitokustannuksissa.

Alueellisen stabilointityön tarkoituksena on ensisijaisesti rakennettavien pihojen, katujen ja putkijohtojen haitallisten painumien ehkäiseminen pitkällä aikavälillä. Esirakentamisen yhteydessä asetetaan alueelle painumakriteerit, joiden avulla varmistetaan rakenteiden toiminta ja riittävä laatutaso. Tässä työssä on kerätty mittaustietoa Helsingin Talissa sijaitsevalta syvästabiloiduilta alueelta. Lisäksi esitetään Fallkullan alueen stabilointi ja painuman seurannan aloitus.

Syvästabiloinnin laadunvalvonta on keskittynyt suurelta osin pilarointityön ja valmiin pilarin laaduntarkkailuun. Pilarikentän pitkäaikaisia muodonmuutoksia käyttökuormien vaikutuksesta on tutkittu hyvin vähän. Pitkäaikaisella painumaseurannalla pystytään yksinkertaisin mittauksin seuraamaan syvästabiloidun alueen muodonmuutoksia. Seurattavan alueen mittausohjelman tulee olla riittävän pitkä, jotta kerätty tieto on luotettavaa.

Painuman tarkkailulla saatu tieto on arvokasta kokemusperäistä tietoa esirakennetun alueen muodonmuutoksista kuormituksen alaisena. Kerättyä tietoa voidaan hyödyntää muun muassa lähialueiden esirakentamisessa. Kokemukseen perustuvan tiedon perusteella voidaan lähialueiden tulevaa esirakentamista kehittää paremman lopputuloksen suuntaan.

Talin alueella on painumia tapahtunut koko kymmenvuotisen mittausjakson ajan. Painumanopeus alueella on ollut huomattavasti pienempi kuin laskennallisesti arvioitu painumanopeus. Alueen mittaustuloksiin sovitettun painumaennusteen mukaan alueen painumat tulevat jatkumaan. Sekä laskennallisesti saadut että mitatut painumat ovat alueelle asetettuja painumakriteerejä pienempiä.

Fallkullan alueen esirakentamisen onnistumisen lopulliset tulokset tullaan saamaan pitkäaikaisin mittauksin. Tässä työssä esitetään laskennallisesti saatu arvio alueen tulevasta painumasta. Saatu arvio on alueelle annettuja painumakriteerejä pienempi.

## ABSTRACT

The city Helsinki has reached a situation where most of the areas with good ground conditions are in use. Now construction is directed to areas with more inadequate ground conditions. Due to this, geotechnical problems have grown and ground engineering costs have increased. These problems can be solved by prebuilding. Soil properties can be improved before the actual construction takes place with prebuilding. Prebuilding can also help in making substantial saves in the ground engineering, repair and maintenance costs.

The purpose of areal deep mixing in planned areas is primarily to prevent harmful long-term settlements. In the planning stage of the prebuilding settlement criteria for the area is decided. With this criteria the long-term working conditions of the structures and adequate quality is assured. In this publication the purpose is to gather information from deep mixed areas within Helsinki.

Quality control of deep mixing is mainly control of execution and the column itself. Long term behaviour under loading is fairly unknown. With simple settlement measurements settlement behaviour of the deep mixed area can be monitored. The follow-up has to be long enough for the settlements to occur and for the information to be reliable.

The settlement monitoring gives valuable practical information of the deformation behaviour in the area. The gathered information can be used for example when the neighbouring areas are being constructed. The information can then be taken into account and the new deep mixing work can be directed towards a better result.

The Tali residential area has settled steadily during the whole survey. The speed at which the settlements occur has been much slower than the estimated speed. A settlement estimate directed from the field measurements show that the area will continue to settle in the future. Calculated and estimated settlements in the Tali area are smaller than the settlement criteria.

Long-term monitoring of the Fallkulla residential area will give the answer to how the deep mixing has succeeded to prevent settlements. This publication presents the calculated estimation of the settlement in the area. Calculated value of the settlements in the area is smaller than the settlement criteria.

## ALKUSANAT

Syvästabilointi on vakiintunut yleiseksi pehmeikköalueiden pohjanvahvistusmenetelmäksi Helsingissä. Kaupunki toteutti ensimmäiset laajamittaiset syvästabilointikohteet 1980-luvun alkupuolella. Suuret stabilointikohteet ovat liittyneet siitä lähtien Helsingissä uusien asuinalueiden esirakentamistoimenpiteisiin sekä väylien ja infrastruktuurin rakentamiseen.

Suomessa ja maailmalla on suhteellisen vähän mitattua tietoa syvästabiloidun maapohjan pitkäaikaisesta käyttäytymisestä. Stabilointitekniikkaa ja sideaineita on sitä vastoin tutkittu runsaasti. Stabiloitujen alueiden pitkäaikainen seuranta painumamittauksin sekä tarvittaessa maapohjan jälkitutkimuksin on suositeltavaa työn laadun varmistamiseksi ja menetelmien kehittämiseksi. Yleisesti syvästabilointi on osoittautunut luotettavaksi ja toimivaksi pohjanvahvistusmenetelmäksi, jos kohde on suunniteltu ja toteutettu hyvin. Syvästabiloinnin mitoitukset ja työmenetelmät kehittyvät jatkuvasti.

Tämä julkaisu perustuu Helsingin kaupungin kokemuksiin valmiista syvästabiloimalla esirakennetusta asuinalueesta Talissa. Lisäksi tutkimuksia kohdennetaan vuosina 2000-2002 esirakennetulle Fallkullan uudelle asuinalueelle. Kohde sijaitsee Malmin lentokentän vieressä. Lentokentän ja Fallkullan maapohjat ovat samankaltaisia.

Julkaisu perustuu tekn.yo. Miia Paatseman diplomityöhön, joka on tehty Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla projektipäällikkö Heikki Kankaan ja apulaisosastopäällikkö Osmo Korhosen ohjauksessa. Työn valvojana on toiminut professori Pauli Vepsäläinen Teknisestä korkeakoulusta.

Helsingissä 28.2.2004

Ilkka Vähäaho  
osastopäällikkö

**SISÄLLYSLUETTELO**

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>ALKUSANAT</b> .....	<b>7</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....	<b>8</b>
<b>MERKINNÄT</b> .....	<b>10</b>
<b>TERMINOLOGIA</b> .....	<b>11</b>
<b>1. JOHDANTO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. SYVÄSTABILOINTI</b> .....	<b>14</b>
2.1 Syvästabiloinnin toteutus.....	14
2.2 Syvästabiloinnin laadunvalvonta .....	14
2.2.1 Työnaikainen laadunvalvonta.....	14
2.2.2 Valmiiden pilareiden laadunvalvonta .....	15
2.3 Syvästabiloidun alueen painuminen .....	22
2.4 Syvästabiloidun alueen jälkiseuranta .....	22
2.5 Kaava-alueen syvästabiloinnin painumakriteerit .....	23
<b>3. ESIMERKKITAPAUKSET</b> .....	<b>26</b>
3.1 Tali, Munkkivuoren laajennusalue .....	26
3.1.1 Alue ja pohjasuhteet.....	26
3.1.2 Käytetyt esirakentamismenetelmät.....	28
3.1.3 Koestabiloinnit.....	29
3.1.4 Stabiloinnin toteutus .....	30
3.1.5 Laadunvalvonta .....	32
3.1.6 Pitkäaikaiset seurantatutkimukset .....	34
3.2 Fallkullan kaava-alue.....	35
3.2.1 Alue ja pohjasuhteet.....	35
3.2.2 Käytetyt esirakentamismenetelmät.....	37
3.2.3 Koestabiloinnit.....	38
3.2.4 Stabiloinnin toteutus .....	39
3.2.5 Laadunvalvonta .....	42
3.2.6 Pitkäaikaiset seurantatutkimukset .....	47
<b>4. PAINUMIEN LASKENTA</b> .....	<b>49</b>
<b>5. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>50</b>
5.1 Tali, Munkkivuoren laajennusalue .....	50
5.1.1 Painumat .....	50
5.1.2 Pilarien ja maan vedenläpäisevyyksien suhde .....	52
5.1.3 Pilareiden välinen savi.....	56
5.1.4 Johtopäätökset.....	59
5.2 Fallkullan kaava-alue.....	60
5.2.1 Painumat .....	60
5.2.2 Johtopäätökset.....	61
<b>6. YHTEENVETO</b> .....	<b>63</b>
<b>KIRJALLISUUSLUETTELO</b> .....	<b>64</b>

<b>LIITTEET .....</b>	<b>68</b>
Syvästabiloidun alueen painuminen.....	85
Kimmoisan pilarin painuman mitoitus.....	85
Myötävän pilarin mitoitus .....	89
Syvästabiloidun alueen painumanopeus.....	91

**MERKINNÄT**

A	pinta-ala	m <sup>2</sup>
A <sub>m</sub>	maan poikkipinta-ala	m <sup>2</sup>
A <sub>p</sub>	pilarin poikkipinta-ala	m <sup>2</sup>
E <sub>pil</sub>	pilarin muodonmuutosmoduuli	Pa
I	korjauskerroin	-
L <sub>D</sub>	veden virtausmatka	m
M	maan kokoonpuristuvuusmoduuli	Pa
N <sub>c</sub>	kantavuuskerroin	-
R	pilarin vaikutussäde	m
U	konsolidaatioaste	%
a	suhteellinen pilariala	-
C <sub>h</sub>	konsolidaatiokerroin	-
Δh	pilarin pituus, syvästabiloidun maakerroksen paksuus	m
k <sub>h</sub>	horisontaalijännityksen kerroin	-
k <sub>maa</sub>	maan vedenläpäisevyyskerroin	-
k <sub>pil</sub>	pilarin vedenläpäisevyyskerroin	-
k/k	pilarien keskiöetäisyys	m
m	moduuliluku	-
p	kairausvastus	Pa
q	kuorma	Pa
q <sub>maa</sub>	maalle tuleva osuus kokonaiskuormasta	Pa
q <sub>myötö</sub>	pilarin myötörajakuorma	Pa
q <sub>pil</sub>	pilarille tuleva osuus kokonaiskuormasta	Pa
r	pilarin säde	m
s	mitattu painuma	m
s <sub>maa</sub>	pilareiden välisen maan painuma	m
s <sub>pil</sub>	pilarien painuma	m
t	aika	d
w	vesipitoisuus	%
w	muotokerroin	-
β	painumavähennyssuhde, jännitysekspONENTTI	-
Δσ	kuormituslisäys	Pa
σ	maassa vallitseva pystyjännitys	Pa
σ <sub>0'</sub>	maan tehokas pystysuora jännitys	Pa
σ <sub>h</sub>	tehokas horisontaali jännitys	Pa
σ <sub>maa</sub>	maalle kohdistuva jännitys	Pa
σ <sub>murto</sub>	pilarin murtojännitys, murtolujuus	Pa
σ <sub>myötö</sub>	pilarin myötöjännitys	Pa
σ <sub>pil</sub>	pilarille tuleva jännitys	Pa
σ <sub>v'</sub>	maan tehokas pystysuora jännitys	Pa
τ <sub>p</sub>	leikkauslujuus	Pa
U	Poissonin luku	-
Ø	levy halkaisija	m

## TERMINOLOGIA

ESIRAKENTAMISELLA tarkoitetaan rakentamisedellytysten luomista aiemmin rakentamatta jääneille huonoille maapohjille, sekä pehmeikköalueiden laadunparantamista maarakennustekniikan keinoin ennen alueen varsinaista rakentamista /35/.

STABILOINTI tarkoittaa maapohjan käsittelemistä siten, että heikosti kantaviin maalajeihin sekoitetaan sideainetta, joka pohjamaan kanssa reagoidessaan lujittaa maata. Stabilointi erotetaan sekoitustekniikan mukaisesti syvästabilointiin ja massastabilointiin /35/.

SYVÄSTABILOINNILLA eli pilaristabiloinnilla tarkoitetaan menetelmää, jossa sideaineella stabiloitu maa muodostaa pystysuuntaisen, ympäröivää maata lujemman, yleensä pilarin muotoisen vyöhykkeen /38/.

## 1. JOHDANTO

Helsingissä on suurin osa pohjasuhteiltaan hyvistä rakennusalueista jo käytetty ja uudisrakentaminen on jouduttu suuntaamaan huonopohjaisille pehmeikkö-alueille. Tämän myötä ovat geotekniset ongelmat kasvaneet ja pohjarakennuskustannukset nousseet. Esirakentamisella voidaan parantaa pehmeikköalueiden laatua maarakennustekniikan keinoin ennen alueen varsinaista rakentamista. Esirakentamisen ansiosta voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä pohjarakennus-, korjaus- ja kunnossapitokustannuksissa.

Kaava-alueella stabilointityön tarkoituksena on ensisijaisesti rakennettavien pihojen, katujen ja putkijohtojen haitallisten painumien ehkäiseminen pitkällä aikavälillä. Suunnitteluvaiheessa asetetaan pihuille, kaduille ja putkijohdoille niiden toiminnan kannalta laatuksiteerit, joissa määritetään rakenteille sallittavat painumat sekä painumaerot. Esirakentamistoimenpiteet suunnitellaan näitä raja-arvoja käyttäen.

Esirakennettava rakennusalueen pinta-ala Helsingin alueella on kasvanut vuosittain. Syvästabiloinnin osuus kaikista esirakentamismenetelmistä on vaihdellut 25-80% välillä. Viime vuosien suurten rakennushankkeiden, kuten Viikki- Lato-kartanon ja Fallkullan alueiden esirakentamisessa on käytetty merkittävältä osin syvästabilointia .

Nykyisin syvästabiloinnin laadunvarmistus keskittyy itse stabilointityön tarkkailuun ja laadunvalvontaan. Stabiloidun savikon käytönaikainen seuranta on jäänyt vähemmälle.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on mittaustiedon kerääminen stabiloidun alueen pitkäaikaisesta käyttäytymisestä kuormituksen alla. Esimerkkitapauksien avulla pyritään selvittämään eri puolilla Helsinkiä sijaitsevien stabiloitujen alueiden pitkäaikaisia muodonmuutoksia.

Munkkivuoren laajennusalue Talin kaupunginosassa sijaitsee Iso- Huopalahden rannalla. 1950-1960- luvuilla alueella sijaitsi puhdistamo. Puhdistamon ympäristöön kasattiin sekalaista täyttömaata. Täytön vuoksi alueella oli pitkä kuormitushistoria jo ennen varsinaista esirakentamista. Alueen uudelleen rakentaminen aloitettiin 1990- luvun alkupuolella. Esirakentamismenetelminä käytettiin kalkkipilaristabilointia katu- ja putkilinjoilla sekä rakennusten ympärillä. Lisäksi korttelialueilla käytettiin kevytsorakevennystä. Osalla katualueista yhdistettiin tasauksesta johtuen sekä kevytsorakevennys että syvästabilointi. Painumamittauksia on alueella suoritettu rakentamisen jälkeen vuodesta 1993.

Fallkullan kaava-alue on uusi rakennusalue Pohjois-Helsingissä. Pohjasuhteiltaan vaativan, vanhan peltoalueen huonoa kantavuutta ja painuma-alttiutta parannettiin laajalla esirakentamistyöllä. Esirakentamismenetelminä käytettiin kalkkisementtistabilointia katu- ja putkilinjoilla sekä osalla korttelialueista. Osalla korttelialueista käytettiin kevytsorakevennystä. Alueelle tullaan asentamaan painumamittauspisteverkosto, jonka avulla seurataan alueen pitkäaikaisia muodonmuutoksia.



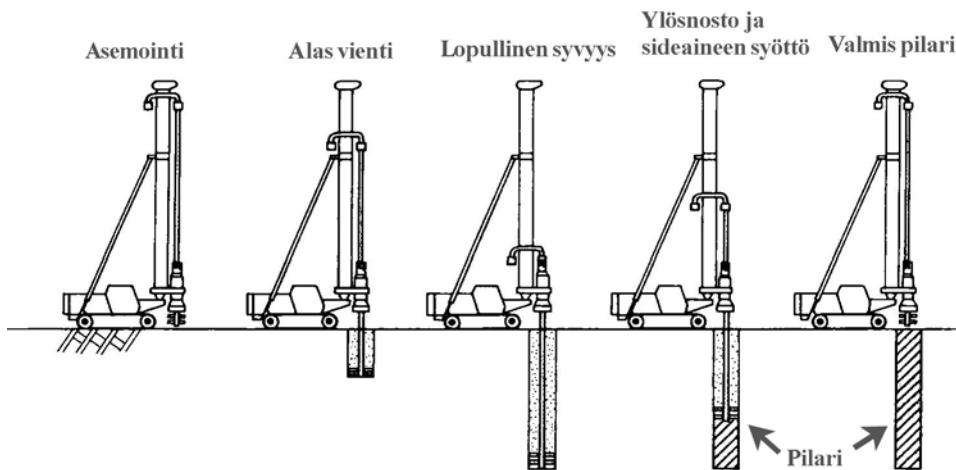
Tässä tutkimuksessa verrataan esimerkkialueiden suunnittelukuormista lasket-  
tuja painumia mitattuihin tuloksiin. Lisäksi tuloksia verrataan annettuihin painu-  
man raja-arvoihin. Talin stabiloidun alueen pohjamaan ominaisuuksien selvittä-  
miseksi tehtiin laboratoriotutkimuksia luonnontilaiselle savelle pilareiden välissä.  
Tuloksia verrataan ennen esirakentamista määritettyihin saven ominaisuuksiin.

## 2. SYVÄSTABILOINTI

### 2.1 Syvästabiloinnin toteutus

Suomessa käytetyin syvästabilointimenetelmä perustuu Ruotsissa 1967 Kjeld Pausin kehittämään kuivamenetelmään tai sen muunnoksiin /43/.

Kuivamenetelmässä sideaine puhalletaan paineilmalla pehmeisiin maakerrokseen. Kuvassa 1 on esitetty syvästabiloinnin periaate. Sekoituskärki viedään haluttuun syvyyteen nopeasti painaen ja pienellä pyörimisnopeudella. Alasviennin yhteydessä virtaa sekoitinkärjen sideaineensyöttöaukosta samanaikaisesti paineilmaa aukon tukkeutumisen estämiseksi. Ylösnostovaiheessa kärjen pyörimisnopeutta kasvatetaan moninkertaiseksi ja samalla maahan puhalletaan sideainetta kärjen syöttöaukon kautta. Ylösnostovaiheessa sekoitinkärjen nousunopeus on 10 – 15 mm/ kierros. Edellä mainitulla työmenetelmällä saadaan maahan muodostettua lujittunut pilari /28/.



**Kuva 1** Periaatekuva syvästabiloinnista /36/.

Sideaineena käytetään pääasiallisesti kalkkia, sementtiä tai näiden seoksia. Lujituksen parantamiseksi tai kustannusten alentamiseksi on lisäksi kokeiltu erilaisien teollisuuden sivutuotteiden käyttöä sideaineena. Teollisuuden sivutuotteita käytettäessä on selvitettävä sideaineen ympäristökelpoisuus ja maastokokeilla saavutettava lujuus sekä työtekniinen kelpoisuus /35,42/.

### 2.2 Syvästabiloinnin laadunvalvonta

#### 2.2.1 Työnaikainen laadunvalvonta

Stabilointityön yhteydessä rekisteröidään laadunvalvonnassa käytettäviä tuotantoparametreja. Rekisteröinnistä vastaa käytännössä stabilointityön urakoitsija. Rekisteröitäviä parametreja ovat sekoitinkärjen nousu- ja pyörimisnopeus, sideaineen virtaama sekoitintyökalun välittömässä läheisyydessä, sekoittimen akselin momentti, käytetty ilmanpaine sekä sideaineen syöttömäärä. Työn aikaisesta laaduntarkkailusta huolehtii osaltaan rakennuttajan valvoja. Tarkkailu on pääasiassa työtapatarkkailua /20,47/.

## 2.2.2 Valmiiden pilareiden laadunvalvonta

Välittömästi pilarin valmistumisen jälkeen tehtäviä, tuotantoa ohjaavia laadunvalvontamenetelmiä ei ole vielä laajamittaisessa käytössä. Laadunvalvonta keskittyy käytännössä valmiiden pilareiden laaduntarkkailuun. Laaduntarkkailuna tehdään muun muassa /28/

- kairauksia pilareista
- kuormituskokeita in situ
- näytteenottoja
- laboratorioskokeita.

Pilareista tehtävistä kairauksista käsitellään seuraavassa tärkeimmät:

### *Pilari –ja puristinheijarikairaus*

Nykyisin kairaus pyritään tekemään rekisteröivällä kairauslaitteistolla. Kuvassa 2 on esitetty Helsingin geoteknisen osaston käyttämä raskas monitoimikaira.

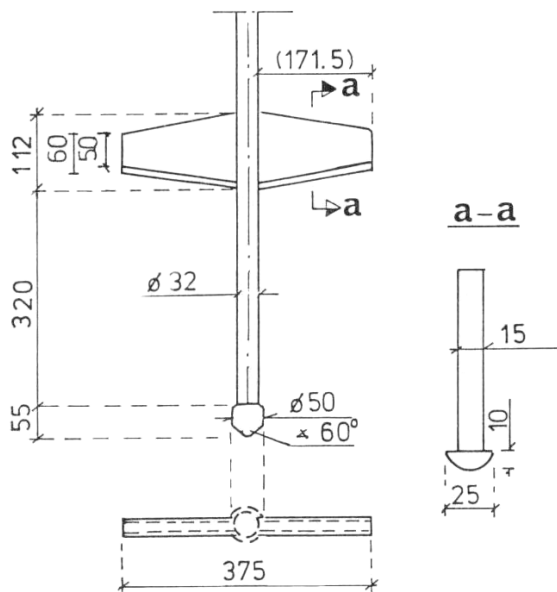


**Kuva 2 Helsingin geoteknisen osaston käyttämä raskas monitoimikaira GM 200 /15/.**

Tarkimmat havainnot pilarin lujuudesta sekä mahdollisista heikkous- ja epäjatkuvuuskohdista saadaan puristamalla kairan kärki pilariin. Kovemmissa pilareissa vaaditaan suurta kairakärjen tunkeutumisvoimaa ja kairauslaitteiston painon ja puristusvoiman on oltava riittävä. Lisäksi kairan kärkikappaleen koko ja muoto vaikuttaa vaadittavaan läpäisyvoimaan. Monitoimikairan puristusvoiman

ylityttyä kovimmissa pilareissa voidaan kairakärkeä heijaroida. Heijaroimalla saatujen kairausvastustulosten tarkkuus on heikempi kuin puristamalla saatujen tulosten /13/.

Pilarikairaus on nopea tutkimus, jolla saadaan pilarin suhteellinen pystysuuntainen leikkauslujuus. Koko pilarin matkalta saatava tulos paljastaa heikommät kerrokset. Perinteinen pilarikaira soveltuu vain pehmeille ja osin keskilujille pilareille. Kairauksen käyttöä rajoittavat pilarin rakenteen rikkova työmenetelmä, pilarin pituus sekä pilarin kaltevuus. Pitkissä pilareissa kairakärjellä on suurempi pilarin vinoudesta johtuva ulostyöntymisen riski /20,28,44/. Perinteinen pilarikaira on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3 Pilarikaira /44/.**

Perinteistä pilarikairakärkeä on Helsingin kaupungin geoteknisen osaston toimesta kehitetty. Uudella kolmisiipisellä kairankärkiosalla saadaan pilarin kairausvastus myös pilarin keskiosan ulkopuolelta ja kärjen vaippakitka on pienempi kuin kaksisiipisellä kairakärjellä kairattaessa. Uutta kairakärkeä voidaan monitoimikairalla puristaa kovempiin pilareihin kuin perinteistä pilarikairakärkeä. Kolmisiipisen kairakärjen pinta-ala on  $100 \text{ cm}^2$  /13/. Kuvassa 4 esitetään Helsingin kaupungin geoteknisen osaston käyttämä ja kehittämä kolmisiipinen pilarikairan kärki.



**Kuva 4 Helsingin kaupungin geoteknisen osaston pilarikairauksessa käyttämä kolmisii-  
pinen kärkikappale /15/.**

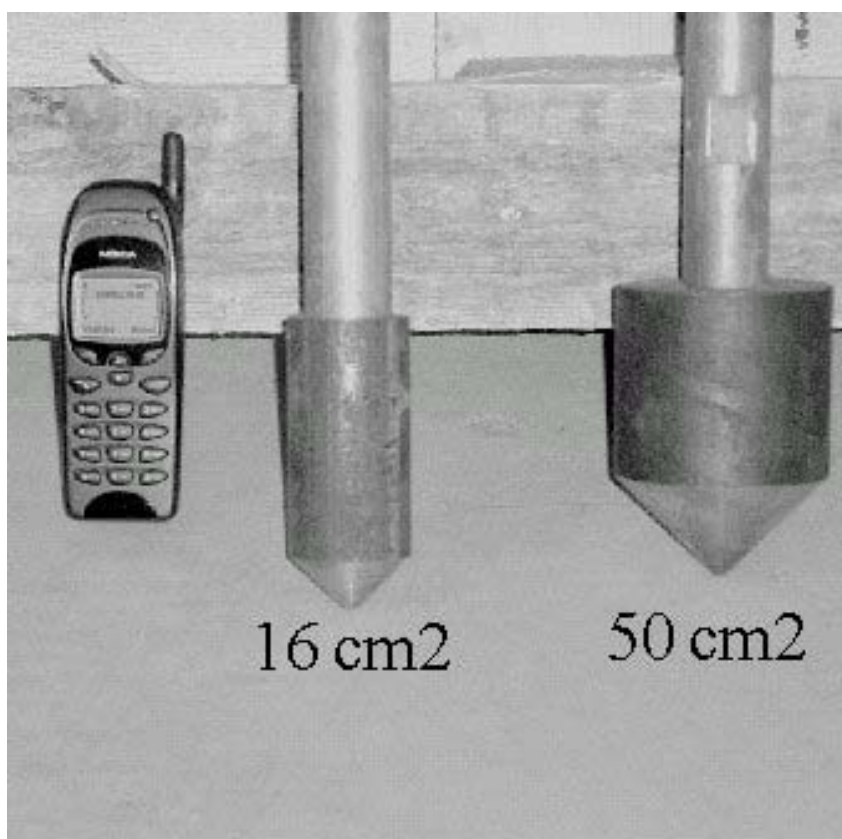
Pilarikairaustuloksista saadaan kaavalla 1 pilarin leikkauslujuus /28/.

$$\tau_p = \frac{p - \sigma_0'}{N_c} \quad (1)$$

jossa  $\tau_p$  on pilarin leikkauslujuus  
 $p$  on kairausvastus  
 $\sigma_0'$  maan tehokas pystysuorajännitys  
 $N_c$  kantavuuskerroin, joka saadaan kokeellisesti määritettyä vertaamalla pilarikairauksen kairausvastusta siipikairauksilla saatuihin todellisiin leikkauslujuuden arvoihin

Puristinheijarikairauksessa yhdistyvät pilarikairaus sekä puristinkairaus. Kairakärjen pinta-ala on 16 cm<sup>2</sup>. Kairauksen kannalta puristinheijarikairaus on puristinkairausta (CPTU) helpompi toteuttaa. Heijaroimalla pystytään tutkimaan lujat pilariosat, eikä puristusvoiman maksimi osoittaudu rajoittavaksi tekijäksi. Puristusjännitys mitataan sähköisesti kairan istukasta /20,45/.

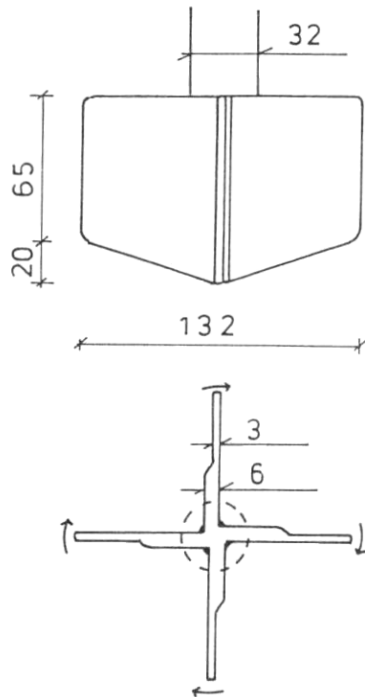
Helsingin kaupungin geotekninen osasto käyttää pilarin puristinheijarikairauksessa normaalia suurempia kairakärkiä. Suuremman kairakärjen käyttöä puoltavat pienempi vaippahankaus sekä kairan pysyminen paremmin pilarissa /13/. Kuvassa 5 on esitetty normaali 16 cm<sup>2</sup> ja geoteknisen osaston käyttämä 50 cm<sup>2</sup> kairakärki.



**Kuva 5** Helsingin kaupungin geoteknisen osaston pilarin puristinheijarikairauksessa käyttämä normaalikokoa suurempi, 50 cm<sup>2</sup>, kairakärki /15/.

#### *Pilarisiipikairaus*

Pilarisiipikairauksella saadaan suoraan pilarin leikkauslujuus in situ. Pilarisiipikairauksen heikkoutena on kokeen paikallisuus, saatu leikkauslujuus edustaa vain tiettyä syvyyttä pilarissa. Muita kairauksen heikkouksia ovat kokeen soveltumattomuus lujille pilareille sekä pilarin rakenteen rikkova tutkimusmenetelmä /44,45/. Kuvassa 6 on esitetty pilarisiipikairakärjen periaatekuva.



**Kuva 6 Pilarisiipikaira /44/.**

*Puristinkairaus (CPTU= Cone penetration test, undrained)*

Puristinkairaus (CPTU) soveltuu erityisesti lujille pilareille pienen kairakärjen ansioista. Kärjen pinta-ala on  $10 \text{ cm}^2$ . Puristusjännitys mitataan sähköisesti kairan kärjestä. Puristuslujuuden lisäksi puristinkairauksella saadaan mitattua huokosvedenpaine ja vaippahankaus. Puristinkairaustuloksista määritetään pilarin leikkauslujuus pilarikairan tavoin kaavalla 1. Muita puristinkairauksen etuja ovat tankovastuksen puute sekä tarkkuus pienellä alueella. Pienen kairakärjen vuoksi puristinkairauksessa on riski, että kairauksella saadaan mitattua vain pilarin keskikohdan heikoimman osan lujuus /45/.

Maastossa tehtävät kuormituskokeet:

#### *Levykuormituskoe*

Stabilointipilarista voidaan määrittää kenttäolosuhteissa muodonmuutosmoduuli syvyyslevykuormituslaitteistolla. Kokeessa kierretään ruuvimainen levy halutulle syvyydelle ja tehdään puristuskoe kasvattamalla kuormitusta portaittain. Kokeen tuloksena saadaan pilarin murto- ja myötöjännitys, kokoonpuristuma sekä muodonmuutosmoduuli. Pilarin muodonmuutosmoduuli lasketaan mittaustulosten perusteella kaavan 2 avulla /28/.

$$E_{pil} = w(1 - \nu^2) \frac{\Delta\sigma^* \phi}{s} I \quad (2)$$

jossa w on muotokerroin,  $w = \pi/4$ , levyn ollessa pyöreä  
 u pilarin Poissonin luku = 0,5  
 $\Delta\sigma$  kimmoalueella mitattu jännitysväli  
 $\emptyset$  levyn halkaisija ( 160 mm)  
 I korjauskerroin, =0,87, levyn ollessa jäykkä ja kuormitussyvyyden ollessa suurempi kuin 1 m  
 s mitattu painuma

Kuormituskoe on hidas ja kallis. Se on ainoa menetelmä, jolla saadaan pilarin muodonmuutosmoduuli kenttäolosuhteissa luotettavasti määritetyksi /28/.

### Näytteenotto

Pilarista voidaan ottaa näytteitä laboratoriotutkimuksia varten. Näytteitä voidaan ottaa maassa olevasta pilarista tai ylösnostetusta pilarista. Maassa olevasta pilarista pieniläpimittaisen edustavan näytteen saaminen pilarista on epävarmaa, koska näytteet rikkoutuvat usein näytteenoton yhteydessä. Parhaiten pieniläpimittainen näytteenotto onnistuu lujasta pilarista /28/.

### Pilarin ylösnosto

Vaihtoehtona pieniläpimittaiselle näytteelle on pilarin osan tai kokonaisen pilarin ylösnosto. Kuvassa 7 on esitetty ylösnostettu pilari.

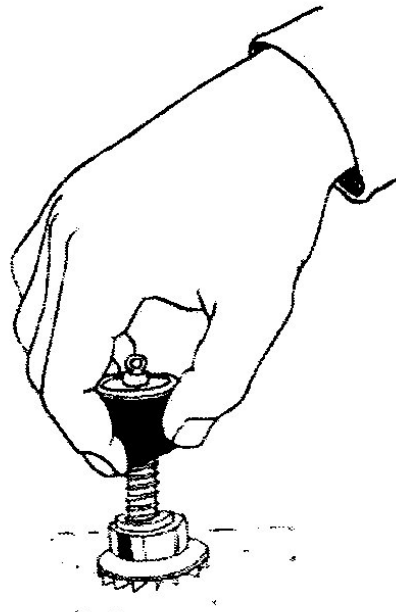


Kuva 7 Ylösnostettu pilari /15/.



Pilarin ylösnosto on havainnollinen, mutta kallis menetelmä. Ylösnostoa käytetään kiistanalaisissa tilanteissa. Nostettu pilari tutkitaan, valokuvataan ja tarvittaessa halkaistaan välittömästi noston jälkeen. Silmämääräisesti tarkastellaan onko sideaine levinnyt tasaisesti kaikkialle pilariin. Sideaineen tarkempaa jakautumista tutkitaan pH-mittauksilla /28/.

Pilarin leikkauslujuutta arvioidaan ylösnoston yhteydessä pienoissiipikairalla. Pienoissiipikaira on taskukokoinen leikkauslujuusmittari, jonka toiminta perustuu tutkittavan pinnan leikkauslujuuden mittaamiseen kiertämällä laiteeseen kiinnitettyä teräslevyä. Tutkittavan pinnan leikkauslujuuden arvon saavutettuaan mittarin kiertoliikettä vastustava jousi laukeaa ja mittarin osoitinviisari jää osoittamaan saavutetun leikkauslujuuden arvoa. Kuvassa 8 on esitetty pienoissiipikairan osat sekä periaatekuva mittarin toiminnasta /1/.



**Kuva 8** Kenttäolosuhteissa pilarin leikkauslujuutta voidaan arvioida käsikäyttöisellä leikkauslujuusmittarilla, pienoissiipikairalla / 1,6/.

Mittausten tulosten pohjalta tehdään päätelmät pilarin rakenteesta sekä osoitetaan paikat, joista laboratorionäytteet otetaan /28,47/.

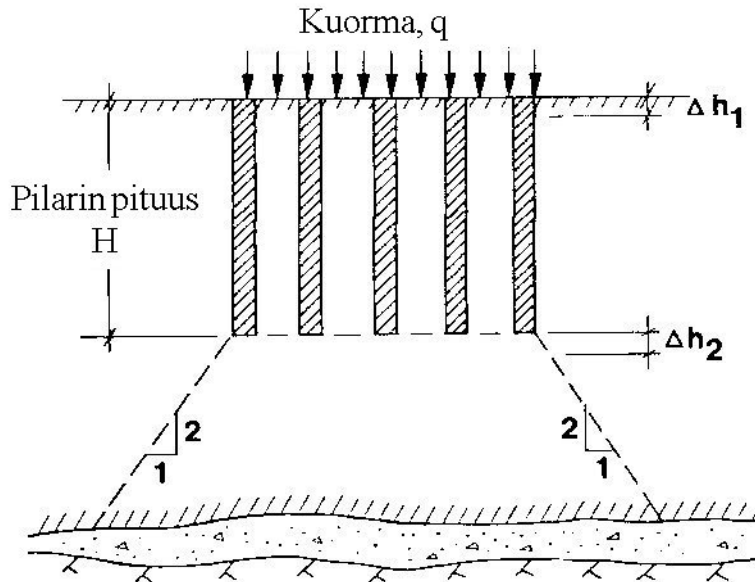
Laboratoriokokeet:

Pieniläpimittaiset näytteet valokuvataan ja tutkitaan silmämääräisesti. Laboratoriossa selvitetään yleisesti puristuslujuus ja muodonmuutosmoduuli. Osasta näytteistä määritetään sideainepitoisuus sekä happamuus /28,44/.

Kokonaisesta pilarista otetuista näytteistä tehdään laboratoriossa lujuuskokeita, määritetään kokonaissideainemäärä sekä happamuus /28/.

### 2.3 Syvästabiloidun alueen painuminen

Syvästabiloidun alueen kokonaispainuma muodostuu pilaroidun kerroksen painumasta sekä pilareiden alapuolisten kerrosten painumasta. Kuvassa 9 on esitetty pilaroidun kerroksen painuma  $\Delta h_1$  ja alapuolisten kerrosten painuma  $\Delta h_2$  /3, 44/.



**Kuva 9 Syvästabiloidun alueen painuman laskeminen /44/**

Pilaroidun kerroksen painuman arviointi perustuu oletukselle, että kuormitus jakautuu pilareille ja ympäröivälle savelle näiden muodonmuutosmoduulien ja pinta-alojen suhteessa. Lisäksi pilareille tulevan kuormituksen oletetaan olevan pilarin myötörajakuormaa pienempi. Oletusten täytyessä maapohjan ja pilarien painumat ovat yhtä suuret /3/.

Pilaroidun kerroksen painuman laskentaan on tarkemmin perehdytty liitteessä F. Pilaroidun kerroksen alapuolisten kerrosten painuma lasketaan konsolidaatiopainumana /3/.

### 2.4 Syvästabiloidun alueen jälkiseuranta

Nykyisin stabiloidun alueen laadunvarmistus keskittyy itse stabilointityön tarkkailuun ja valmiin pilarin laadunvalvontaan. Stabiloidun savikon käyttöaikainen seuranta on jäänyt vähemmälle. Monet stabiloidun savikon painumateoriat oletavat painumisen pysähtyvän tietyn ajan jälkeen kuormituksen alkamisesta. Kenttämittaustuloksista on kuitenkin havaittu stabiloidun savikon painuvan myös pitkän ajan jälkeen. Toisaalta arvioidut ja toteutuneet painumat voivat olla huomattavan erisuuruisia /20/.

Jälkiseuranta on hyvä toteuttaa merkittävämmissä kohteissa. Sen avulla saadaan kokemusperäistä tietoa esirakentamisen onnistumisesta. Mittausajan tulee olla riittävän pitkä, esimerkiksi 10 vuotta. Jälkiseurannassa mitattaviin pisteisiin

asennetaan suoraan rakenteeseen kiinnitettävä tai maahan asennettava mittalaitte. Rakenteisiin kiinnitettäviä mittalaitteita ovat muun muassa painumapultit. Maahan asennettavia laitteita ovat painumamittauslevyt ja painumanastat /44/.

Pitkäaikaisen lujuustutkimuksen kairauksia voidaan tehdä suoraan tutkittavan rakenteen läpi, tällöin kairattavien pilarien sijainti täytyy olla tunnettu. Eri aikoina tehtävät kairaukset voivat häiritä rakenteen varsinaista käyttötarkoitusta, tällöin lujuuden kehityksen tutkiminen rakenteen ulkopuolista pilareista on helpompi toteuttaa /20, 44/.

Pitkäaikaisesta stabiloidun alueen käyttäytymisestä on kirjoitettu vähän, vaikka onnistuneita kohteita on. Epäonnistuneista kohteista on kirjoitettu vähän. Suomessa on muutamien koekohteiden yhteydessä esitetty kohteen lasketut sekä seurantamittauksilla saadut painumat. Esimerkkinä Tiehallinnon KT 51:llä sijaitseva syvä- ja massastabiloitu koerakenne /48/.

Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa pilaroidun alueen havainnoidut painuman arvot ovat usein olleet pienempiä kuin laskennallisesti saadut painumien arvot. Lasketun painuman sekä havainnoidun painuman eron on havaittu kasvavan pilarien pituuden kasvaessa /46/.

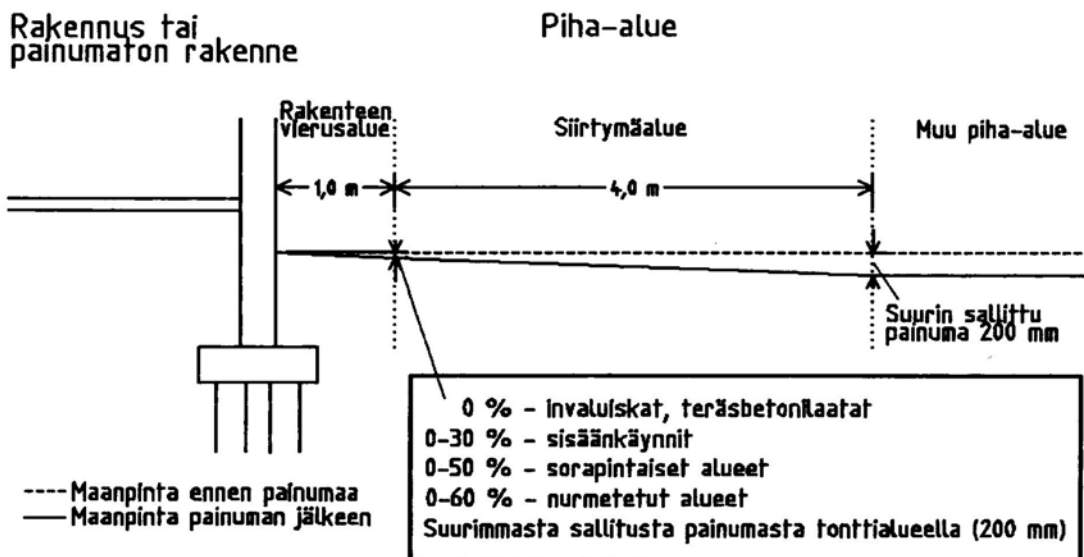
## 2.5 Kaava-alueen syvästabiloinnin painumakriteerit

Esirakentamisen suunnitteluvaiheessa asetettavilla painumakriteereillä pyritään ehkäisemään painumattoman rakennuksen ja esirakennetun, painuvan pihalleen välisiä painumaeroja /19/. Kuvassa 10 esitetään Helsingin Pikku- Huopalahdessa esiintynyt erään paalutetun painumattoman rakenteen ja painuvan esirakennetun rakenteen rajakohtaan muodostunut painumaero.

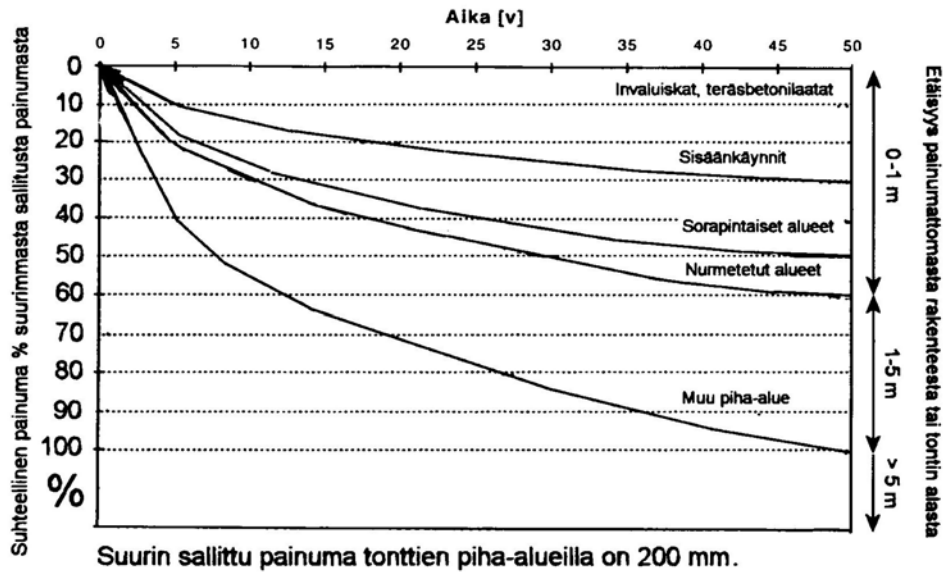


Kuva 10 Pikku- Huopalahdessa esiintynyt erään paalutetun painumattoman rakenteen sekä paaluttamattoman esirakennetun rakenteen rajakohtaan muodostunut painumaero /15/.

Helsingin kaupungin uusi suositus tonttialueen painumien sekä painumaerojen sallituista arvoista on esitetty kuvissa 11 ja 12.



Kuva 11 Helsingin kaupungin uuden suosituksen mukainen poikkileikkaus maan painumista paalutetun tai muun painumattoman rakenteen vieressä /19/.



Kuva 12 Helsingin kaupungin uuden suosituksen mukaiset sallitut painumat esirakennetuilla tonttialueilla /19/.

Piha-alueille sallittavat 200 mm painumat saattavat rakentamista seuraavien 50 vuoden aikana aiheuttaa selvästi havaittavia vaurioita pihakiveysten, ovien ja teräsbetonilaattojen kohdalla. Uudessa suosituksessa on tiukennettu painumatoman rakenteen vierustalla sallittavia painumia. Kuvassa 11 on uuden ehdotuksen mukaiset painumat rakennuksen vierustalla eri päällysrakennevaihtoehdoilla. Kuvassa 12 on käyrästä sallituista painumista eri etäisyyksillä rakennuksesta. Rakennuksen välittömän vierusalueen ja muun piha-alueen väliin jää 4 metriä leveä siirtymävyöhyke, jossa siirtymärakenteiden avulla tasataan painumaerot. Tiepinnoitteet tai putkijohdot voivat edellyttää tiukempia raja-arvoja sallituille painumille /19,40/.

Maarakennuksen yleisissä laatuvaatimuksissa esitetään sidottujen ja sitomatomien kulutuskerroksen pitkäaikaisiksi painumiksi ( yli 10 v) seuraavaa /30/:

- laatuluokan 1 osalta alle 100 mm painumia
- laatuluokan 2 osalta, vähäisiä halkeamia sallitaan, painumat alle 300 mm.
- laatuluokassa 3 ei päällyskerroksen pitkäaikaisia painumia ole rajoitettu.

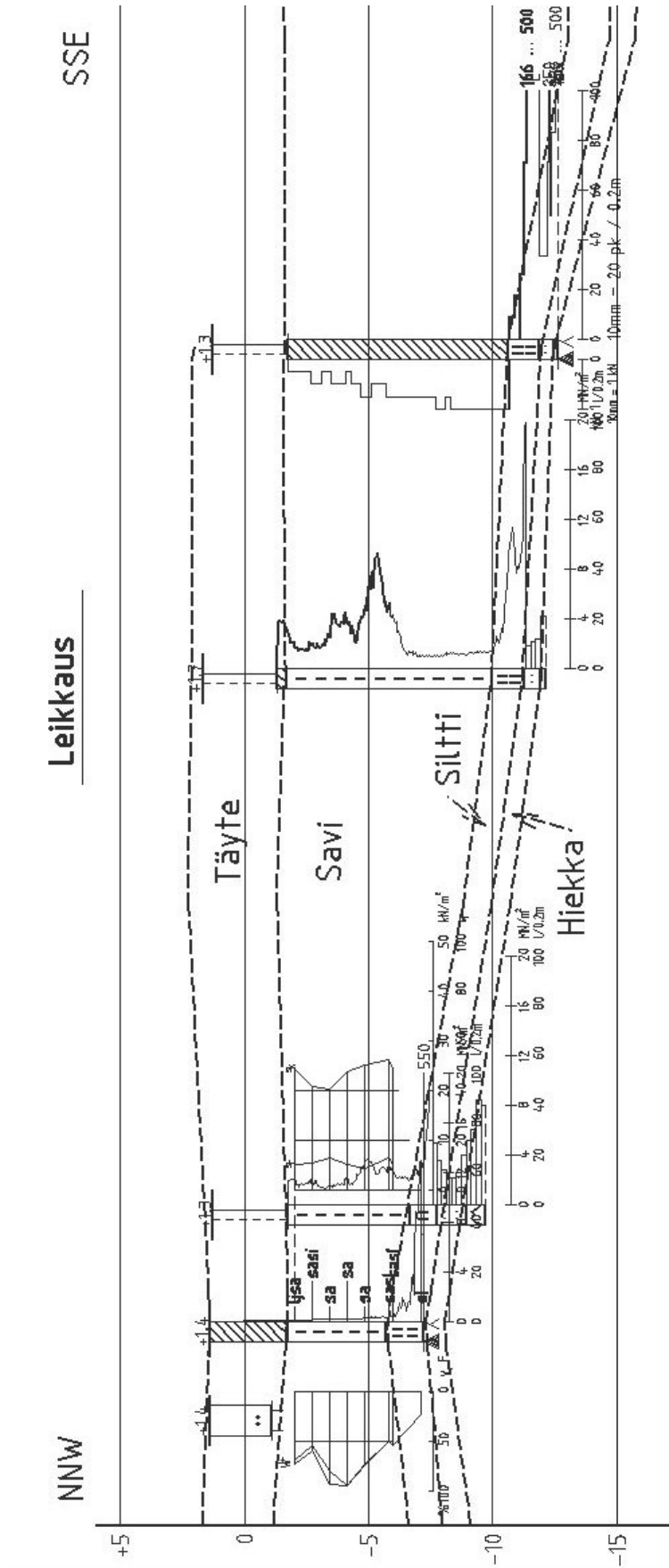
### 3. ESIMERKKITAPAUKSET

#### 3.1 Tali, Munkkivuoren laajennusalue

##### 3.1.1 Alue ja pohjasuhteet

Munkkivuoren laajennusalue sijaitsee Helsingin Talin alueella Iso- Huopalahden rannalla. Kohteen sijainti on esitetty liitteen A kartassa. Laajennusalue sijaitsee savialueella, jossa sijaitti aiemmin jätevedenpuhdistamo. 1950-1960 luvuilla alueelle kasattiin sekalaista kiviä ja lohkareita sisältävää täytemaata /31/.

Maanpinnan korkeusasema on alueella ennen esirakentamista vaihdellut tasojen + 0,2 ja + 4,0 välillä. Täytekerroksen paksuus on vaihdellut 0 ja 3,5 metrin välillä. Täytekerroksen alla olevan savikerroksen paksuus on vaihdellut 3 metristä 11 metriin. Luonnontilaisen saven kuivapainosta määritetty vesipitoisuus on vaihdellut 50% ja 110% välillä. Tehtyjen siipikairausten perusteella saven leikkauslujuus on ollut noin 10...20 kPa. Saven alla on silttiä, hiekkaa ja lohka-reista moreenia. Alueella tehdyt kairaukset ovat päättyneet noin 8...25 m syvyydelle maanpinnasta. Pohjaveden korkeus alueella seurailee merivedenpinnan korkeutta ja on vaihdellut ennen esirakentamista aikavälillä 3.1.1989...12.12.1990 tasojen 0 ja +1,5 välillä. Kuvassa 13 on esitetty poikki-leikkaus Talin alueelta. Savikon paksuus kasvaa selvästi etelää kohti mentäessä /14,23,24/.

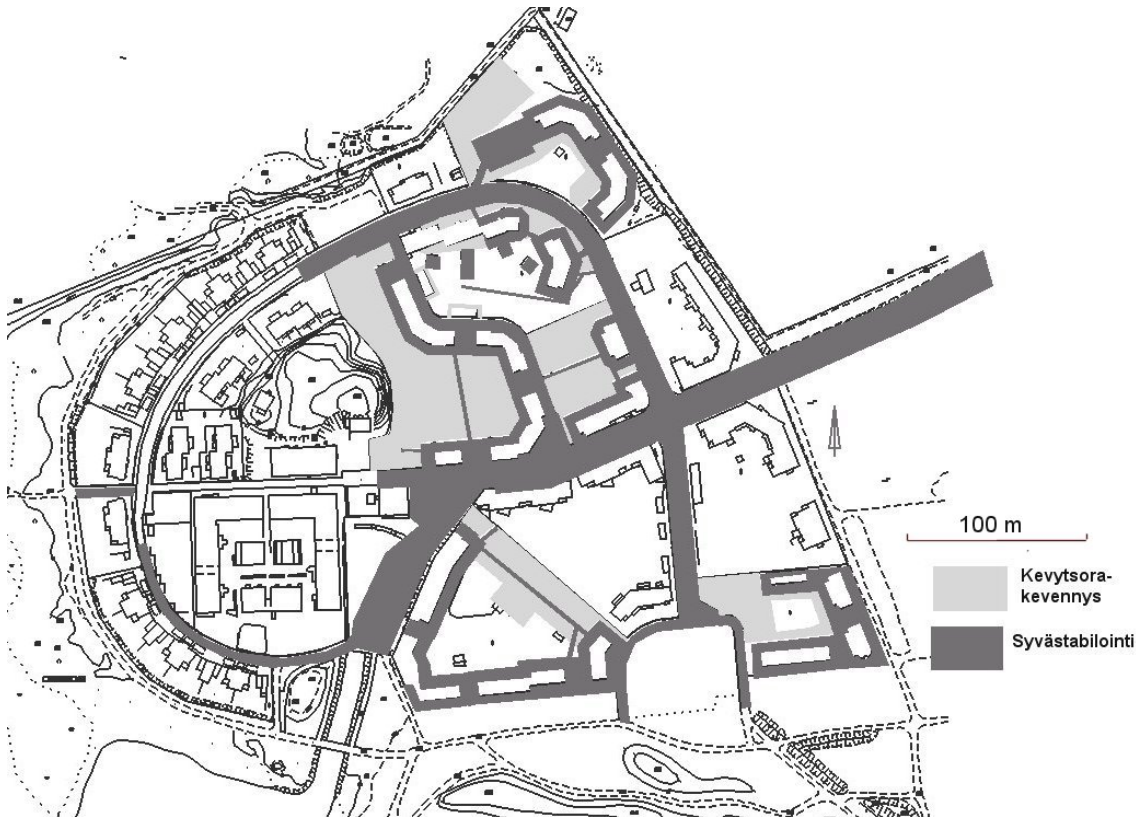


Kuva 13 Poikkileikkaus Talin alueen pohjasuhteista /14/.

### 3.1.2 Käytetyt esirakentamismenetelmät

Alueen esirakentamisessa päädyttiin pienentämään haitallisia painumia sekä syvästabiloinnin että kevytsorakevennyksen avulla. Katualueilla ja rakennusten ympärillä käytettiin syvästabilointia.

Kuvassa 14 on esitetty eri menetelmillä esirakennettujen alueiden sijainnit kartalla.

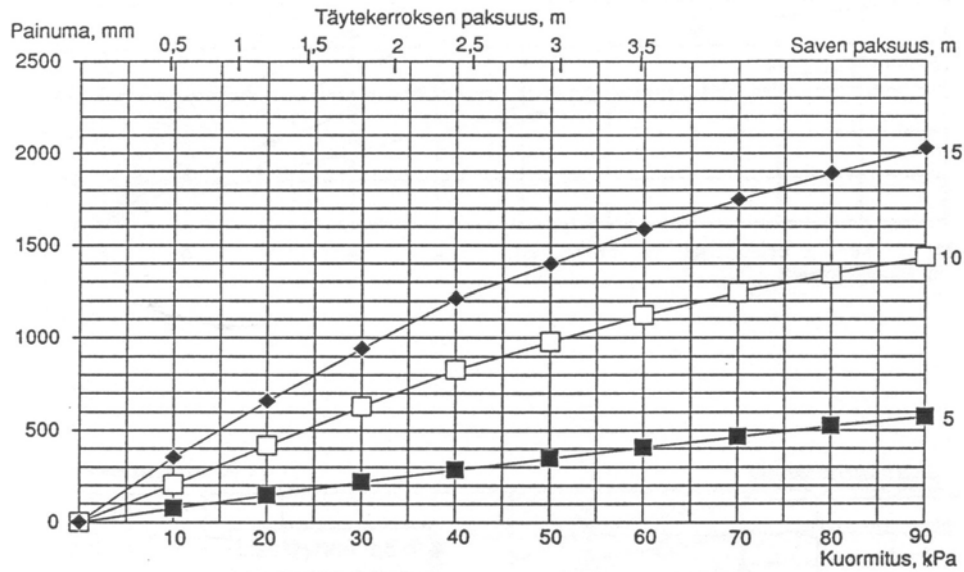


**Kuva 14 Talin laajennusalueen esirakennetut alueet /2,23,24,25,27,34/.**

Esirakentamisen alueellisena painumakriteerinä käytettiin jäljellä olevaa painumaa esirakentamisen jälkeisinä 50 vuotena. Piha-alueilla sallittu painuma on 300 mm ja tonttviemärien kohdalla 200 mm /24,27/.

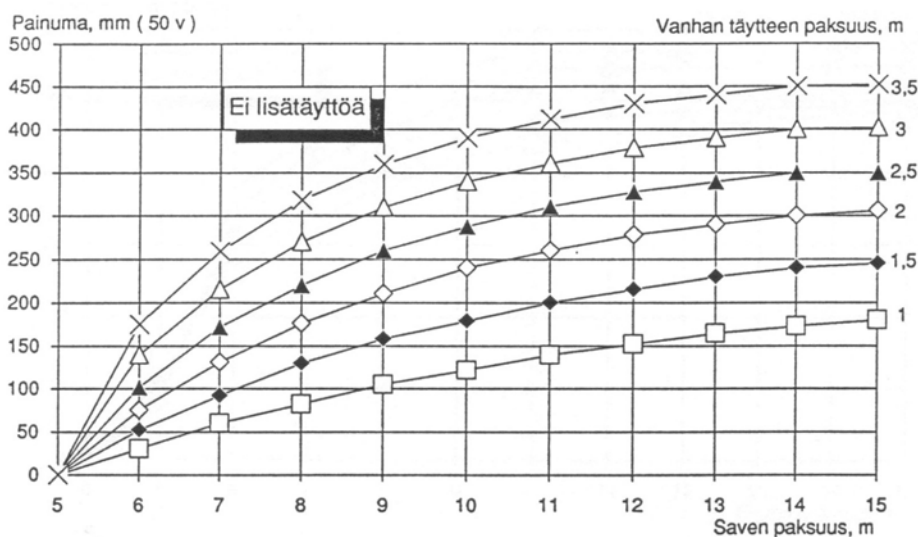
Suunnitteluvaiheessa esirakentamattoman savikon arvioitiin painuvan kokonaisuudessaan 180...1350 mm. Arvioinnissa saven paksuus vaihteli 5...15 metriin ja täytepaksuus vaihteli 1,5...3 metriin. Kuvassa 15 on esitetty alueen arvioidut kokonaispainumat vanhan täyterroksen paksuuden ja savikerroksen paksuuden funktiona /31/.





Kuva 15 Talin alueen arvioidut kokonaispainumat vanhan täytekerroksen ja savikerroksen paksuuden funktiona /31/.

Kuvassa 16 esitetään suunnitteluvaiheessa tehty arvio vanhan täytekerroksen aiheuttaman painuman suuruudesta seuraavien 50 vuoden aikana. Painumat on ilmoitettu täytteen paksuuden ja saven paksuuden funktiona /31/.

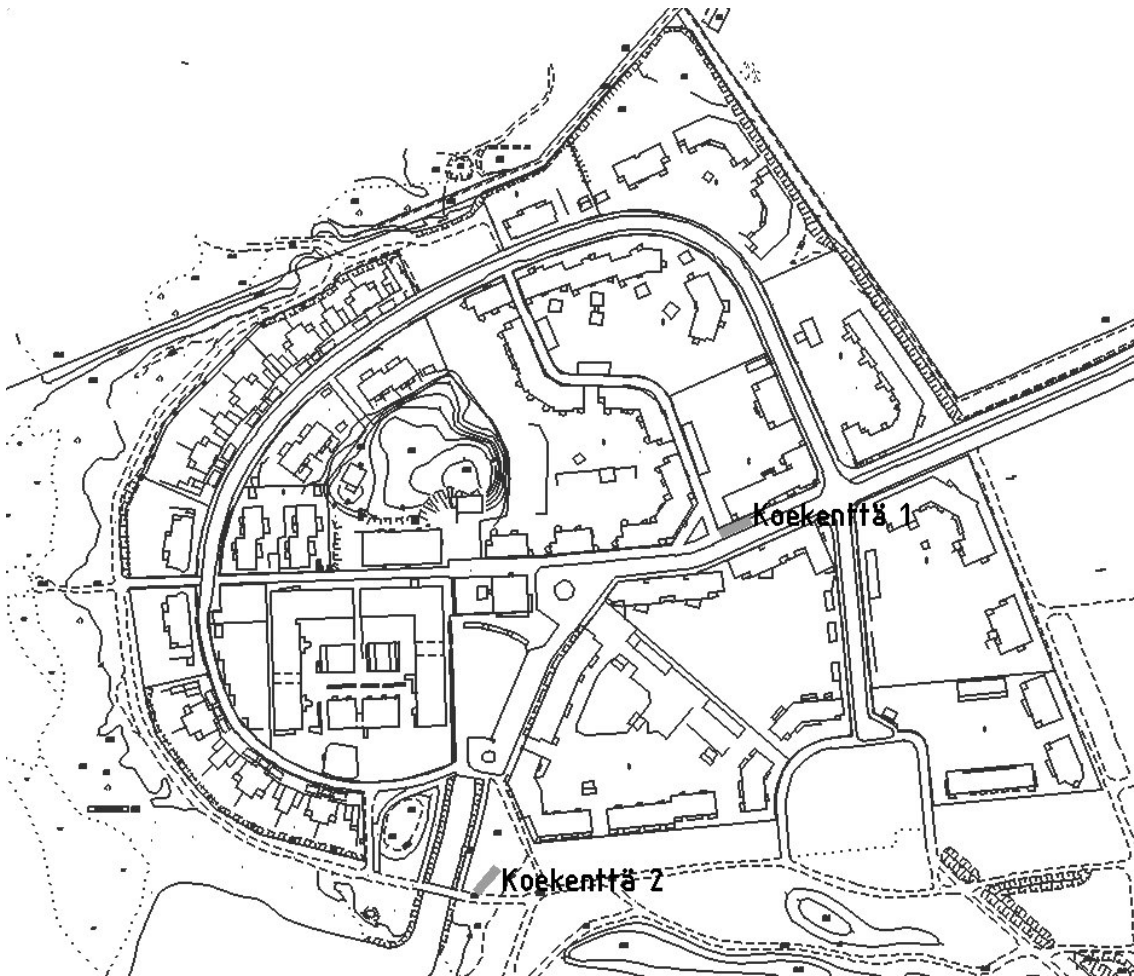


Kuva 16 Talin alueen suunnitteluvaiheessa tehty arvio vanhan täytön aiheuttamasta painumasta seuraavan 50 vuoden aikana /31/.

### 3.1.3 Koestabiloinnit

Katujen esirakentamissuunnittelun yhteydessä tehtiin alueella kaksi koekenttää, joissa tutkittiin saven stabiloituvuutta eri sideaineilla ja sideainemäärillä. Koeksessa käytettiin Ø500 mm pilareita. Sideaineena pilareissa käytettiin sekä kalkkisementtiä että kalkkia. Kalkkia koepilareissa käytettiin 18 kg pilarimetrille. Kalkkisementtiä, jossa kumpaakin ainetta oli 50 painoprosenttia, kokeiltiin kah-

della eri sideainemäärällä. Sideainetta käytettiin sekä 18 kg pilarimetrille että 24 kg pilarimetrille. Kuvassa 17 on esitetty koekenttien sijainti kartalla /34/.



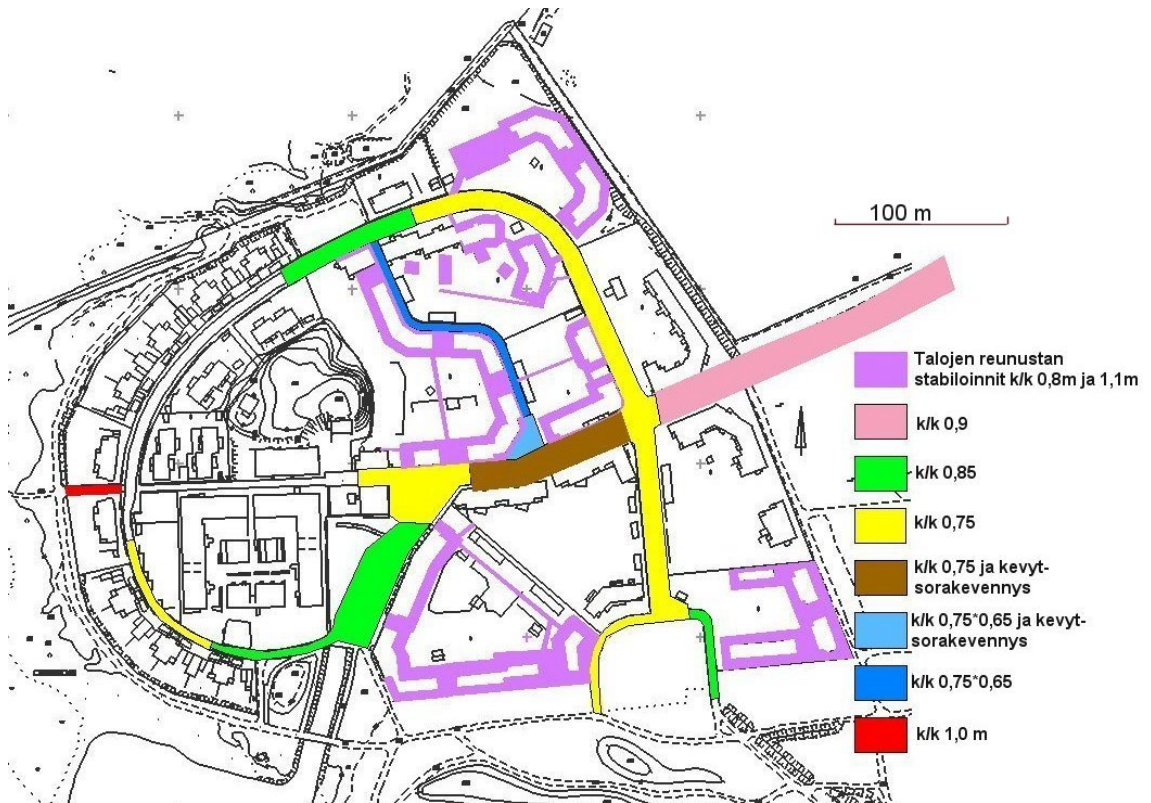
**Kuva 17 Talin laajennusalueen koekenttien sijainti kartalla /34/.**

Valmiit pilarit tutkittiin 30 ja 90 vuorokauden ikäisinä. Tulosten perusteella havaittiin kalkkisementti-seoksella tehtyjen pilareiden leikkauslujuuksien hajonnan olevan suuri. Kalkilla tehtyjen pilareiden leikkauslujuus tulokset olivat tasaisempia. Koestabiloinnin tulosten perusteella päädyttiin käyttämään koko alueella sideaineena kalkkia /34/.

#### 3.1.4 Stabiloinnin toteutus

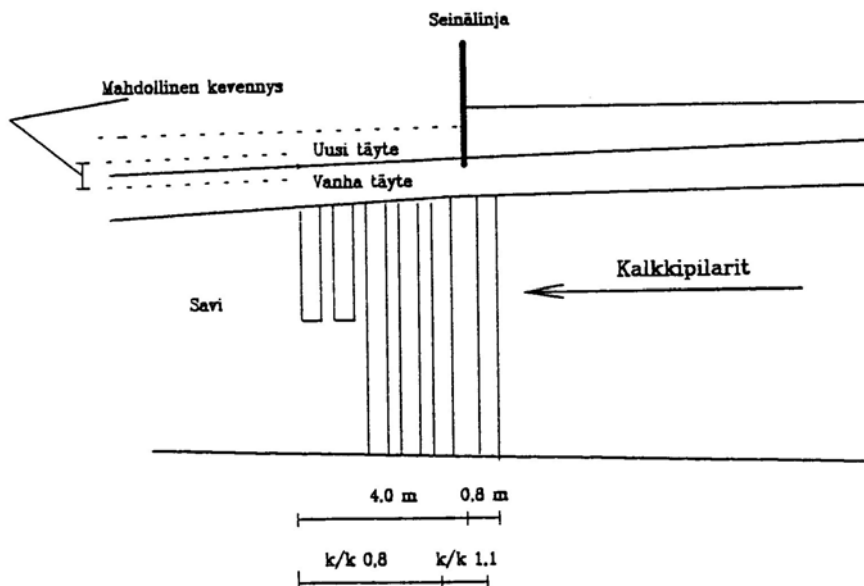
Stabiloinnin toteutti YIT-yhtymä vuonna 1991. Katualueen sekä korttelialueilla rakennusten vierustojen syvästabiloinnit tehtiin alkuvuodesta 1991. Korttelialueilla olevien putkijohtojen syvästabiloinnit tehtiin loppuvuodesta 1991 /26/.

Kuvaan 18 on koottu alueella käytettyjen eri keskiöetäisyyksillä stabiloidut alueet.



Kuva 18 Talin laajennusalueen stabiloidut alueet /2,23,24,25,27,34/.

Rakennusten reuna-alueille on siirtymärakenteeksi sijoitettu viisi (5) riviä stabi-loituja pilareita kuvan 19 osoittamalla tavalla /2/.



Kuva 19 Rakennusten reuna-alueilla käytetty stabilointitapa. Uloimpien syvästabilointiri-vien pilarit on tehty täysimittaisina, mikäli rakennuksen vierellä on putkijohtoja /2/.

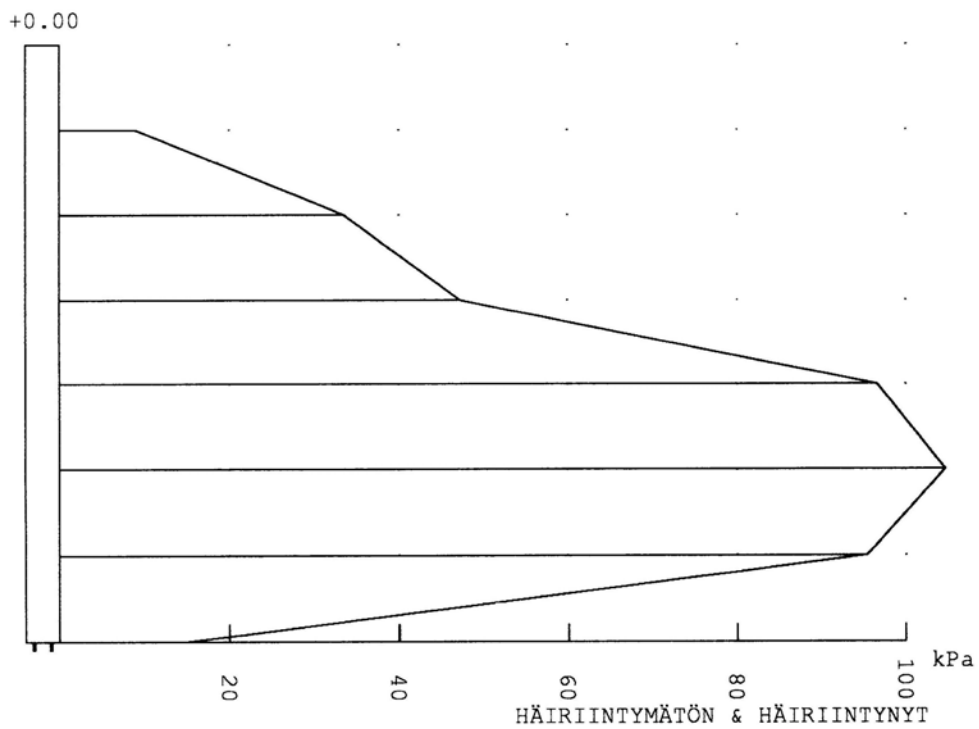
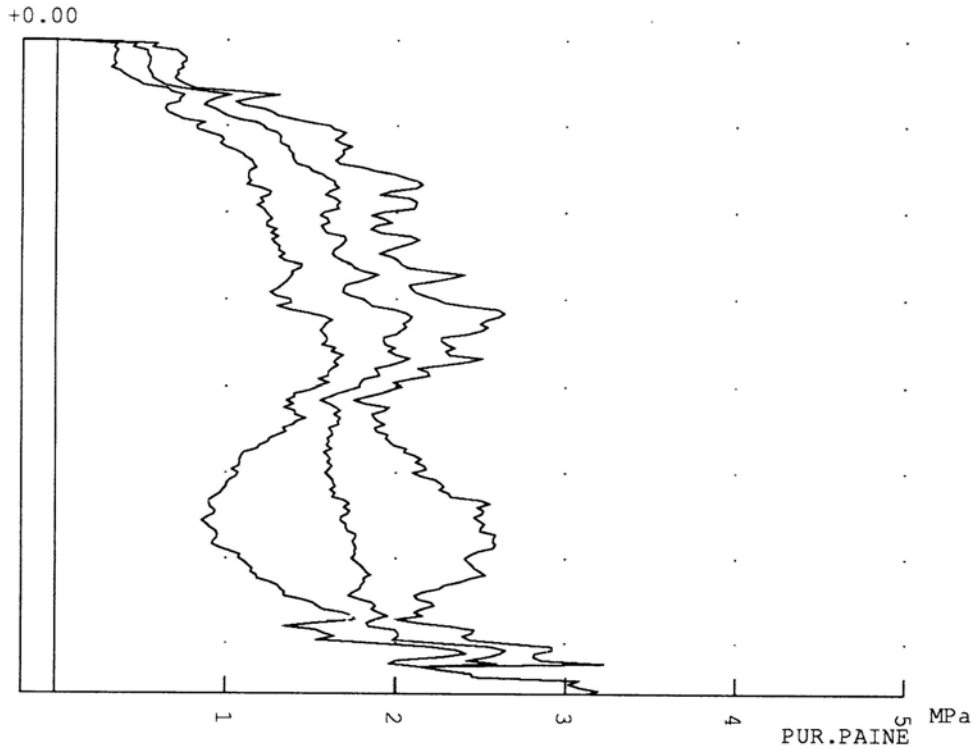
### 3.1.5 Laadunvalvonta

Alueelta tehtiin useita laadunvalvontakairauksia. Kairattujen pilarien ikä on vaihdellut 30-90 vuorokauden välillä. Laadunvalvontakairauksina on käytetty puristin-, puristinheijari- ja pilarisiipikairausta.

Kairausten perusteella todettiin, että kalkkistabilointi lujitti ensimmäisen kuukauden aikana savea noin 3... 7- kertaiseksi luonnontilaisen saveen leikkauslujuuteen nähden. Pilarin leikkauslujuus on ollut tällöin noin 45-78 kPa. Pilarisiipikairausten yhteydessä havaittiin, että tehdyt siipikairaustulokset eivät ole puristinkairauksen kanssa yhteneviä pilarin ylimmän kolmen metrin matkalla. Eron todettiin johtuvan pilarin yläpäähän muodostuneesta heikommasta, joskus jopa ontosta keskiosasta /22/.

40 ja 90 vuorokauden ikäisistä pilareista tehtyjen kairausten perusteella todettiin pilarien lujittuneen lisää noin kuukauden ikäisiin pilareihin verrattuna. Vanhemmina kairattujen pilareiden leikkauslujuus oli noin 96 kPa /32,33/.

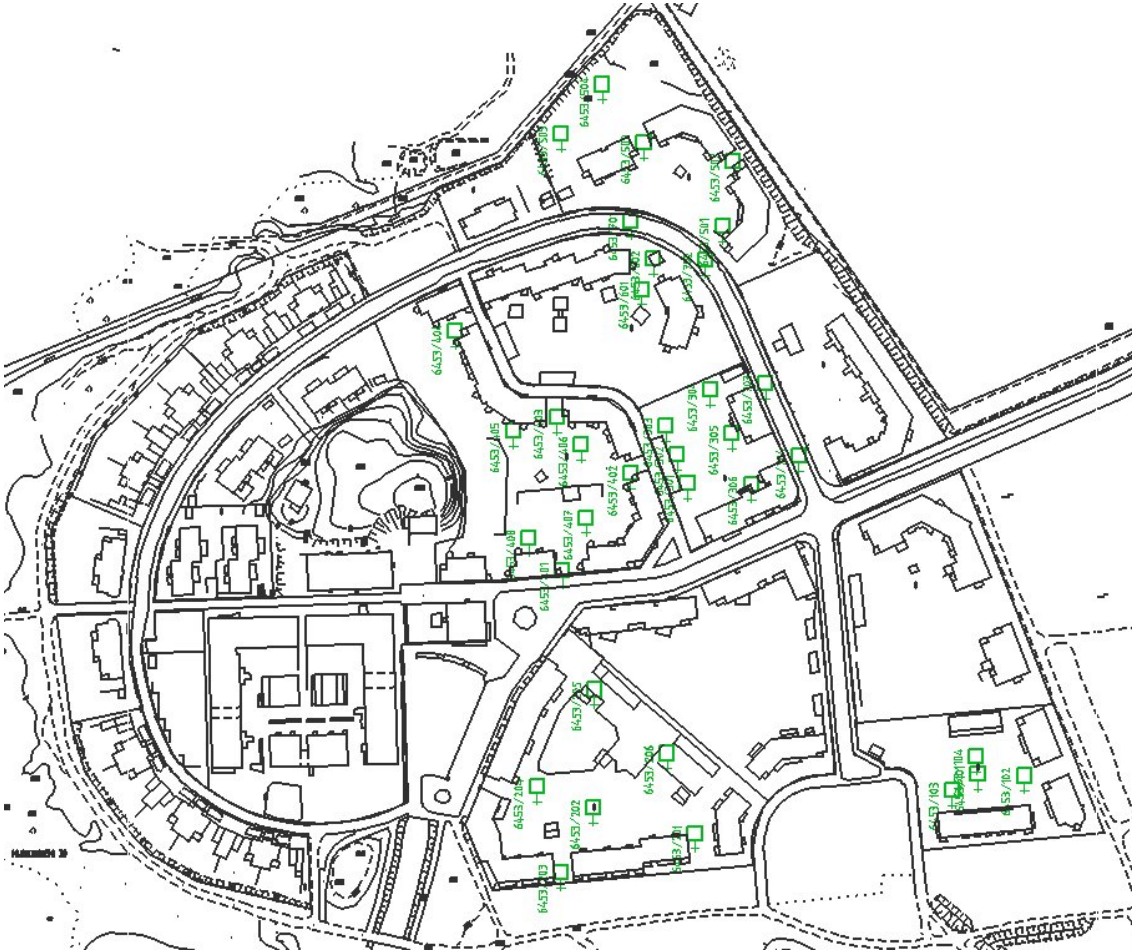
Kuvissa 20 ja 21 on esitetty Talin alueelta tehtyjä laadunvalvontakairauksia. Kuvassa 20 on puristinkairaustulos ja kuvassa 21 pilarisiipikairaus tulos, ylimmän kolmen metrin matkalla tulokset poikkeavat toisistaan. Pilarisiipikairauksessa käytettiin kairakärkeä, jonka pinta-ala on 80 mm\*175mm /22/.



Kuvissa 20 ja 21 on Talin alueelta tehtyjä laadunvalvontakairauksia. Kuvassa 20 on puristinkairaustulos. Kuvaajaan on koottu pilarista tehtyjen kairausten minimi- ja maksimiarvot sekä leikkauslujuuksien keskiarvo. Kuvassa 21 pilarisiipikairaustulos. Pilarisiipikairaauksessa on käytetty kairakärkeä, jonka pinta-ala on 80 mm\*175 mm /22/.

### 3.1.6 Pitkäaikaiset seurantatutkimukset

Kuvassa 22 on esitetty laajennusalueella toimiva aktiivinen painumamittausverkosto. Verkoston avulla on seurattu alueellista painumaa. Talin alueen jälkiseurannan mittaukset on aloitettu rakentamistoiminnan rauhoituttua marraskuussa 1993.



**Kuva 22 Talissa aktiivisesti havainnoitujen painumamittauspisteiden sijainti kartalla /14/.**

Liitteessä B on esitetty stabiloiduilla alueilla sijaitsevien mittauspisteiden painumakuvaajat. Osa alueen mittauspisteistä joudutaan hylkäämään pisteen historian aikana tapahtuneen häiriön vuoksi. Häiriöitä ovat esimerkiksi mittaustulosten suuri vaihtelu tai pisteen tuhoutuminen. Osa mittauspisteistä sijaitsee pihakaivojen kohdalla. Mittauskohtana on tällöin käytetty kaivonkanta. Näissä pisteissä, kaivonkannen asennon vaihtelu on voinut aiheuttaa epätarkkuutta mittaustuloksissa /29/. Liitteessä B olevissa painumamittauskuvaajissa 203, 205, 206, 401 on tehty korjaus. Nämä pisteet sijaitsevat pihakaivon kohdalla ja kaivon kannen korkoa on nostettu mittaushistorian aikana. Nosto on korjattu painumamittauskuvaajissa tekemällä arvioidun noston suuruinen vaihesiirto kuvaajassa.

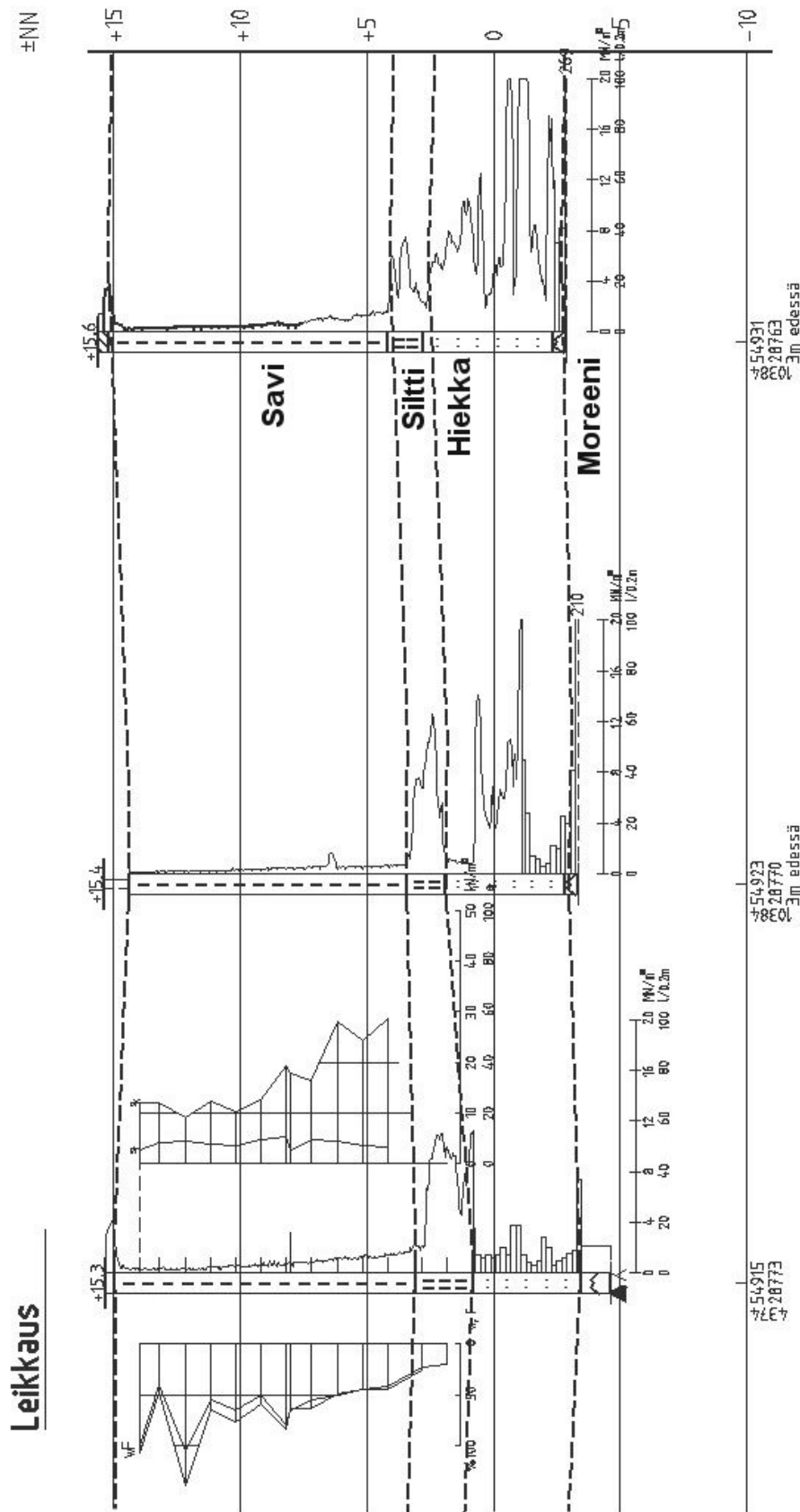
## 3.2 Fallkullan kaava-alue

### 3.2.1 Alue ja pohjasuhteet

Fallkullan kaava-alue sijaitsee Pohjois-Helsingissä Malmin lentokentän luoteispuolella. (Liite A) Kaava-alueen pinta-ala on 12,2 ha, josta korttelialueeksi on kaavoitettu 10,3 ha ja katualueeksi 1,9 ha /9/.

Luonnonmaanpinnan korkeusasema alueella vaihtelee tasojen +15 ja +16 välillä. Humusmaakerroksen alla on 6...13 m savea. Saven vesipitoisuus vaihtelee rajoissa  $w = 50...120$  % kuivapainosta ja siipikairalla määritetty leikkauslujuus rajoissa 6...20 kPa. Alueen saven kokonaisrikkipitoisuus on 0,05% ja humuspitoisuus 1,4...1,6%. Savikerroksen alla on tiiveydeltään vaihtelevaa silttiä ja hiekkaa. Alueella tehdyt kairaukset ovat päättyneet noin 16...23 m syvyydelle maanpinnasta. Alueen pohjavesi on 1.6.1992...30.5.2000 välisenä aikana vaihdellut korkeustasojen +14,08...+15,78 välillä, ollen noin 0...1,5 m syvyydellä mittauskohdan maanpinnasta /9, 18/.

Alueen eteläosa on vanhaa peltoaluetta. Pohjoisosassa on ollut pientaloasutusta. Kuvassa 23 on esitetty Fallkullassa tyypillinen maaperän kerrosrakenne /9/.

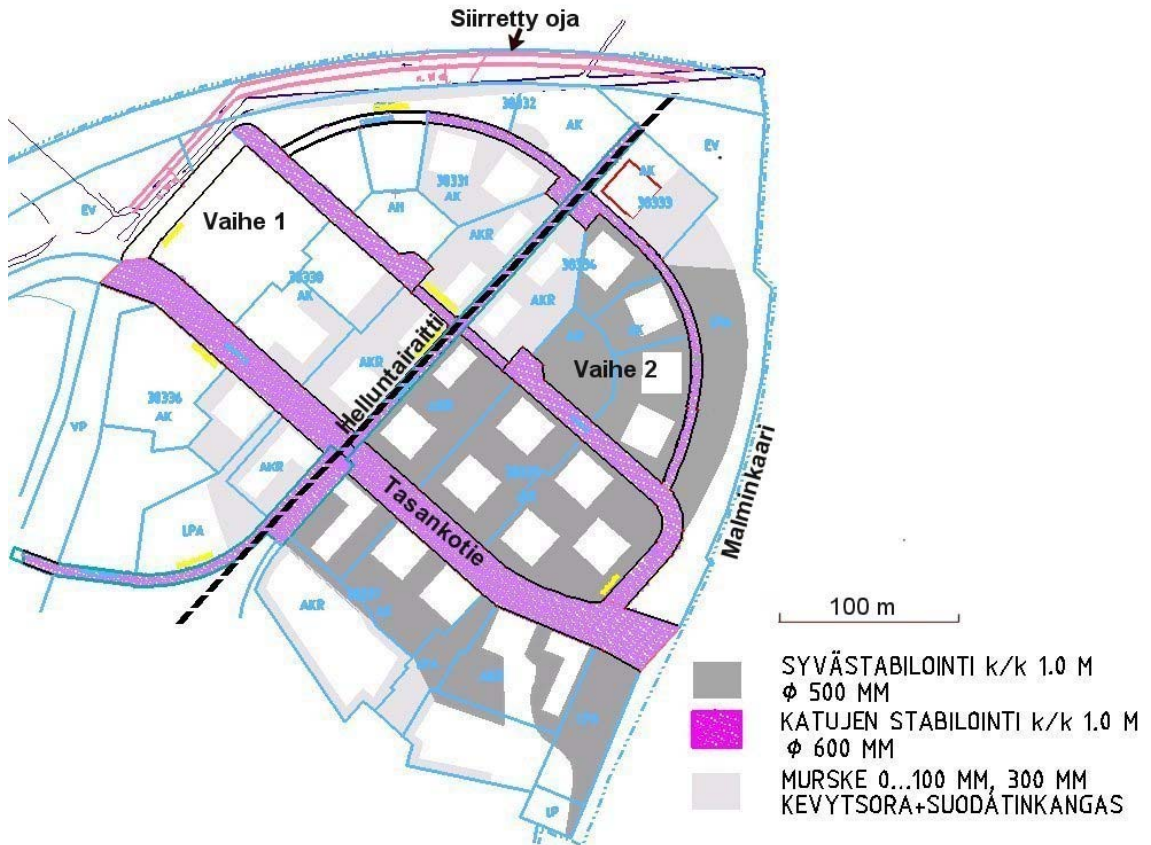


Kuva 23 Tyypillinen maan kerrosrakenne Fallkullassa /14/.



### 3.2.2 Käytetyt esirakentamismenetelmät

Alueen esirakentamisessa päädyttiin haitallisten painumisen pienentämiseksi sekä kevytsorakevennykseen että syvästabilointiin. Katualueilla käytettiin syvästabilointia. Kuvassa 24 on esitetty eri menetelmillä esirakennettujen alueiden sijainnit kartalla sekä esirakentamistyön vaiheistus /9/.



**Kuva 24** Fallkullan kaava-alueella käytetyt esirakentamismenetelmät ja työn vaiheistus /9/.

Esirakentamisen alueellisena painumakriteerinä on käytetty sallittua jäljellä olevaa painumaa esirakentamisen jälkeisinä 30 vuotena. Painumakriteeri katualueilla, joilla sijaitsee painumalle herkkiä pinnoitteita tai laitteita on 50 mm. Muilla katu-, tontti- ja LPA- alueilla sallitaan 150 mm painumat. Esirakentamattomana alueen laskennallisiksi kokonaispainumiksi on saatu 250...450 mm, täyttöpaksuuden vaihdella 0,6..1,2 metriin /9/.

Kortteleissa esirakennettiin kaavan mukaisten rakennusalojen ulkopuolelle jäävät alueet. Ensimmäisessä vaiheessa syvästabiloitiin Helluntairaitin länsipuolisen alueen kadut sekä siirrettiin alueen pohjoispuolella sijainnut oja. Tonttialueiden kevennykset tehtiin asuintalojen rakentamisen yhteydessä. Ensimmäisen vaiheen stabilointityöt tehtiin vuodenvaihteen 2000-2001 tuntumassa /9/.

Fallkullan toisen vaiheen syvästabilointi aloitettiin syksyllä 2001 ja se päättyi keuhän 2002 aikana. Toisen vaiheen aikana syvästabiloitiin Helluntairaitin itäpuoli-

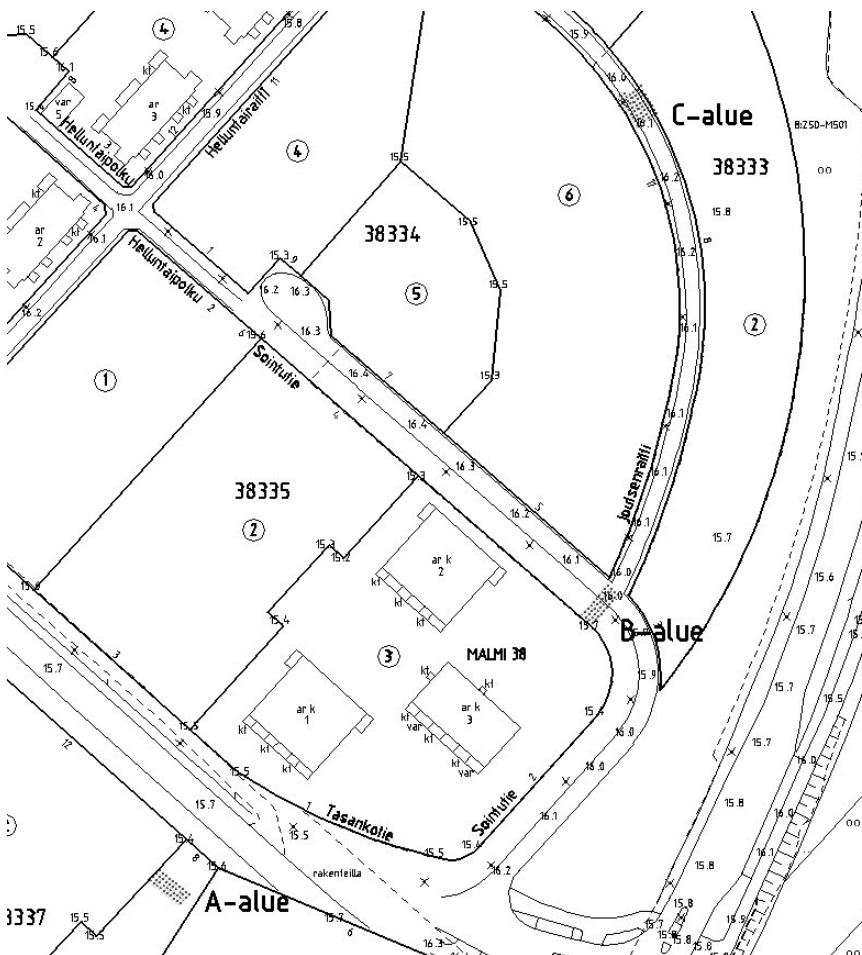
sen osan kadut sekä osa korttelialueista. Toisen vaiheen kevennystyöt tehtiin rakentamisen yhteydessä /12/.

### 3.2.3 Koestabiloinnit

Ensimmäistä vaihetta varten ei tehty koestabilointia.

Falkullan kaava-alueen ensimmäisen vaiheen stabilointipilareista tehdyissä laadunvalvontakairauksissa huomattiin heikkousvyöhyke pilareiden yläpäässä 3,5 – 7 metrin syvyydellä. Heikkousvyöhykkeen arveltiin johtuvan sideaineen leviämisestä pilarin ulkokehälle. Leviämisen yhtenä syynä voi olla häiriintynyt maakerros tai maakerros, jossa virtaa paineellinen pohjavesi /11/.

Ennen toisen vaiheen aloitusta tehtiin alueella koestabilointi. Koestabiloinnilla etsittiin sekoitusmenetelmää ja sideainejakaumaa, joka tuottaisi pilarin yläosaan riittävän lujuuden ja sopisi aikaisemmin määriteltyyn urakka-aikaan ja hintatasoon. Koepilarit tehtiin täysimittaisina kenttäkokeina urakka-alueelle. Tutkimukseen valitut pilarityypit määriteltiin kokemuseräisesti /12/. Kuvassa 25 on esitetty toisen vaiheen koestabilointialueet.



Kuva 25 Falkullan toisen vaiheen koestabilointi alueet /12/.

### 3.2.4 Stabiloinnin toteutus

- Molemmissa vaiheissa syvästabilointi tehtiin kalkkisementtipilareilla, joiden keskiöetäisyys oli 1,0 m.
- Katualueilla käytettiin Ø600 mm pilareita ja korttelialueella Ø500 mm.
- Sideaineena käytettiin kalkin ( CaO) ja yleissementin ( CEM II B 42,5) seosta . Kumpaakin ainetta oli seoksessa 50 painoprosenttia.
- Sideainemäärä ei saanut alittaa annettua vaatimustasoa kuin korkeintaan 2,0 kg/ pilarimetri.
- Yksittäisen pilarin keskimääräinen sideaineen alitus sai olla korkeintaan 1,0 kg/ pilarimetri.
- Kärjen nousunopeus sai olla enintään 10 mm/ kierros.
- Pilarien kaltevuus sai poiketa suunnitellusta enintään 20 mm/m /9/.

#### *Ensimmäinen vaihe*

Ensimmäisen vaiheen stabiloinneissa käytettiin sideainetta 149 kg/ m<sup>3</sup> eli 42 kg/ pilarimetriä kohden Ø600 mm pilarissa. Sideainemäärän valinta perustui Helsingin alueella tehtyihin aikaisempiin syvästabilointeihin ja niistä saatuihin kokemuksiin /37/.

Ensimmäisen vaiheen urakoitsi YIT-yhtymä. Ensimmäinen vaihe urakoitiin vuoden vaihteessa 2000-2001 /11/.

#### *Toinen vaihe*

Stabilointityön toisen vaiheen toteuttivat YIT- yhtymä ja Rakennus Oy Lemminkäinen. Töiden kokonaismäärä oli noin 514 000 pilarimetriä. YIT- yhtymä urakoi katualueen Ø600 mm pilarit ja Rakennus Oy Lemminkäinen tonttialueiden Ø500 mm pilarit /7/.

Työn alkuvaiheessa pilarit sekoitettiin käyttämällä samaa sideainemäärää koko pilarin matkalla. Molemmat urakoitsijat käyttivät sekoituskärkenä niin kutsuttua kattilaterää. Kattilaterä on esitetty kuvassa 26.



**Kuva 26 Työn alkuvaiheessa korttelialueella sekä koko katualueella käytetty niin kutsuttu kattilaterä /15/.**

Sideainetta käytettiin noin  $149 \text{ kg/ m}^3$ , eli  $\text{Ø}500 \text{ mm}$  pilareissa  $29 \text{ kg/ pilarimetri}$  ja  $\text{Ø}600 \text{ mm}$  pilareissa  $42 \text{ kg/ pilarimetri}$ . Sekoitusmenetelmää muutettiin työn edetessä ensimmäisen vaiheen ladunvalvontakairauksista saadun tiedon perusteella. Muutettujen pilarien ylimmällä 5 metrillä korotettiin sideainemäärää noin 15 %. Muutoksen jälkeen pilarin ylimmän 5 m kokonaissideaine määrä oli  $170 \text{ kg/ m}^3$ . Vastaavasti alimmalla osalla vähennettiin sideainetta noin 20%, jolloin kokonaissideaine määräksi jäi  $120 \text{ kg/ m}^3$ . Lisäksi korttelialueilla käytettiin sekoitusjärkenä avointa kolmisiipistä terämallia, niin kutsuttua joulukuusiterää. Kuvassa 27 on esitetty avoin kolmisiipinen terämalli. /7,15/ Tehdyt muutokset eivät vaikuttaneet urakkahintaan tai -aikaan.



**Kuva 27 Lemminkäisen käyttämä avoin kolmisiipinen terämalli eli niin kutsuttu joulu-kuusiterä /15/.**

Myöhemmin tekstissä samalla sideainemäärällä koko pilaripituudella tehtiin pilareihin viitataan alkuperäisenä menetelmänä ja muutetulla sideainemäärällä tehtiin stabilointeihin muutettuna menetelmänä.

Kuvaan 28 on koottu eri terämalleilla sekä sideainejakaumilla tehtyjen alueiden sijainti kartalla.



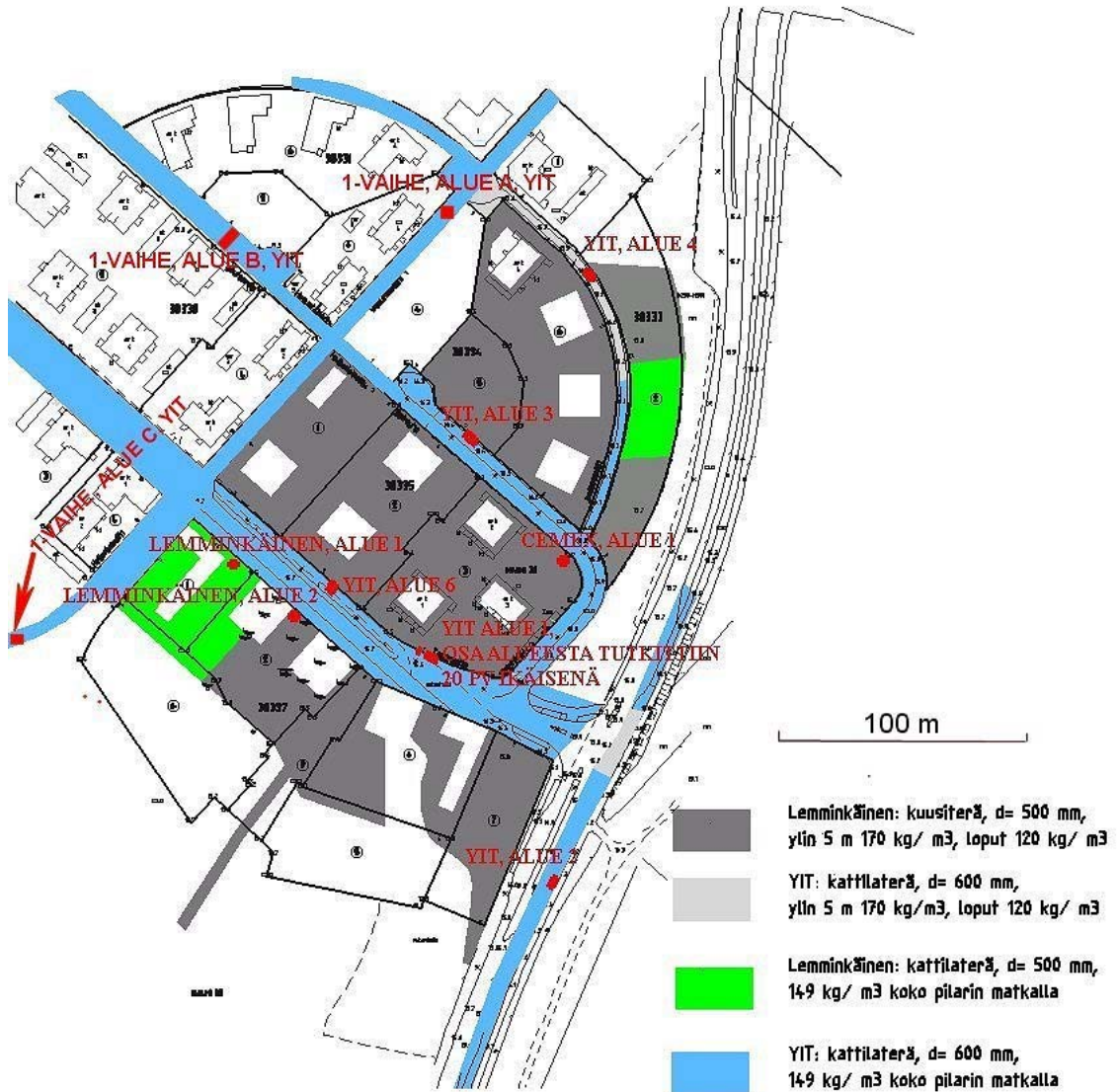
Kuva 28 Eri sekoitusmenetelmillä tehtyjen alueiden sijainti kartalla /8, 10/.

### 3.2.5 Laadunvalvonta

Urakoitsijoiden stabilointityötä seurattiin laadunvalvontakairauksin sekä ensimmäisessä että toisessa vaiheessa. Laadunvalvontakairaukset tehtiin stabilointityön jälkeen määritetyistä kohdista yli kuukauden ikäisiin pilareihin. Kairaukset tehtiin puristin- heijarikairalla, joka oli varustettu 50 cm<sup>2</sup> kärjellä. Normaalin kärjen pinta-ala on 16 cm<sup>2</sup>. Edellä mainitut kairakärjet on esitetty kuvassa 5. Pilareita koestettiin myös kolmisiipisellä pilarikairalla. (Kuva 6). Kairausten avulla pyrittiin selvittämään pilarien homogeenisuus sekä varmistamaan, että pilarit täyttivät suunnittelijan määrittämän leikkauslujuuden koko pilarin matkalla /7,11/.

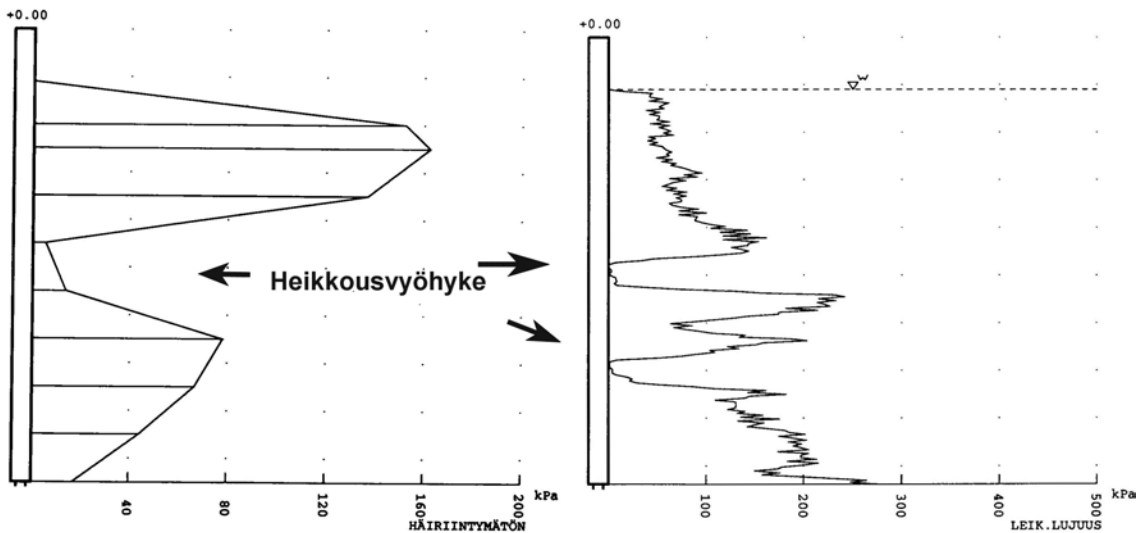
Kuvassa 29 on esitetty tehtyjen laadunvalvontakairausten sijainti kartalla.





Kuva 29 Fallkullan stabiloinneista tehdyt laadunvalvontakairaukset alueittain /7, 11/.

Ensimmäisen vaiheen laadunvalvontakairauksista laatuvaatimuksena oli vähimmäisleikkauslujuus 60 kPa. Tehtyjen kairausten perusteella alueiden leikkauslujuuksien keskiarvot ylittivät laatuvaatimuksen. Useissa ensimmäisen vaiheen tutkituista pilareista havaittiin heikkousvyöhyke 3,5 - 7 m syvyydellä pilarin yläpäästä. Heikkousvyöhykkeen leikkauslujuus oli ympäröivää savea vastaava. Ensimmäisen vaiheen laadunvalvontakairaus tulosten perusteella pyrittiin selvittämään keinoja heikkousvyöhykkeen lujuuden parantamiseksi /11/. Kuvassa 30 on esitetty laadunvalvontakairauksissa esiintyneitä heikkousvyöhykkeitä.

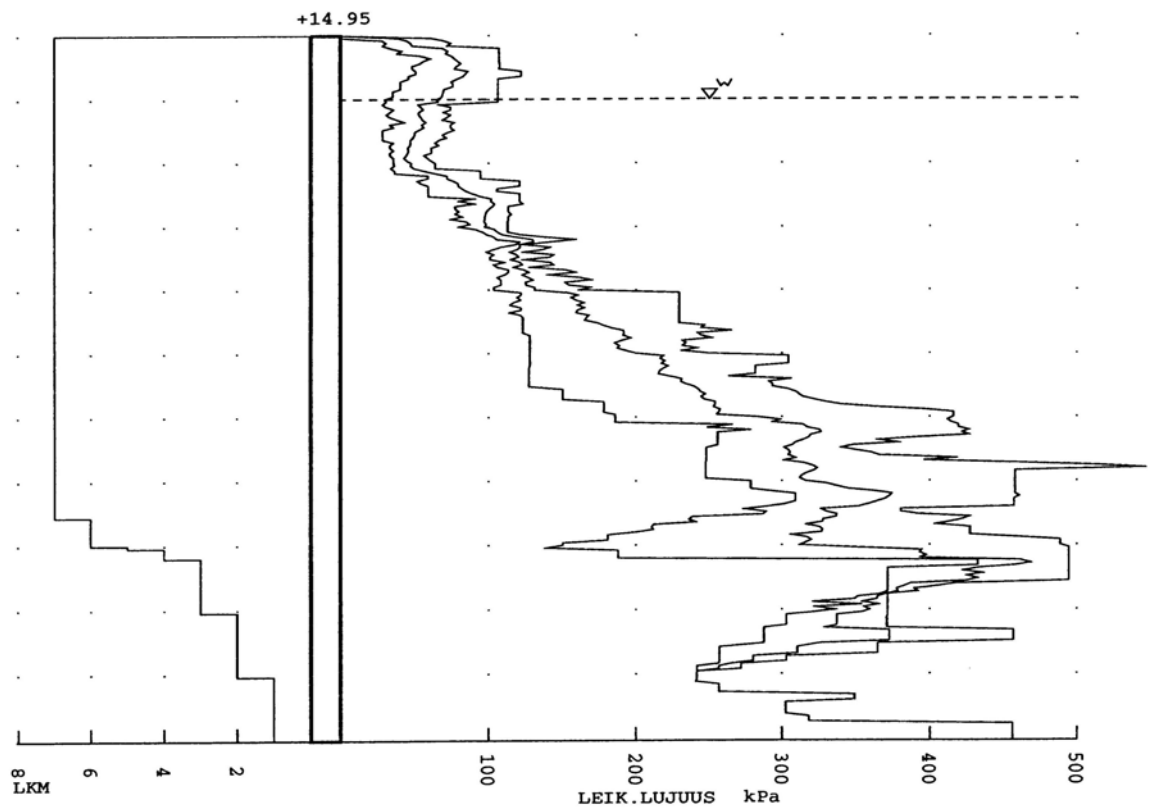
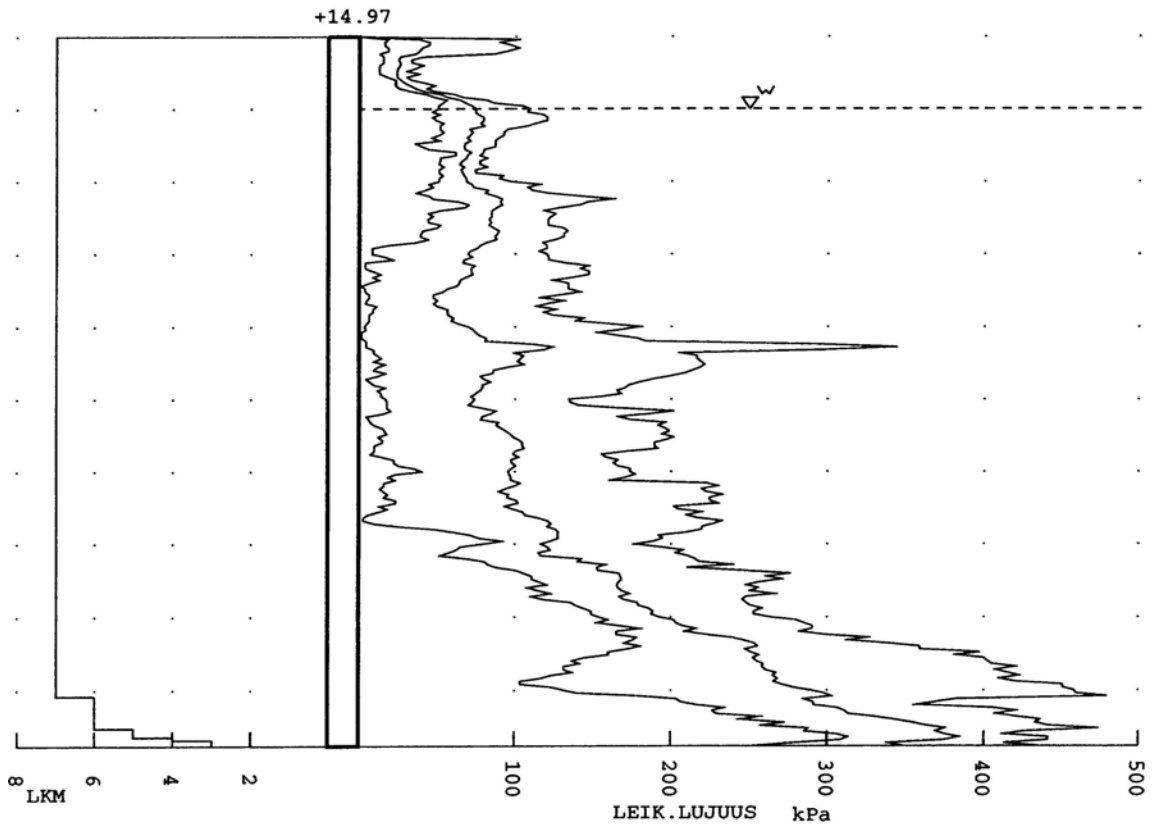


**Kuva 30** Fallkullan 1- vaiheen laadunvalvontakairausten yhteydessä esiintyneitä heikkousvyöhykkeitä /11/.

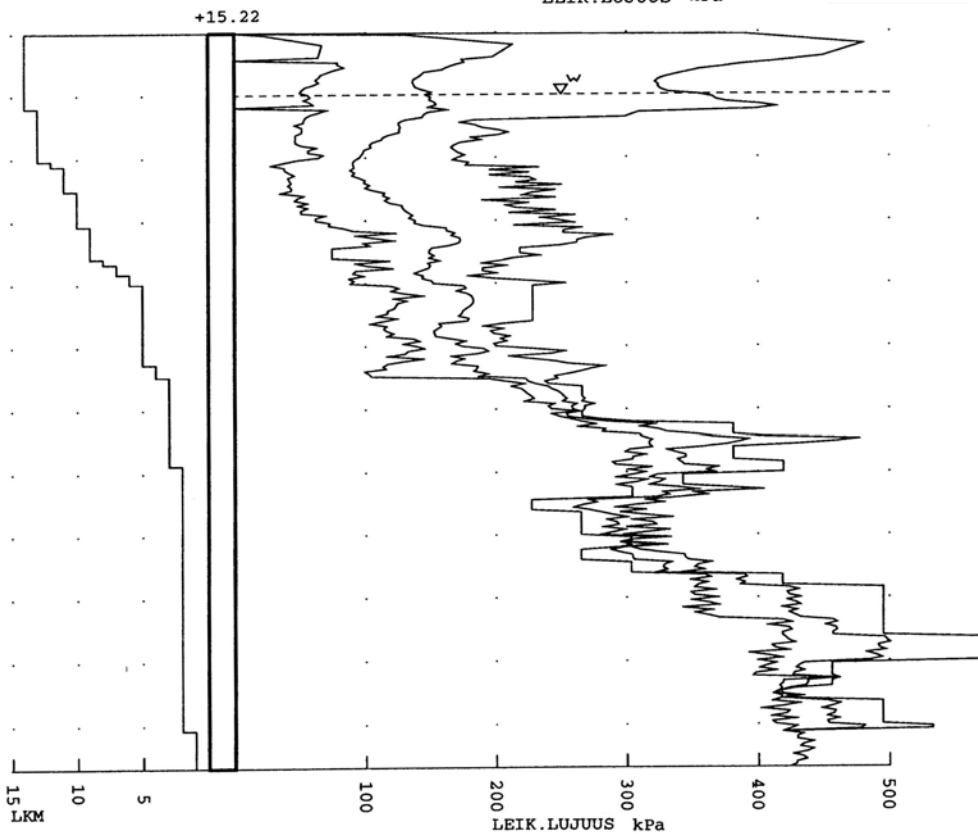
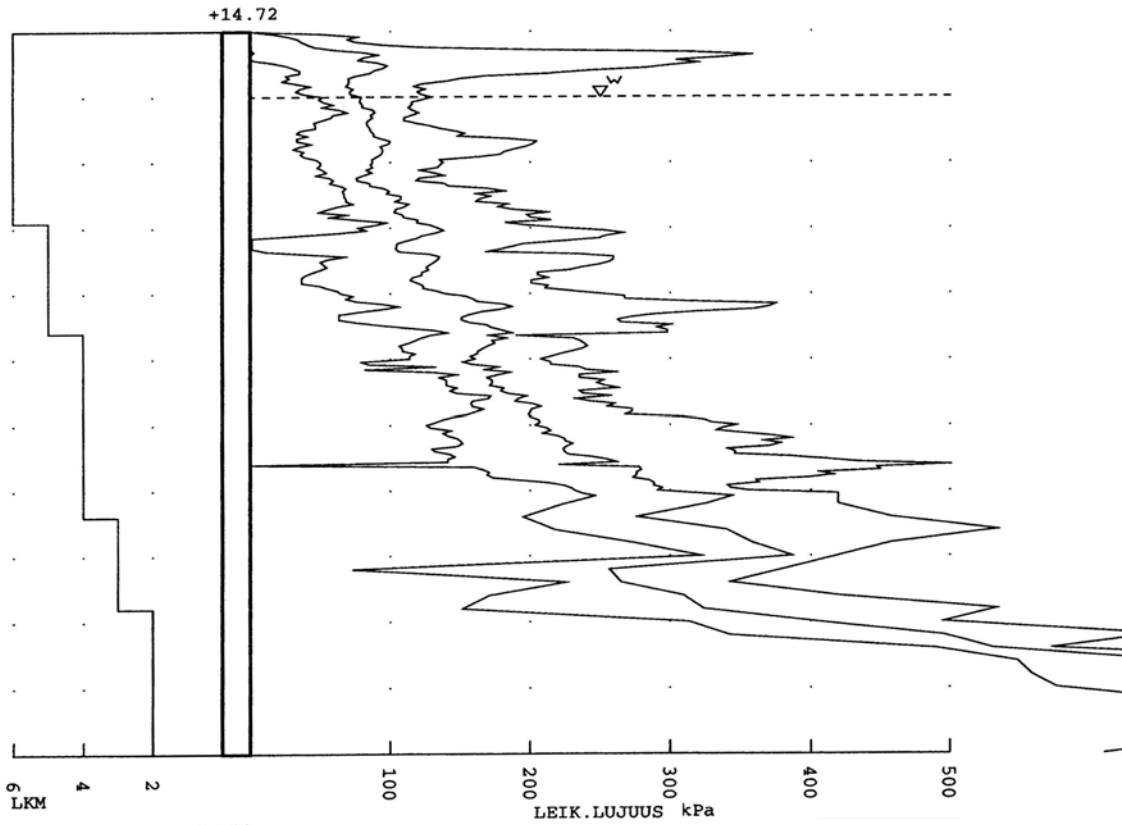
Toisessa vaiheessa pilarin leikkauslujuuden piti olla myös vähintään 60 kPa, mutta laadunvalvontakairausten määrän ollessa rajallinen asetettiin tutkittavien pilarien leikkauslujuusvaatimus 20% mitoitusleikkauslujuutta suuremmaksi 70 kPa:iin. Laadunvalvontakairauksia tehtiin molempien urakoitsijoiden sekä alkuperäisen menetelmän että muutetun menetelmän alueilla. Yhteensä koalueita oli 7. Yhdellä alueista tutkittiin jo 20 päivän ikäisiä pilareita muutetun menetelmän onnistumisen varmistamiseksi /7/.

Kuvissa 31-34 on esitetty Fallkullan toisen vaiheen alkuperäisellä ja muutetulla menetelmällä tehtyjen pilarien laadunvalvontakairausten tuloksia.





Kuvat 31 ja 32 Toisen vaiheen laadunvalvontakairausten tulokset. Kuvaajaan on koottu pilarista tehtyjen kairausten minimi- ja maksimi- ja kairausten leikkauslujuuksien keskiarvo. Pilarit olivat kairattaessa yli 31 vuorokautta vanhoja. Ylhäällä Rakennus Oy Lemminkäisen alkuperäinen menetelmä, alhaalla muutettu menetelmä /7/.



Kuvat 33 ja 34 Toisen vaiheen laadunvalvontakairauksien tulokset. Kuvaajaan on koottu pilarista tehtyjen kairauksen minimi- ja maksimiarvot sekä kairauksen leikkauslujuuksien keskiarvo. Pilarit olivat kairattaessa yli 31 vuorokautta vanhoja. Ylhäällä YIT-yhtymän alkuperäinen menetelmä, alhaalla muutettu menetelmä /7/.

Laadunvalvontakairausten perusteella pilareiden leikkauslujuudet täyttävät pääosin niille asetetut leikkauslujuusvaatimukset. Pilarien yläosassa, 0- 4 m syvyydellä havaittiin keskiarvoissa joitakin leikkauslujuusvaatimuksen alituksia. Kuvissa 31 ja 32 on nähtävissä pohjaveden pinnan läheisyydessä leikkauslujuudessa muuta pilaria heikompi vyöhyke /7/.

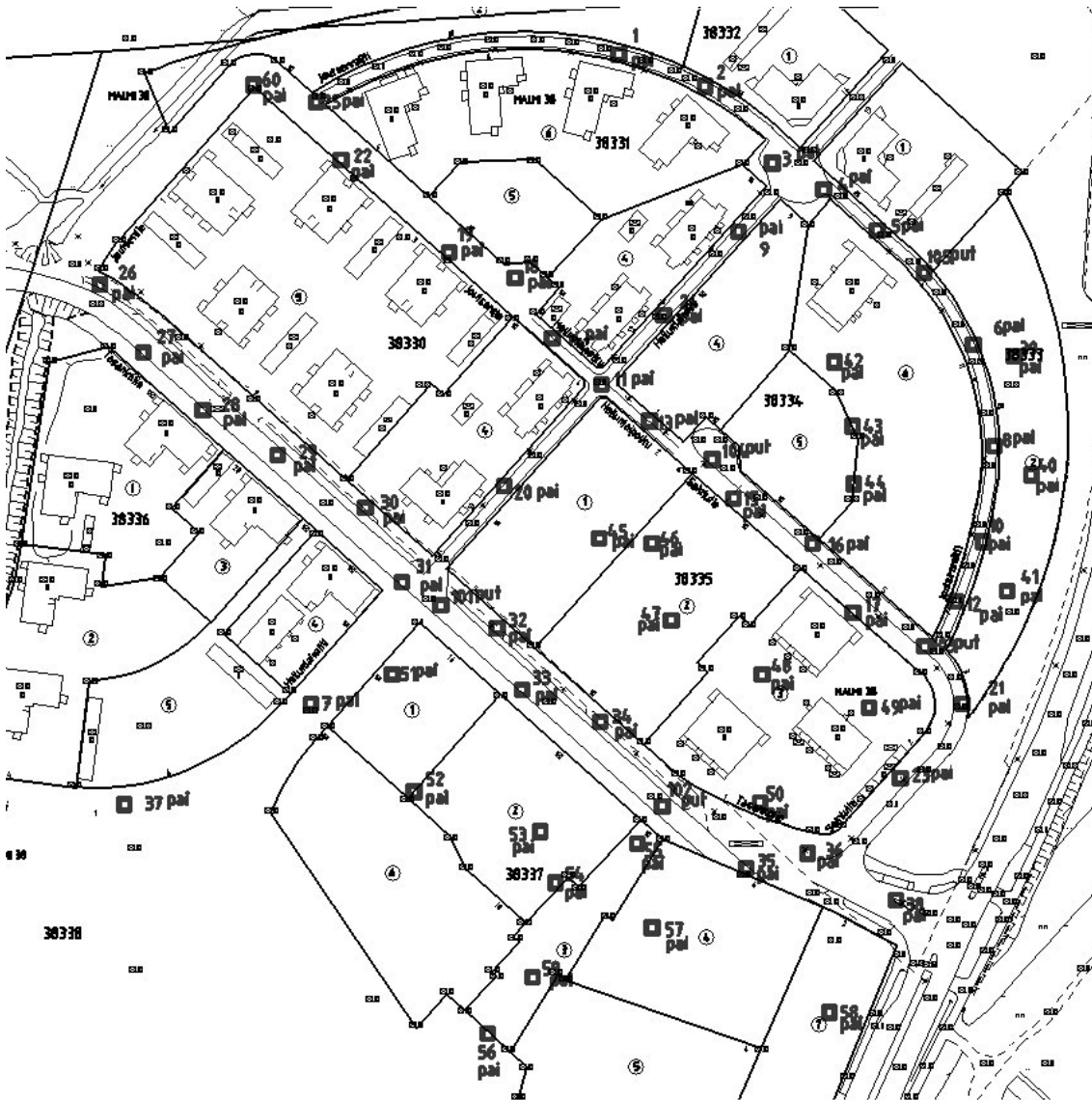
Pilareiden kairauksissa tapahtui useita kairakärjen ulos työntymisiä, vaikka kairastarkkuuteen kiinnitettiin erityistä huomioita. Ulostulojen lukumäärästä päätellen, on mahdollista, että pilareita on tehty vinoon. Vinossa pilarissa syvälle ulottuva kairaus ei onnistu. Pilarin vinouden toteaminen varmuudella jälkikäteen on kuitenkin laajassa mittakaavassa erittäin vaikeaa /7/.

Sideaineen lisäys ylimmän viiden metrin matkalla on parantanut pilareiden keskiarvoista leikkauslujuutta, erityisesti ensimmäisen metrin matkalla on tapahtunut huomattavaa parantumista. Lemminkäisen alkuperäisen kattilaterällä tehtyjen (kuva 31) sekä muutettujen, kuusiterällä (kuva 32) tehtyjen pilareiden välillä on havaittavissa, että muutetulla menetelmällä tehtyjen pilareiden alaosa on kairausten perusteella lujempi, vaikka sideainetta on käytetty vähemmän. Kuusiterällä tehtyjen pilareiden lujuuden hajonta näyttää olevan pienempää kuin hajonta alkuperäisellä menetelmällä tehtyjen pilareiden osalla. Molemmilla menetelmillä on havaittavissa ylimmän neljän metrin matkalla paikallisia leikkauslujuuden alituksia /12/.

YIT:n muutetun menetelmän (kuva 34) ylimmän neljän metrin leikkauslujuudet ovat tutkimusten perusteella parempia kuin alkuperäisellä menetelmällä (kuva 33) tehdyissä.

### 3.2.6 Pitkäaikaiset seurantatutkimukset

Painumamittauspisteverkosto on pyritty sijoittamaan mahdollisimman kattavasti eri sekoitusmenetelmillä sekä sideainejakaumilla tehdyille stabiloiduille alueille. Verkoston pisteet on sijoitettu piha- ja katualueilla kohtiin, joiden uskotaan säilyvän koko mittausjakson ajan. Mittauspisteiden pysyvyyden varmistamiseksi on tieto mittauspisteiden sijainnista liitetty kunkin taloyhtiön huoltokirjaan /21/. Mittauspisteiden suunnitellut sijainnit on esitetty kuvassa 35.



**Kuva 35 Falkullan stabiloiduille alueille sijoitettava painumamittausverkosto.**

Taulukkoon 2 on koottu jälkiseurannalle suunniteltu mittausohjelma. Kokonaisuutena havaintoajaksi on otettu 10 vuotta. Mittauskentän asentamisen jälkeen mittaus-tiheys on yksi kuukausi harventuen tästä taulukon mukaisesti yhteen kertaan vuodessa. Mittausverkon ja havainnoinnin avulla pyritään selvittämään alueen pitkäaikaisia muodonmuutoksia käyttökuormien vaikutuksesta.

**Taulukko 1 Mittausohjelma Falkullan stabiloidun alueen jälkiseurannalle.**

mittaus-tiheys	1 kk välein	2 kk välein	4 kk välein	6 kk välein	12 kk välein
kesto	½ vuotta	½ vuotta	1 vuosi	2 vuotta	6 vuotta
mittausaika kulunut yht.	½ vuotta	1 vuosi	2 vuotta	4 vuotta	10 vuotta -

#### 4. PAINUMIEN LASKENTA

Stabiloitujen alueiden painumien arvioinnissa on käytetty Espoon kaupungin kalkkipilariohjeeseen 2000 perustuvaa KPO-painuma-ohjelmaa. Ohjelma käyttää painuman nopeuden arvioinnissa liitteessä F esitettyä kaavaa 26. Painuma lasketaan tangenttimoduulimenetelmällä /16/.

Laskelmissa uusien täyttöjen aiheuttamat kuormitusmuutokset on huomioitu pintakuormana. Pohjaveden mahdollinen aleneminen esirakentamisen seurauksena on arvioitu Fallkullan alueella 0,2 metriksi /10/. Talin alueella pohjaveden korkeus seurailee merivedenpinnan korkeutta.

Molemmilla alueilla stabiloidun saven painumat on laskettu suunnitelmien mukaisten täyttökuormien perusteella käyttäen pilarin arvoina laadunvalvontakairauksista saatuja leikkauslujuuksia. Taulukkoihin 2 ja 3 on koottu laskennassa käytetyt parametrit. Tulostus laskennasta on esitetty liitteessä C. Liitteen laskennassa esiintyvä termi POP on konsolidaatiojännityksen ja vallitsevan jännityksen välinen erotus.

Talin painumalaskennassa käytetyt parametrit /14/.

**Taulukko 2 Talin painumalaskennassa käytetyt parametrit /14/**

Maakerros	kerrospaksuus	$\gamma$	$\sigma_c - \sigma_0$	m	$\beta$	$m_2$	$\beta_2$	$\tau_p$	$E_{pil}$
Täyte	3	19	20	1000	0,5	1000	1	60	3000
Savi	1	16	20	6,2	-0,446	10,8	1	60	3000
Savi	1,5	16	8,6	15,4	-0,241	17,4	1	100	5000
Savi	1	16	8,6	7,9	0,076	15	1	100	5000
Savi	5	17,8	21,3	12,3	0,001	22,4	1	120	6000

**Taulukko 3 Fallkullan painumalaskennassa käytetyt parametrit /14/.**

Maakerros	kerrospaksuus	$\gamma$	$\sigma_c - \sigma_0$	m	$\beta$	$m_2$	$\beta_2$	$\tau_p$	$E_{pil}$
Savi	3,4	14	15	3,7	0	5,3	1	90	9000
Savi	2,5	14	6,4	8,8	-0,738	8,2	1	150	15000
Savi	5,5	17	20,5	5,4	-0,954	16,1	1	300	30000

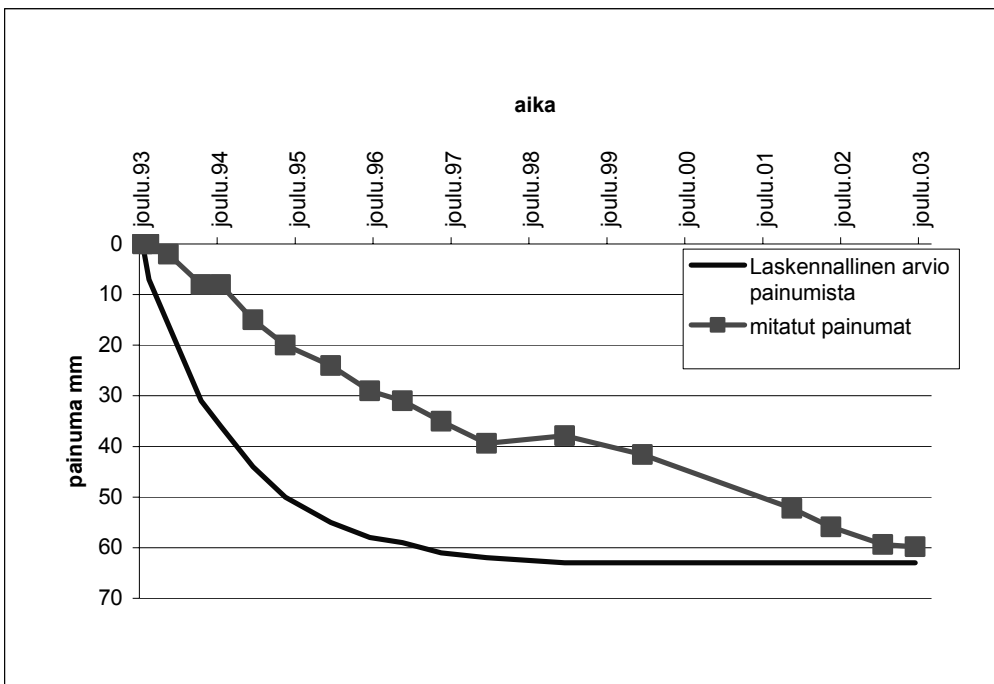
Alueen saven painumaa tarkastellaan vesipitoisuuden muutoksen avulla. Vesipitoisuuden muutoksen avulla saadaan saven kokoonpuristuma koko esirakentamisen jälkeiseltä ajalta. Käytetyt vesipitoisuusarvot on saatu alueelta ennen esirakentamistyötä tehdystä näytesarjasta sekä tämän työn yhteydessä tehtyä näytesarjasta.

## 5. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 5.1 Tali, Munkkivuoren laajennusalue

#### 5.1.1 Painumat

Talissa tarkasteltavan stabiloidun alueen mittauspisteen painumaksi saatiin laskennallisesti KPO- painumaohjelmalla 63 mm. Tässä laskennassa pilarin muodonmuutosmoduulin, Epil, arvioitiin olevan 50-kertainen pilarin leikkauslujuuteen,  $\tau_{pil}$ , nähden. Käytetty arvio perustuu kokemusperäisesti kalkkipilareista saatuun tietoon /42/. Laskennassa pilarin ja maan vedenläpäisevyyksien suhteena on käytetty arvoa 40. Arvo pyrittiin valitsemaan KPO- painumalaskentaohjelman suosituksen mukaisesti, hyödyntäen Bromssin ja Bomanin tekemää arviota sammuttamattoman kalkin aiheuttamasta vedenläpäisevyyden kasvusta savessa. Sammuttamattoman kalkin on arvioitu lisäävän saven vedenläpäisevyyttä 100- 1000-kertaiseksi /3/. Tehty laskenta on esitetty liitteessä C. Kuvassa 36 on esitetty laskennallisesti saatu arvio pisteen painumasta sekä painumamittauspisteestä mitatut havainnot.



**Kuva 36** Talissa tarkastellun painumamittauspisteen havainnoidut sekä laskennallisesti saadut painumat.

Tarkasteltavan pisteen mitattu painuma on laskentahetkellä noin 60 mm. Laskennallisesti arvioituna painumaan kuluva aika on lyhyempi. Mittaushavaintojen perusteella mittauspisteen painumanopeus ei osoita merkkejä hidastumisesta ja lopullinen painuma tulee olemaan laskennallisesti saatua painumaa suurempi. Lopullisen painuman suuruutta on arvioitu mittaushavaintoihin sovitetulla painumaennusteella. Ennusteen mukaan tarkasteltavan pisteen kokonaispainuma tulee olemaan noin 100 mm. Ennuste on tehty 30 vuoden ajanjaksolle. Ennusteen mukaan vuoden 2033 lopussa painumaa on vielä jäljellä 16 mm. Painuman

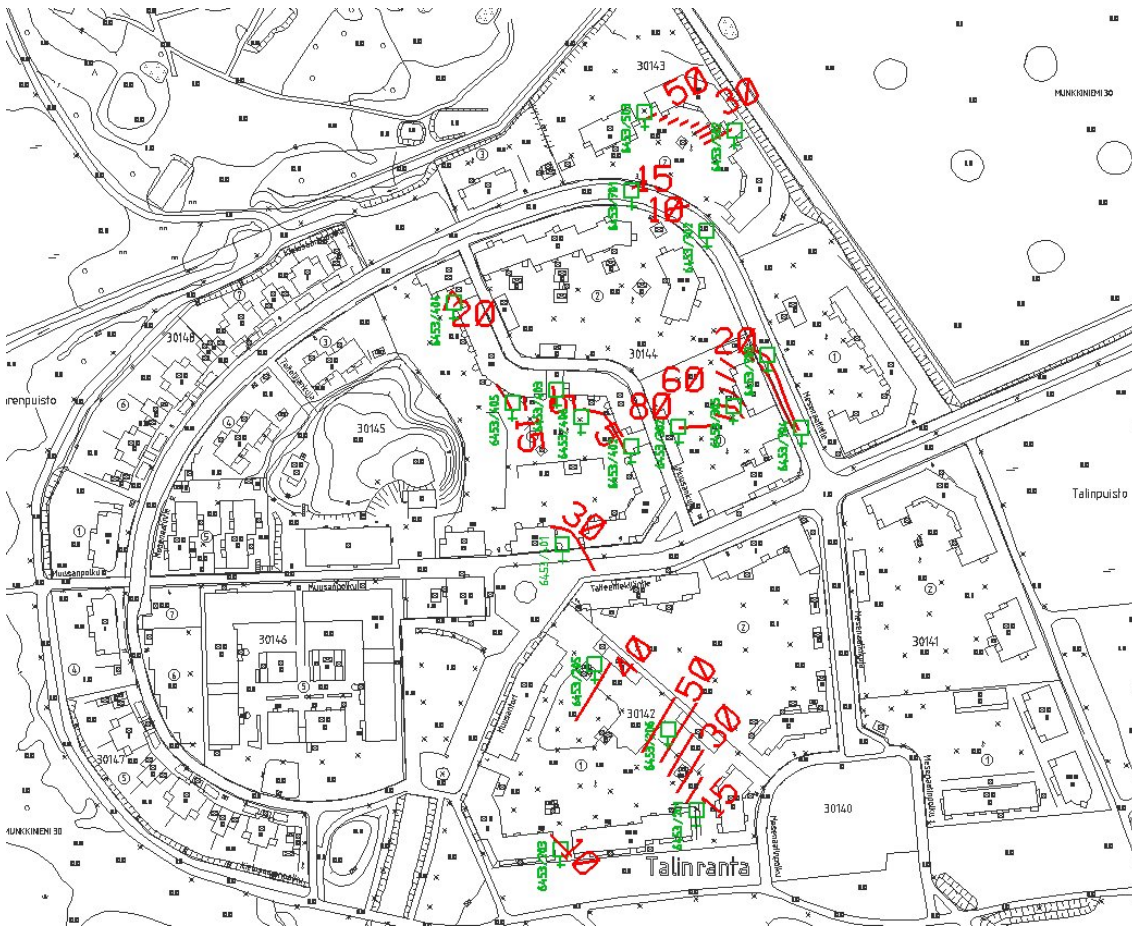
ennustamisessa on käytetty Kondnerin hyperbeliä ja siitä Riccatin luomaa muunnosta /21/. Kuvassa 37 on esitetty mittaushavaintoihin sovitettu 30 vuoden painumaennuste.



**Kuva 37 Piste 6453/ 305 painumahavaintomittauksiin sovitettu 30 vuoden painumaennuste. Painumaennusteeseen on käytetty ympyröityjä havaintoja. Lopulliseksi painumaksi painumaennusteella on saatu 101 mm. Vuoden 2033 lopussa on painumasta vielä tapahtumatta noin 16 mm.**

Mittaushavainnoissa ei ole mukana mittauspisteen kohdalla tapahtunutta välitöntä painumaa, koska painumamittaus on aloitettu vasta rakentamistyön rauhoituttua vuonna 1993. Talin alue on painunut 1950-1960-luvuilla tehdyn täytön vaikutuksesta jo ennen esirakentamista.

Kuvaan 38 on koottu Talissa havainnoidut syvästabiloitujen alueiden painumat. Kymmenen vuoden seurannan jälkeen alueen painumat ovat asetettuja painumakriteerejä pienempiä. Kuvassa 37 on pisteiden 6453/ 203, 205, 206 ja 401 osalta käytetty korjattuja painumahavaintoja, koska mittauspisteinä käytettyjä kaivonkansia on alueen käyttöhistorian aikana korotettu. Painumamittaushavainnoissa korjaus on tehty vähentämällä mitatusta havaintotasosta arvioitu pisteen korotus. Painuman mitoitussarvo piha-alueilla rakentamisen jälkeisinä 50 vuotena on 300 mm ja tonttviemärien kohdalla 200 mm.



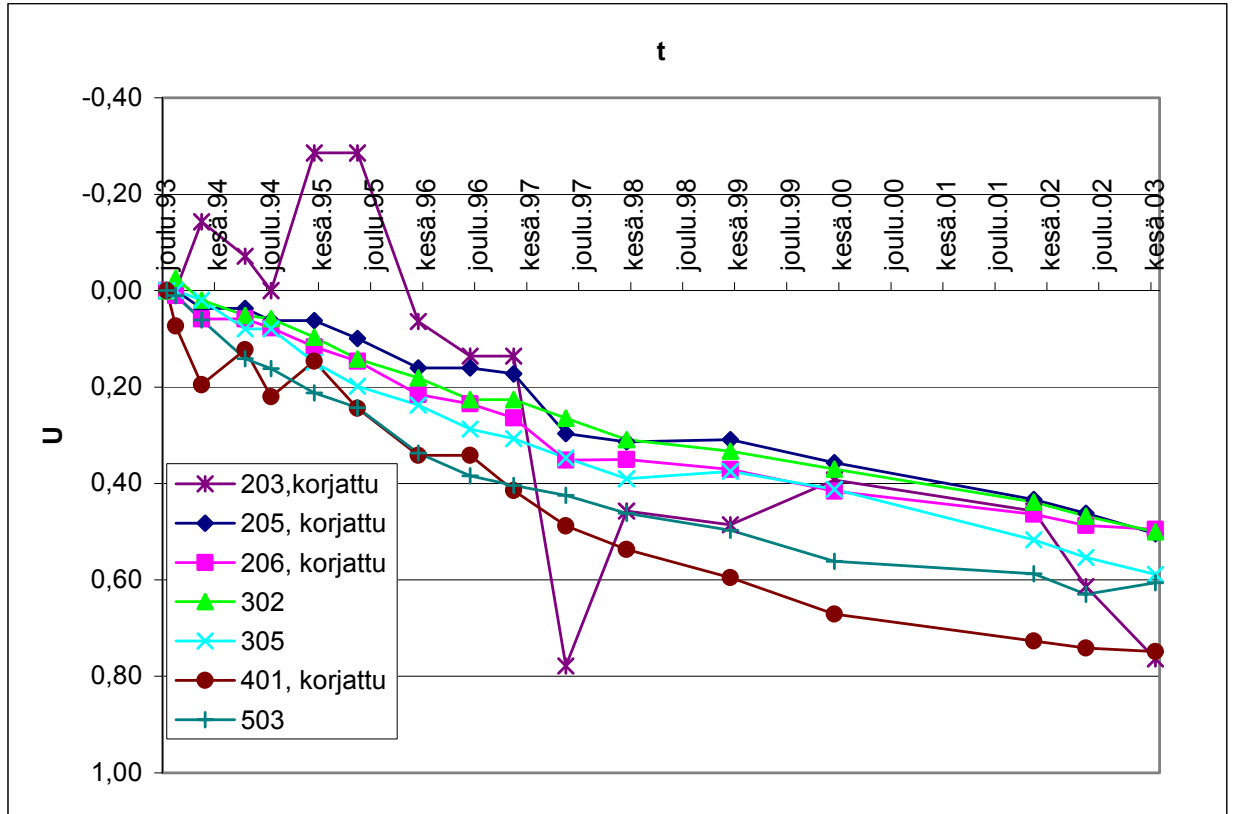
**Kuva 38 Talin alueella stabiloimalla esirakennettujen alueiden pisteiden painumat (mm). Kuvan tarkasteluun on otettu vain aktiiviset stabiloidulla alueella olevat mittauspisteet. Pisteiden 6453/ 201, 203, 205, 206 ja 401 osalta painumakuvaajassa on esitetty korjatut painumat /14/.**

### 5.1.2 Pilarien ja maan vedenläpäisevyyksien suhde

Havaittujen painumien perusteella arvioitiin tarkemmin alueen pilareiden ja maan välistä vedenläpäisevyyksierojen suhdetta.

Kuvaan 39 on koottu arvioidun loppupainuman avulla laskettu konsolidaatioaste  $U$  sekä painumaan kulunut aika. Eri puolilla havaintomittauskenttää olevien mittauspisteiden konsolidaatio on hyvin saman aikaista ja käyrien kulmakertoimet ovat lähes yhtäsuuria.





Kuva 39 Talin alueen painumat. Kuvaajassa on esitetty arvioidun loppupainuman perusteella laskettu konsolidaatioaste sekä konsolidaatioon kulunut aika.

Pilarin ja luonnonmaan välisen vedenläpäisevyyksertoimien suhteen arvioimista varten ratkaistiin liitteen F kaavasta 26 luonnollinen logaritmi painuman osittaisderivaatan ja ajan osittaisderivaatan suhteesta. Laskennan välivaiheet on esitetty kaavoissa 3, 4, 5 ja 6.

$$\frac{s}{s_p} = U = 1 - e^{-kt} \tag{3}$$

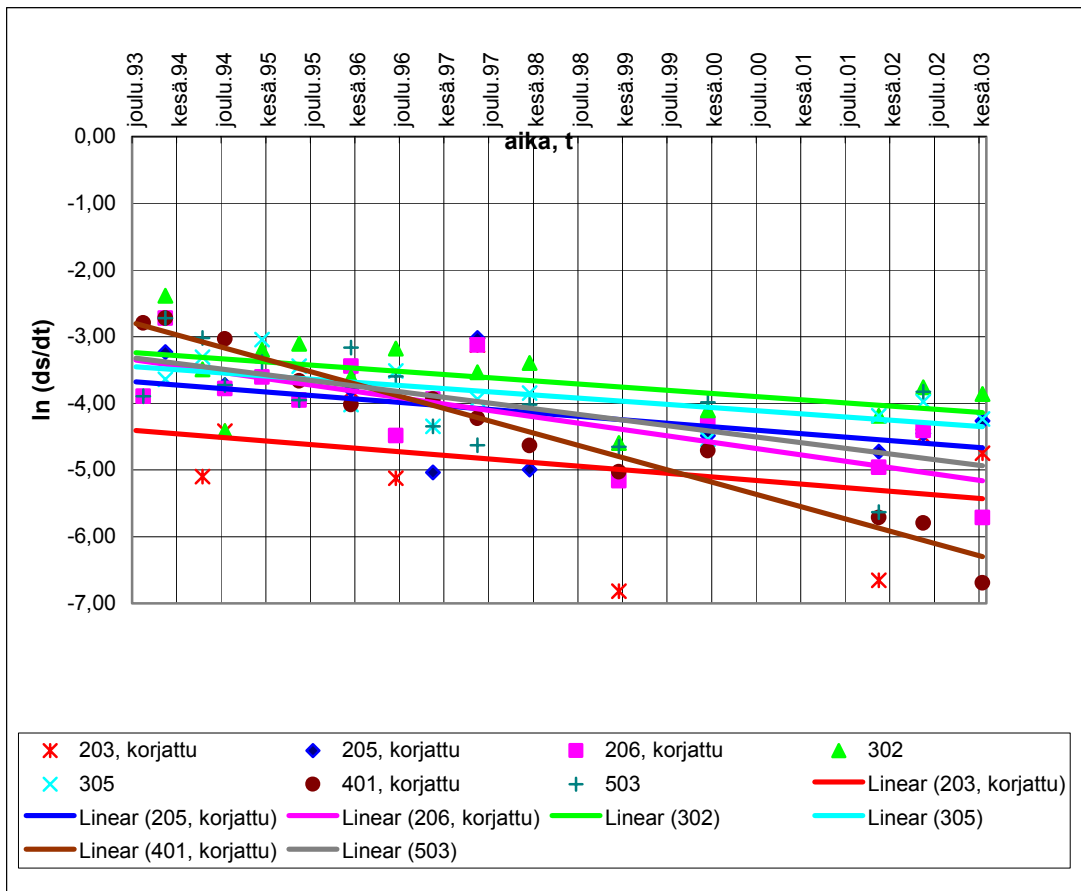
$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{s_p} \frac{\partial s}{\partial t} = k e^{-kt} \tag{4}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = k s_p e^{-kt} \tag{5}$$

$$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = \ln(k s_p) - kt \tag{6}$$

- joissa s on havaittu painuma
- s<sub>p</sub> ennustettu loppupainuma
- U konsolidaatioaste
- k termi  $\frac{2c_h}{R^2 f(n)}$  liitteen F kaavasta 26
- t aika

Kuvassa 40 on painumahavainnoista laskettu luonnollinen logaritmi painuman muutoksen ja ajan muutoksen välisestä suhteesta. Havaintoihin sovitetut suorat toteuttavat kaavan 6 mukaisen yhtälön. Kaavassa 6 termi  $-k$  kuvaa kuvasta 39 saatavaa suoran kulmakerrointa.



**Kuva 40 Talin alueen painumat.** Kuvaajaan on koottu painuman aikaderivaatan luonnollisen logaritmin ja kuluneen ajan välinen suhde. Suoran kulmakerroin on  $k$ .  $K$ -termi kuvaa kaavan 17 eksponentin kerrointa.

Suorien yhtälöt on esitetty liitteen D taulukossa.

Sijoittamalla kuvan 40 suorien kulmakertoimet liitteen F kaavan 26 eksponentin kertoimeksi  $k$ , voidaan yhtälöstä 7 ratkaista  $f(n)$ .

$$k = \frac{2c_h}{R^2 f(n)} \quad (7)$$

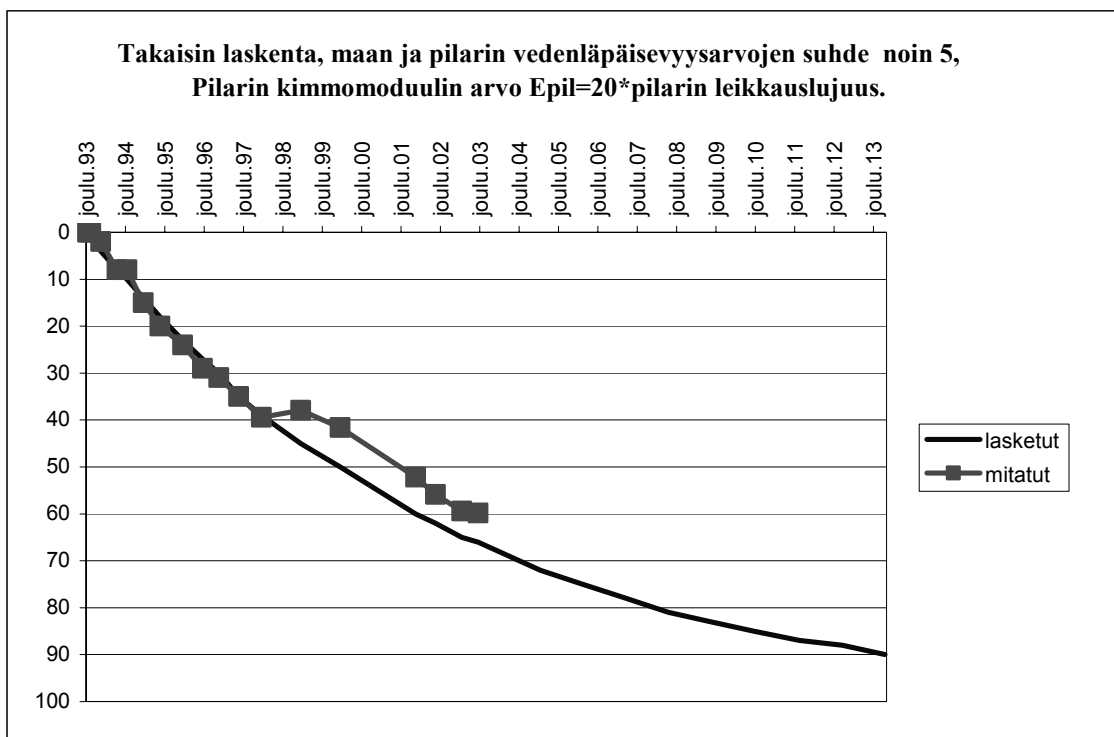
Saatu arvo on sijoitettu liitteen F kaavaan 27, jolloin voidaan arvioida maan ja pilarin vedenläpäisevyyksien suhdetta. Käytetty menetelmä on karkea, mutta suuntaa-antava. Talin alueen pilarin ja maan vedenläpäisevyyksikertoimien suhteeksi kaksisuuntaisessa konsolidaatiossa saadaan taulukon 4 mukaisesti.

**Taulukko 4 Talin painumista lasketut vedenläpäisevyyškertoimien väliset suhteet**

Piste	$k_{pil} = x \cdot k_{maa}$ x
203	0,344
205	4,131
206	7,275
302	1,152
305	1,999
401	3,032
503	2,426

Lasketut vedenläpäisevyyškertoimien väliset suhteet ovat hyvin pieniä verrattuna esimerkiksi Bromssin ja Bomanin esittämään arvioon 100- 1000- kertaisesta suhteesta. /3/.

KPO- painumalaskentaohjelmaa käyttäen laskettiin takaisinpäin mitatuista havainnoista arvio vedenläpäisevyyškertoimien suhteelle sekä pilarin muodonmuutosmoduulille. Takaisinlaskennalla vedenläpäisevyyškertoimien suhteeksi saatiin noin 5 ja pilarin muodonmuutosmoduuliksi  $E_{pil}$  noin 20 kertaa pilarin leikkauslujuus,  $\tau_{pil}$ . Kuvassa 41 on esitetty takaisin laskennalla saatu vastaavuus laskettujen ja mitattujen painumien välille.

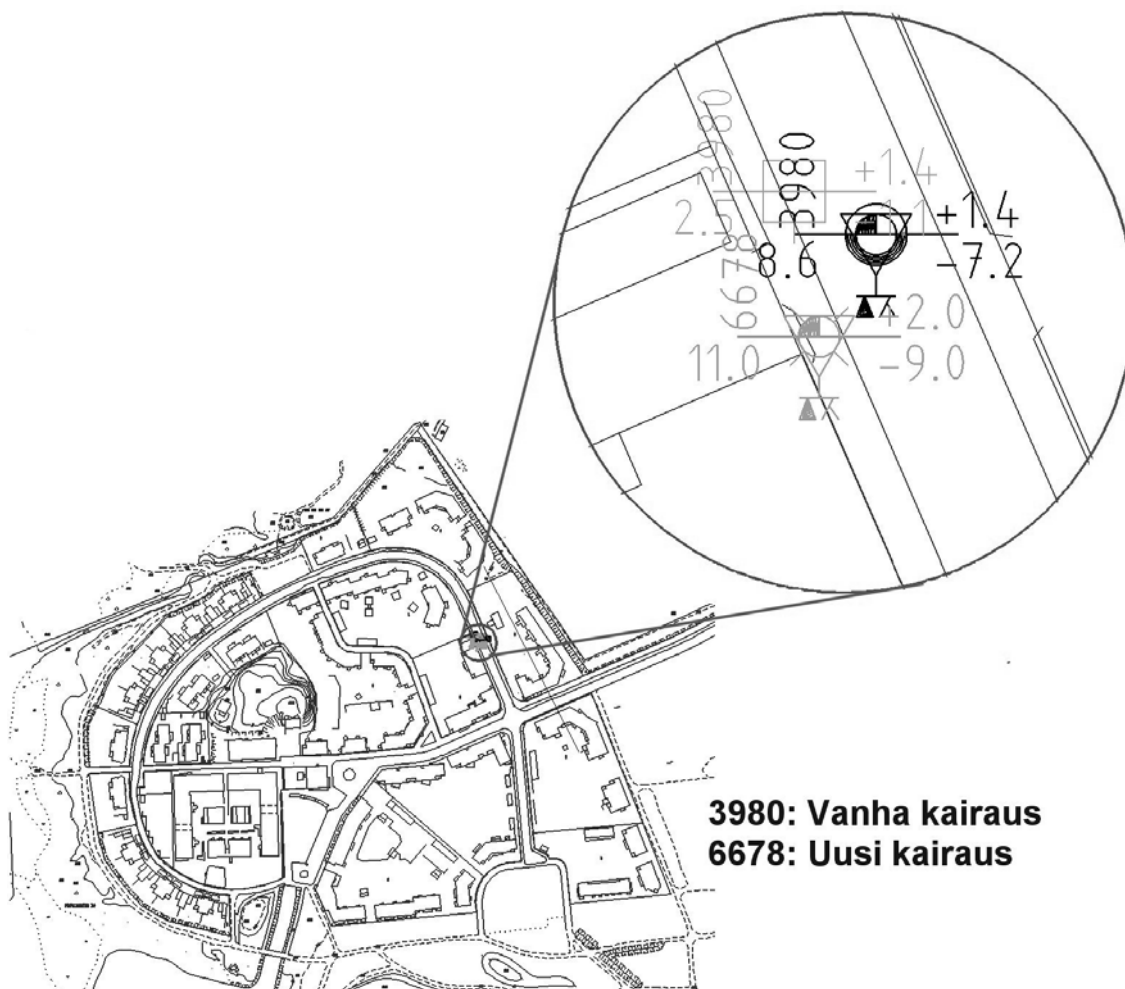


**Kuva 41 Takaisin laskennalla saatu vastaavuus mitattujen ja laskennallisesti saatujen painumien välille.**

Vedenläpäisevyyškertoimien suuruusluokan varmentamiseksi tehtiin vertaileva laskelma Itäkeskuksessa sijaitsevan syvästabiloinnin varaan perustetun päiväkodin painumahavainnoista. Itäkeskuksessa painumia on havaittu vuodesta 1978 lähtien. Havainnoituista painumista on vastaavalla tavalla Talin kanssa laskettu vedenläpäisevyyškertoimien suhteeksi  $k_{pil} = 4 \dots 6,5 k_{maa}$ . Myös tässä kohteessa pilareiden ja maan vedenläpäisevyyksien suhteet ovat pieniä.

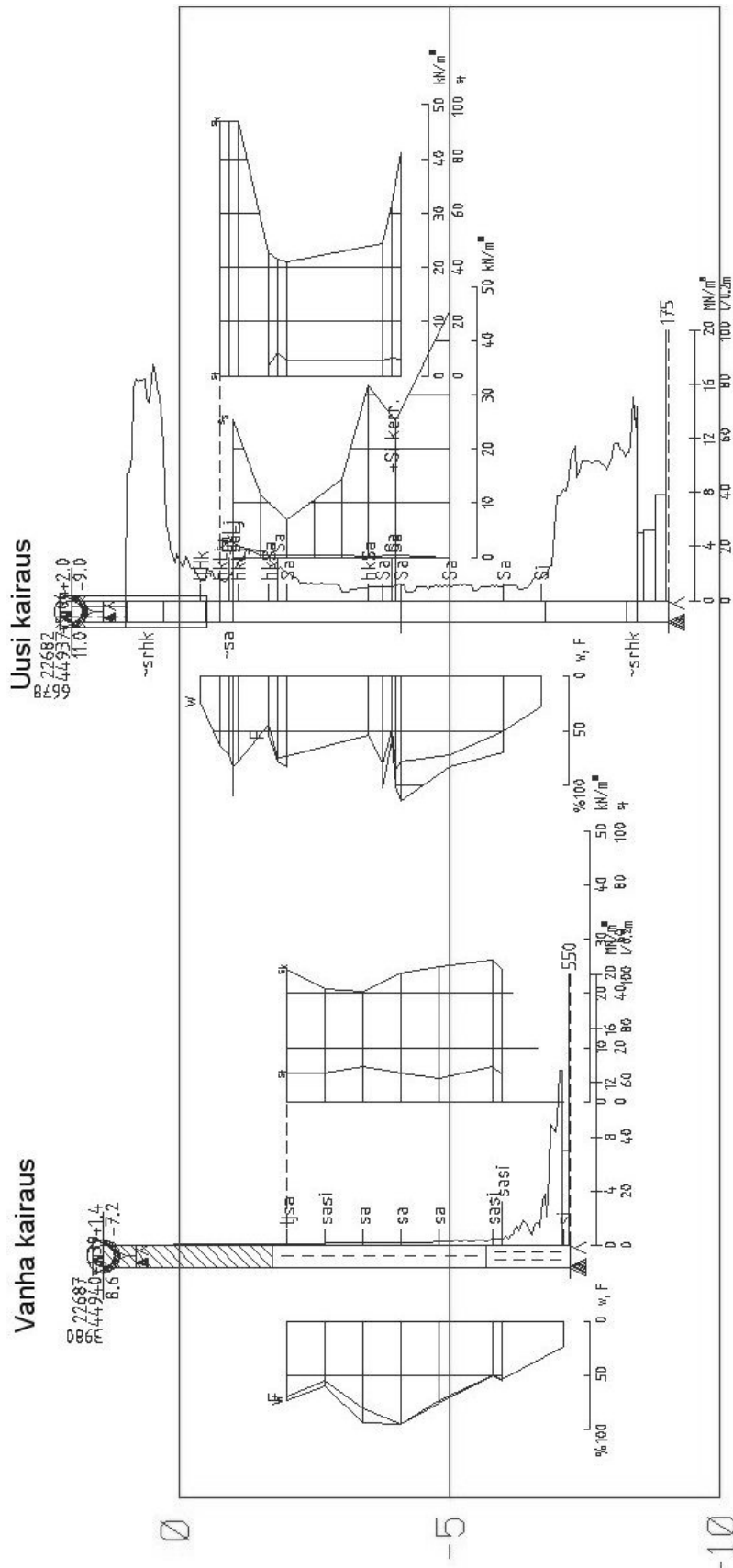
### 5.1.3 Pilareiden välinen savi

Talista tehtiin uusi sarja kairauksia pilareiden välisen saven ominaisuuksien tutkimiseksi. Kairaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman lähelle vanhaa esirakentamista edeltänyttä kairausta. Kairauspisteiden keskinäinen sijainti on esitetty kuvassa 42.



**Kuva 42 Uuden ja vanhan kairauksen sijainti Talissa.**

Vanhasta kairauspisteestä oli tehty puristinheijarikairaus sekä otettu häiriintymättömiä näytteitä. Otetusta näytesarjasta oli tehty ödometrikokeita, leikkauslujuuskokeita sekä vesipitoisuus-profiili. Uudesta pisteestä tehtiin vastaavat kairaukset ja kokeet sekä siipikairaus. Lisäksi määritettiin näytteestä pH. PH-arvon avulla pyrittiin varmistamaan, ettei näytesarja sisältänyt kalkkia. Kuvassa 43 on esitetty sekä vanhan että uuden kairauksen kairausdiagrammit.



Kuva 43 Talin alueelta tehdyt kairaukset. Vanha kairaus on tehty ennen esirakentamistyön aloittamista ja uusi kairaus tehtiin kymmenen vuoden seuranta-ajan jälkeen.

Tehdyistä kairauksista voidaan päätellä seuraavaa:

Ennen stabilointia tehty kairaus:

- Saven kairausvastus on ollut alle  $0,5 \text{ MN/m}^2$ .
- Laboratoriossa määritetty leikkauslujuus on vaihdellut 20 ja  $25 \text{ kN/m}^2$  välillä.
- Saven vesipitoisuus on vaihdellut 50 % ja 95% välillä kuivapainosta mitattuna.

Uusi kairaus:

- Kairausvastus on kasvanut alkuperäiseen kairausvastukseen nähden. Kairausvastus on nyt noin  $1 \text{ MN/m}^2$ .
- Siipikairalla määritetyssä leikkauslujuudessa on noin tasolla -2 heikompi vyöhyke, jossa leikkauslujuus on noin  $8 \text{ kN/m}^2$ , muulla osalla leikkauslujuus vaihtelee noin  $15-45 \text{ kN/m}^2$  välillä.
- Laboratoriossa määritetyssä leikkauslujuudessa saven yläosan leikkauslujuus on noin  $45 \text{ kN/m}^2$ . Noin tasolta -2 alkaen saven leikkauslujuudet ovat vanhan kairauksen leikkauslujuuksien kanssa yhteneviä. Noin tasolla -4 on leikkauslujuus kasvanut hieman vanhaan kairaukseen verrattuna. Tason -4 leikkauslujuuden kasvu voi olla mittaushajonnan seurausta.
- Vesipitoisuus on hieman pienentynyt. Uusi vesipitoisuus vaihtelee 50-75% välillä. Noin tasolla -4 on vyöhyke, jossa vesipitoisuus on noin 110%.
- Täytteen paksuus vaihtelee kairausten perusteella lyhyellä matkalla.

Uuden kairauksen yhteydessä otetuista häiriintymättömistä näytteistä tehtiin laboratoriossa ödometrikokeita. Ödometrikokeita oli kuusi kappaletta. Koetyyppinä käytettiin jatkuvapuristeista CRS ( Constant Rate of Strain) –koetta Koetyyppi valittiin vastaamaan vanhan kairauksen yhteydessä tehtyjä ödometrikokeita. Eri aikoina tehdyt ödometrikokeet poikkeavat toisistaan kokeen nopeuden suhteen. Uuden kokeen nopeus oli  $0,0015 \text{ mm/min}$ , vanhat kokeet oli tehty nopeammin. Vanhan kokeen nopeus oli  $0,004 \text{ mm/min}$  Pienemmällä nopeudella tehty koe antaa luotettavamman kuvan saven konsolidaatiojännityksestä.

Häiriintymättömät näytteet otettiin liikennöidyltä alueelta, jolloin liikenteen aiheuttama värinä on voinut aiheuttaa häiriötä näytteeseen sen oton aikana. Otetut näytteet olivat silmämääräisesti kelvollisia. Yksi tehdyistä kokeista epäonnistui mahdollisesti näytteessä olleen reiän vuoksi. Onnistuneiden ödometrikokeiden tulokset on esitetty liitteessä E. Liitteen E taulukkoon on koottu ennen esirakentamistyötä tehtyjen ödometrikokeiden sekä tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen ödometrikokeiden tulokset.

Saven moduuliluvun, jännityseksponentin ja sekundäärialueen moduuliluvun arvot ovat kasvaneet tasoilla  $-2$  ja noin  $-4$  vanhoihin ödometrikokeisiin verrattuna. Noin tasoilla  $-3,72$  ja  $-3,89$  ei uudesta ödometrinäytteestä pystytty määrittämään kaikkia parametreja, koska näyte todettiin häiriintyneeksi kokeen jälkeen.

Otetusta näytesarjasta mitattiin pH kahdelta syvyydeltä. PH- arvoa tarkastelemalla haluttiin varmistaa kairauksen tapahtuneen pilareiden välisestä savesta. Päätely johdettiin saven luonnontilaisen happamuuden ja mitatun pH-arvon vertailuna. Luonnontilainen savi on lähes neutraalia ja kalkki hyvin emäksistä. Kalkin pH on noin 12. Tasolla noin  $-1,6$  maan pH arvon on noin 10 ja tasolla noin  $-3,5$  pH on 8,7. Ylemmän pH mittauksen savessa voi olla hieman kalkkia nostamassa pH-arvoa, alemman näytteen savi on melko neutraalia, joten kairauksen voidaan päätellä osuneen pilarien väliseen saveen.

Saven vesipitoisuuden muutoksen perusteella arvioitiin savikerroksen painuman suuruutta. Painumaksi saatiin noin 110 mm. Saatu tulos sisältää painuman, joka on tapahtunut alueella ennen painumamittauspisteiden asentamista. Mittauspisteestä havaittu painuma on noin 60 mm, joten alue on painunut 40...50 mm ennen mittauspisteiden asentamista. Painumaennusteeseen sovitettu arvio ennen mittauspisteiden asentamista tapahtuneesta painumasta antaa samaa suuruusluokkaa vesipitoisuuden muutoksen avulla saadun painuman kanssa.

Vesipitoisuustarkastelun perusteella alueen painumassa ei vielä ole hiipuman aiheuttamaa osuutta. Hiipumassa kerroksen vesipitoisuus ei muutu, vaikka painumaa tapahtuu.

Saven vesipitoisuuden perusteella saadun painuman avulla on liitteen F kaavalla 19 laskettu arvio pilarin muodonmuutosmoduulille. Muodonmuutosmoduuliksi saadaan noin 16200 kPa. Saatu arvo on erisuuri takaisin laskennasta saadun tuloksen kanssa.

#### 5.1.4 Johtopäätökset

Talin alue on painunut jo ennen mittauspisteiden asentamista. Vesipitoisuuden muutoksen perusteella arvioitu painuma ennen mittauspisteiden asentamista on ollut noin 40...50 mm.

Vesipitoisuuden muutoksen perusteella alueen painumassa ei ole hiipuman aiheuttamaa osuutta.

Syvästabiloiduilla alueilla tapahtuneet painumat ovat edelleen pienempiä kuin esirakentamisen mitoituksessa käytetyt painumat.

Otetun näytesarjan ja tehtyjen kairausten perusteella pilarien välisen saven leikkauslujuus on kasvanut ja vesipitoisuus hieman pienentynyt.

Pilarien ja maan vedenläpäisevyyksien suhde on laskennallisesti pienempi kuin Bromms ja Bomanin tekemä arvio sammuttamattoman kalkin lisäämisen vaikutuksesta saven vedenläpäisevyyden kasvuun. Sammuttamattoman kalkin on

arvioitu kasvattavan vedenläpäisevyyttä 100...1000-kertaiseksi. Laskennalliseksi arvioksi vedenläpäisevyyden kasvusta Talissa saatiin noin 1...8.

Painumahavainnoista takaisin laskemalla saatu arvio pilarin muodonmuutosmoduulin ja pilarin leikkauslujuuden välisestä suhteesta on pienempi kuin kirjallisuudessa annettu kokemukseen perustuva suhde.

Vesipitoisuuden muutoksen perusteella saatu painuma antaa pilarin muodonmuutosmoduulin arvoksi noin 16200 kPa. Saatu arvo on erisuuri takaisinlaskennasta saadun tuloksen kanssa.

Talin alueella kymmenen vuoden seurannan jälkeen painuman vaikutukset näkyvät muun muassa painumattomiin rakenteisiin kiinnitettyjen aitojen vääntymisinä ja ulko-ovien syvennyksissä maan painumisena rakennukseen nähden. Katualueilla ei ole havaittu merkittäviä painumisesta johtuvia vaurioita. Tähänastisten kokemusten perusteella alueella tehdyllä syvästabiloinnilla on onnistuttu pienentämään haitallisia painumia.

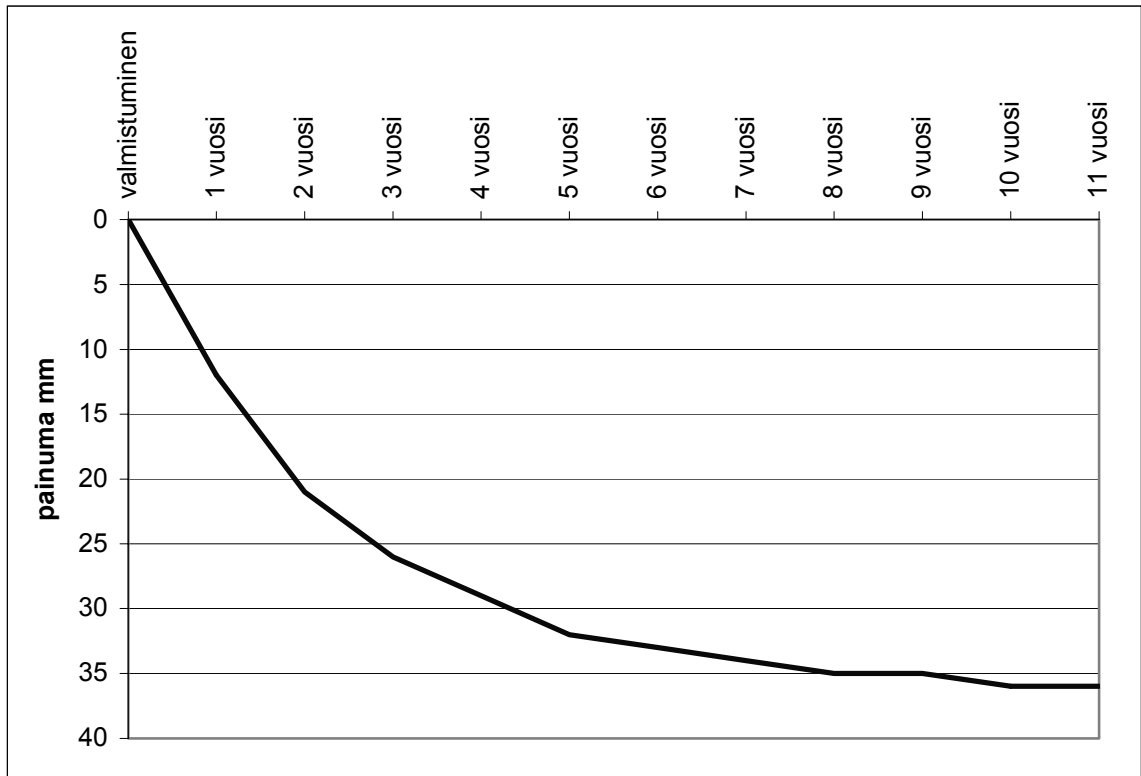
Talin epävarmuudeksi voidaan laskea sen täyttöhistoria sekä täytteen paksuuden vaihtelut.

## 5.2 Fallkullan kaava-alue

### 5.2.1 Painumat

Fallkullan alueelta esitetään laskennallisesti saatu painuma. Painumaa arvioitaessa on käytetty kalkkisementtipilarin leikkauslujuuden ja pilarin muodonmuutosmoduulin,  $E_{pil}$ , ja pilarin leikkauslujuuden,  $\tau_{pil}$ , suhteena arvoa 100. Laskennallisessa arviossa ei ole tietoa todellisesta pilarin ja saven vedenläpäisevyyksien suhteesta, joten arviona on käytetty arvoa 40. Arvot pyrittiin valitsemaan kirjallisuuden sekä käytetyn KPO-painumalaskentaohjelman ohjeiden mukaisesti. Laskennallisesti saatu kokonaispainuma on noin 36 mm, painuma-ajan ollessa noin 9 vuotta. Laskennallisesti arvioitu painuma ja painumaan kuluva aika ovat todennäköisesti pienempiä kuin mitä mittauksilla tullaan havainnoimaan. Laskentapisteenä käytetty piste on Tasankotien jalkakäytävän kohdalta. Saatu painuma on pienempi kuin alueella käytetty mitoituspainuma. Kuvassa 44 on esitetty laskennallisesti saatu painumanopeus ja painuman suuruus. Tehty laskenta on esitetty liitteessä C.





Kuva 44 Fallkullan alueen laskennallisesti arvioitu painuman kehitys. Laskenta on tehty Tasankotiellä KPO- painumaohjelmalla.

### 5.2.2 Johtopäätökset

Fallkullan alueen jälkiseurannan lopulliset tulokset tullaan saamaan pitkäaikaisin mittauksin. Talista saatujen kokemusten perusteella tarkkailuaika tulee olla 10 vuotta, mahdollisesti pidempi. Tarkasteltavana ovat rakenteen pitkäaikaiset muodonmuutokset täyttökuorman alla. Mikäli rakenteessa ei esiinny häiritseviä painumia on suunniteltu ratkaisu ollut oikea.

Välitön painuma on tapahtunut jo ennen jälkiseurantamittauskentän asentamista ja pilarit ovat lujittuneet edelleen. Pilarit ovat tulleet täysin kuormitetuiksi vasta noin vuoden – puolentoista kuluttua valmistumisestaan. Ennen jälkiseurannan aloittamista tapahtuneen painuman suuruutta voidaan arvioida pilarikentässä olevan stabiloimattoman saven vesipitoisuuden muutoksen avulla.

Fallkullan kaava-alueelle asennettava jälkiseurantaverkosto tuottaa tietoa Malmin lentokentän mahdolliselle esirakentamiselle. Tuloksia käytetyn syvästabilointimenetelmän onnistumisesta ja laskennan oikeellisuudesta saadaan pitkäaikaisin mittauksin. Kokemusperäisesti saadun tiedon perusteella voidaan arvioida stabiloinnin onnistuminen sekä käytetyn esirakentamismenetelmän puutteet. Havaitut puutteet korjaamalla voidaan tulevaa esirakentamista suunnata paremman lopputuloksen suuntaan. Stabiloidun savikon riittävän pitkäaikaisella jälkiseurannalla saadaan alueen työn onnistumisesta luotettava kuva.

Jälkiseurantakohteena Fallkullan etuna on sen häiriötön historia, alue on vanhaa peltoa. Alueella tehty esirakentamistyö on hyvin tunnettu ja dokumentoitu. Mitattujen painumien perusteella voidaan arvioida alueen pohjamaan ja pilarien

vedenläpäisevyyksien suhteita sekä pilarien muodonmuutosmoduulia. Alueelta voidaan painumamittausten edetessä ottaa näytteitä pilareiden välisestä savesta ja näin tutkia saven kehitystä.

## 6. YHTEENVETO

Pitkäaikaisia syvästabiloidun alueen seurantatutkimuksia on Suomessa tehty vain muutamia, pääasiallisesti koerakenteiden yhteydessä. Syvästabiloinnin laadunvalvonta on keskittynyt lähinnä stabilointityön sekä valmiin pilarin tarkkailuun.

Kaava-alueella stabilointityön tarkoituksena on rakennettavien pihojen, katujen ja putkijohtojen haitallisten painumien ehkäiseminen pitkällä aikavälillä. Pitkäaikaisella painumatarkkailulla saadaan arvokasta kokemukseräistä tietoa rakenteiden muodonmuutoksista.

Talin alueella on esirakennetun alueen painumatarkkailu aloitettu rakentamistoiminnan rauhoituttua vuonna 1993. Painumahavaintoihin sovitettuna ennusteen mukaan alue tulee vielä painumaan. Alueella havainnoidut ja havaintojen perusteella ennustetut painumat ovat esirakentamisen yhteydessä annettuja painumakriteerejä pienempiä. Esirakentamisella on onnistuttu pienentämään alueen painumaeroja ja haitallisia painumia.

Mittaushavaintojen ja takaisin laskennan avulla arvioitu pilarin vedenläpäisevyys on huomattavasti pienempi kuin kirjallisuuden perusteella on arvioitu. Talin alueella pilarin vedenläpäisevyys on noin 1 -8 -ertainen maan vedenläpäisevyyteen verrattuna.

Syvästabiloitujen pilareiden välisen stabiloimattoman saven kairausvastus on kasvanut ja vesipitoisuus pienentynyt esirakentamista edeltäneeseen tilaan verrattuna.

Fallkullan alueen rakentamistoiminta on kesken, joten painumamittauspisteiden pysyvyyttä ei voida vielä varmistaa. Rakentamistoiminnan rauhoituttua alueelle asennetaan mittauspisteverkosto. Pitkäaikaisin mittauksin saadaan alueen rakenteista ja niiden toiminnasta kokemukseräistä tietoa. Mittausverkosto tuottaa tietoa muun muassa Malmin lentokenttäalueen mahdolliselle esirakentamiselle. Jälkiseurantakohteena Fallkullan etuna on sen häiriötön historia, alue on vanhaa peltoa. Muita etuja ovat hyvin tunnettu ja dokumentoitu stabilointityö. Fallkullan aluetta voidaan tulevaisuudessa hyödyntää tutkittaessa pilareiden välissä olevan saven kehitystä. Laskennallisesti saadut arviot stabiloidun alueen painumasta ovat pienempiä kuin alueelle asetettujen painuman mitoitusarvot.

Laskennallisesti saatujen painumien ja mitattujen painumien, sekä painumakäytön ero vahvistaa tarvetta uusille jälkitarkkailukohteille. Laskennassa käytetään saven ja luonnontilaisen saven vedenläpäisevyyksien suhdetta arvioitaessa painuma-aikaa. Jälkitarkkailun ja jälkitarkkailun pituuden lisäämisellä saadaan tietoa saven ja pilarin todellisesta aika-painumakäyttäytymisestä sekä vedenläpäisevyyksien suhteesta. Kokemukseen perustuvan tiedon avulla voidaan laskentamenetelmiä kehittää luotettavampaan suuntaan arvioitaessa painuman kehitystä sekä pilarin leikkauslujuuden ja muodonmuutosmoduulin välistä suhdetta. Syvästabiloidun alueen pitkäaikainen tarkkailu palvelee lähiympäristön tulevaa esirakentamista.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- 1 Aalto, Asko. Syvästabilointitutkimus - yhteenveto projektin III vaiheesta. TKK 2002
- 2 As Oy Mesenaatintie, kalkkipilarointisuunnitelma. Helsinki 1991. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 3985. 29.1.1991. 4s.
- 3 Broms, Bengt & Boman, Per. Stabilization of soil with lime columns. Tukholma 1978. Royal Institute of technology, Department of soil and rock mechanics, 92 s
- 4 Broms, Bengt,B. Keynote lecture: Design of lime, lime/cement and cement columns. Proceedings of the International conference on Dry Mixing Methods for Deep Soil Stabilization. Tukholma 1999. A.A.Balkema ISBN 90 5809 108 2 358s.
- 5 Carlsten,P & Ekström, J. Kalk- och kalkcementpelare- Vägledning för projektering, utanförande och kontroll.1995. Svenska geotekniska föreningen.SGF Rapport 4:95.
- 6 Eijkelkamp- yhtiön kotisivut 13.8.2003  
<http://213.160.200.25/eportalscripts/mgrqispi93.dll?appname=eijkelkamp&prgname=runtime&Mode=Screen&ComponentID=36&ObjectID=38>
- 7 Fallkulla, II-vaiheen stabilointi, Laadunvarmistusraportti. Helsinki 2002. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, TNO 10293. 19.7.2002 3s+liitteet.
- 8 Fallkulla, YIT Oy:n pilariraportit
- 9 Fallkullan alue. Esirakentamissuunnitelma. Helsinki 2000, Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, TNO 5933 4.8.2000 7s
- 10 Fallkullan esirakentaminen II, Malmi Helsinki, Lemminkäinen Oy:n pilariraportit
- 11 Fallkullan esirakentaminen, stabiloinnin laadunvalvonta, Helsinki 2001, Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto TNO 10032, 25.4.2001 3s
- 12 Fallkullan kaava-alue, Koestabiloinnin laadunvarmistusraportti. Helsinki 2002. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, TNO 10265. 28.11.2002 6s.
- 13 Halkola, Hannu. Keynote lecture: Quality control for dry mix methods. Proceedings of the International conference on Dry Mixing Methods for Deep Soil Stabilization. Tukholma 1999. A.A.Balkema ISBN 90 5809 108 2 358s.

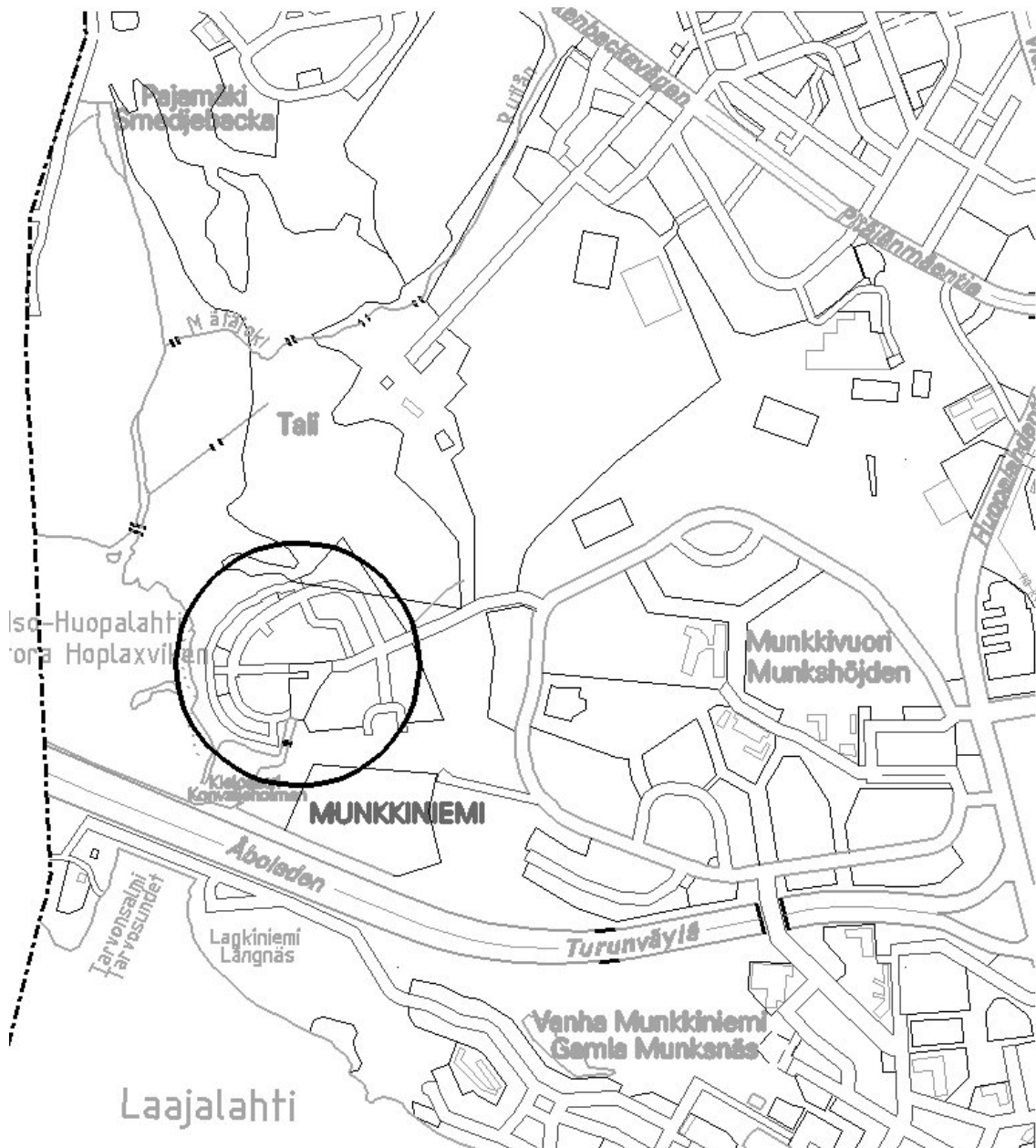
- 14 Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Helsingin kartta- ja geotekninen tietokanta. 2003
- 15 Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Rasterikuvaarkisto. 2003
- 16 [http://www.espoo.fi/xsl\\_perussivu\\_ilmanalasisivuja.asp?path=1;606;607;4218;3123;5671;23957](http://www.espoo.fi/xsl_perussivu_ilmanalasisivuja.asp?path=1;606;607;4218;3123;5671;23957), Espoon kaupungin pilaristabiloinnin mitoitusohjelma, 16.5.2003
- 17 Janbu, N. Grunnlag i geoteknikk. Trondheim 1970.
- 18 Jakomäen kiinteistöt Oy/ Fallkullan portti K38337 T1, Pohjarakennussuunnitelma. Helsinki 2002, Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto TNO 10386. 30.9.2002 4s
- 19 Juntunen, Perttu & Korhonen Osmo. Pikku- Huopalahden esirakentamiskokemukset. Helsinki 2002. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Julkaisu 86/2002 163s. ISBN 952-473-007-3
- 20 Kangas, Heikki. Keskustelut. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, 2003
- 21 Korhonen, Osmo. Keskustelut. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, 2003
- 22 Koy muusantori k 30143 t 1, k 30145 t 1, Munkkivuori, Kalkkipilaroinnin lujuustutkimus. Helsinki 1992. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO:t 4428,4429. 20.1.1992 2s.
- 23 Koy Muusantori k 30143 t 1, Putkijohtojen kalkkipilarointisuunnitelma, Helsinki 1991. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, TNO 4428. 29.11.1991. 4s.
- 24 Koy Muusantori K 30145 T1, Pohjarakennussuunnitelma. Helsinki 1991. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto., TNO 3984. 29.8.1991. 3s.
- 25 Koy muusantori k 30145 t1, Putkijohtojen kalkkipilarointisuunnitelma. Helsinki 1991. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 4429. 29.11.1991. 4s
- 26 Koy Muusantori k.30413 t1, k.30145 t.1, Koy Kielosaari k.30142 t.1, Munkkivuori, Kalkkipilarien lujuustutkimus. Helsinki 1992. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 4424. 23.1.1992. 2s.
- 27 Koy Muusantori K30143 T1, Pohjarakennussuunnitelma. Helsinki 1991. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, TNO 3983. 29.8.1991. 3s.

- 28 Lahtinen, Pentti & Parkkinen, Elina. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Helsinki 1992. Tielaitos. Tielaitoksen selvityksiä 46/1992. 53s ISBN 951-47-6510-9
- 29 Linkka, Seppo. Keskustelut. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, 2003
- 30 MaaRYL 2000, Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset 2000, Talonrakennuksen maatyöt. Hämeenlinna 1997. Rakennustieto.269s. ISBN 951 682-448-X
- 31 Munkkiniemi, Munkkivuoren laajennusalue k 30143 t. 2 Esirakentamislouonnos. Helsinki 1989. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 3986 3.3.1989 7s.
- 32 Munkkivuoren laajennusalue kalkkipilaroinnin valvontakairaukset. Helsinki 1991. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 4189. 14.5.1991. 2s.
- 33 Munkkivuoren laajennusalue, osa II. Kalkkipilaroinnin valvontaraportti. Helsinki 4319. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. TNO 4319. 31.10.1991 2s.
- 34 Munkkivuoren laajennusalue, Pohjarakennussuunnitelma. Espoo 1989. Viatek Oy. TNO 3980. 10.11.1989. 8s.
- 35 Nauska, Jari & Havukainen, Jorma. Esirakentaminen 1998, Helsinki 1998. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Tiedote 77/1998 92s. ISBN 951-718-098-5
- 36 Probaha, Shima, Miura & Ishikura. Dry Jet mixing method for liquefaction remediation. Proceedings of the International conference on Dry Mixing Methods for Deep Soil Stabilization. Tukholma 1999. A.A.Balkema ISBN 90 5809 108 2 358s.
- 37 Rantala, Kalle. Keskustelut. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, 2003
- 38 Rantamäki, Martti & Tamminen, Markku. Pohjarakennus 465 . Otatieto 1996. 232s. ISBN 951-671-160-5
- 39 RIL 166 Pohjarakenteet. Helsinki 1986. Suomen rakennusinsinööriliitto RIL ry. 597s. ISBN 951-758-108-4
- 40 RIL K128-1990 Syvästabiloinnin suunnittelu ja toteutus. Helsinki 1990. Suomen rakennusinsinööriliitto RIL ry. 127s. ISBN 951-758-242-0
- 41 Syvästabiloinnin mitoitusohje. Helsinki 1997. Tielaitos. Tielaitoksen selvityksiä 18/1997.
- 42 Syvästabiloinnin suunnitteluohje, Helsinki 2001, Tiehallinto. 40s. ISBN 951-726-823-8

- 43 Syvästabilointi kehittyvänä pohjanvahvistusmenetelmänä, International Conference IS-Tokio'96. Tielaitos. Tielaitoksen selvityksiä 77/1996 53s. ISBN 951-726-305-8
- 44 Syvästabilointiohje STO-91. Helsinki 1992. Rakennusaineteollisuusyhdistys ry ja Rakennustieto Oy. 52s.
- 45 Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 1: Toteutetut kohteet. Helsinki 1999. Tielaitos. Tielaitoksen selvityksiä 2/1999. 69s. ISBN 951-726-477-1
- 46 Sällfors G,B & Baker, S. Keynote lecture: Prediction and performance - Case records. Proceedings of the International conference on Dry Mixing Methods for Deep Soil Stabilization. Tukholma 1999. A.A.Balkema ISBN 90 5809 108 2 358s.
- 47 Tien pohja - ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma (TPPT), Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. Helsinki 1996. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 39/1996. 21s. ISBN 951-726-241-8
- 48 Törnqvist, Jouko, Juvankoski, Markku, KT51 Kirkkonummen syvä- ja massastabiloitu koerakenne, Loppuraportti. Helsinki 2003. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 29/2003. 155s ISBN 951-803-080-4

LIITTEET

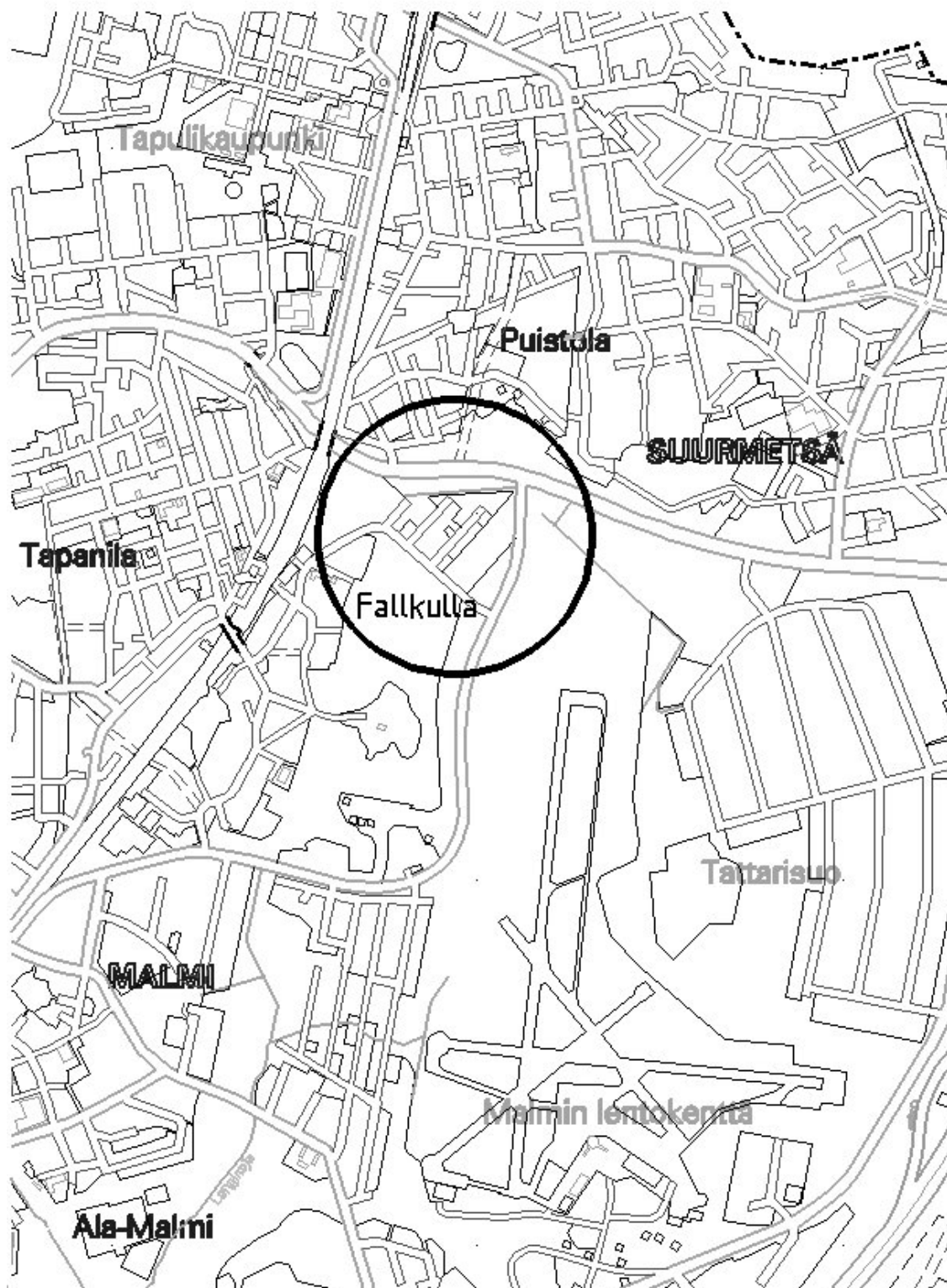
LIITE A (1/2)



Kuva 1 Talin kohteen sijainti /14/



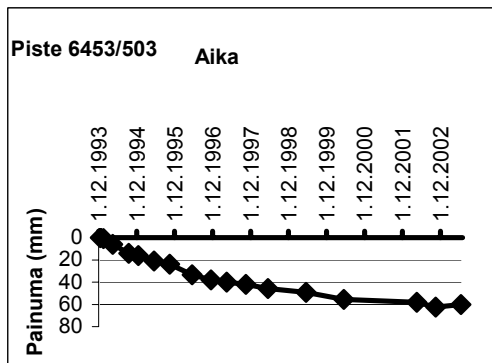
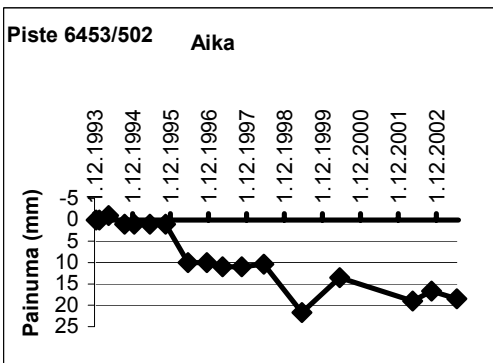
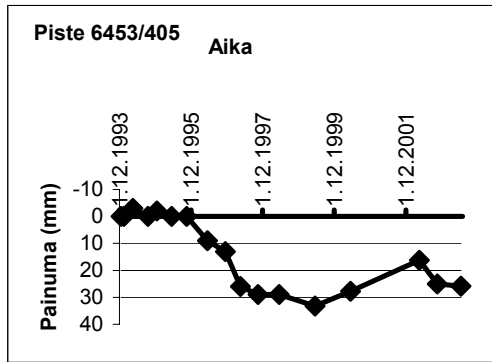
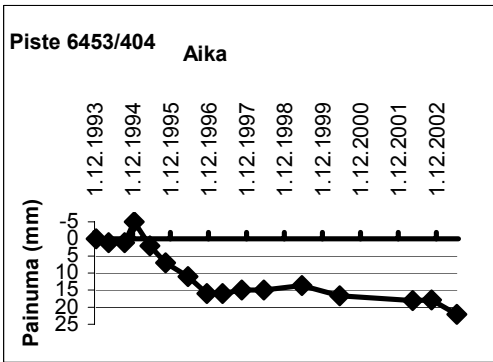
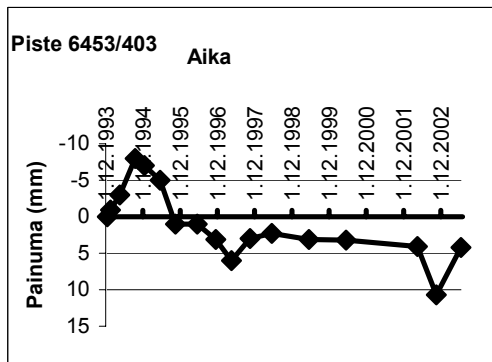
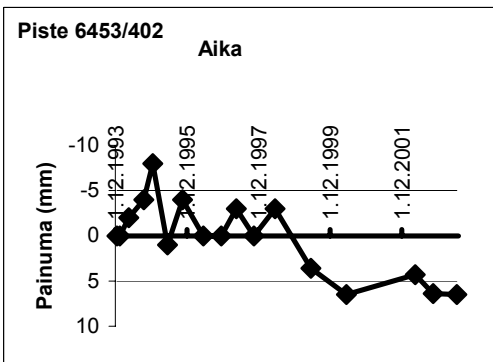
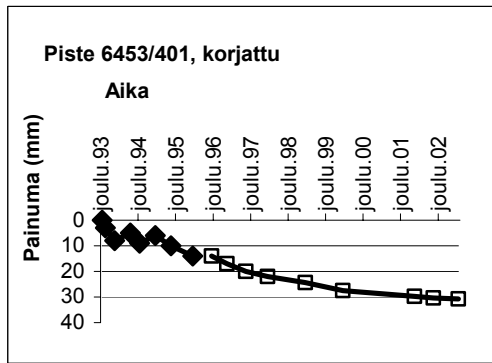
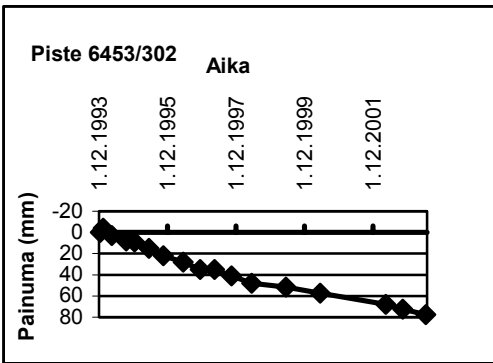
LIITE A (2/2)



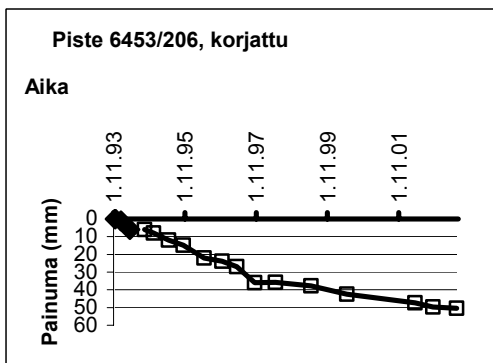
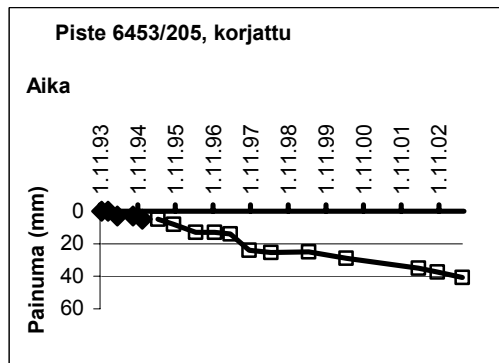
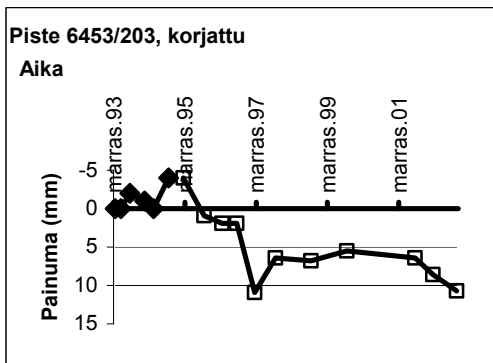
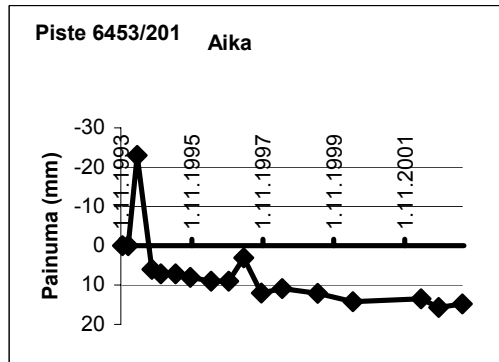
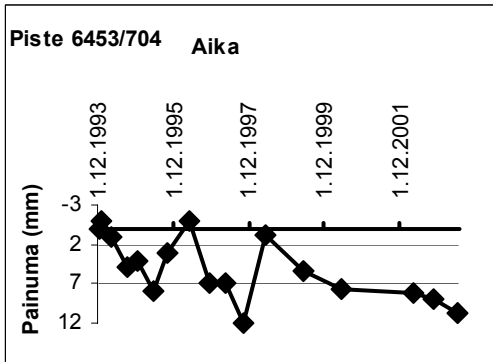
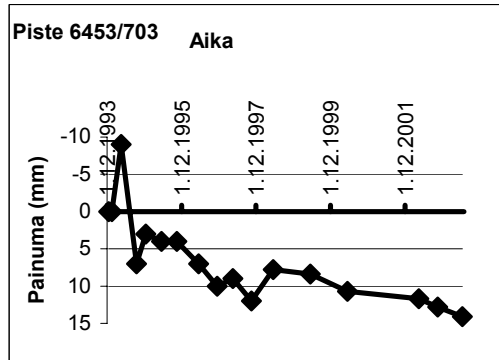
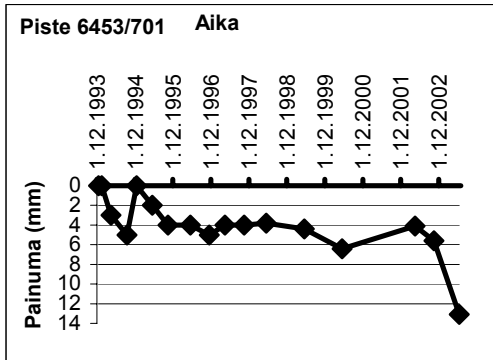
Kuva 2 Falckullan alueen sijainti Helsingin Malmin kaupungin osassa, Malmin lentokentän lähellä./14/

LIITE B (1/2)

Talin syvästabiloiduilla alueilla sijaitsevien painumamittauspisteiden kuvaajat.




LIITE B (2/2)



## LIITE C ( 1/8)

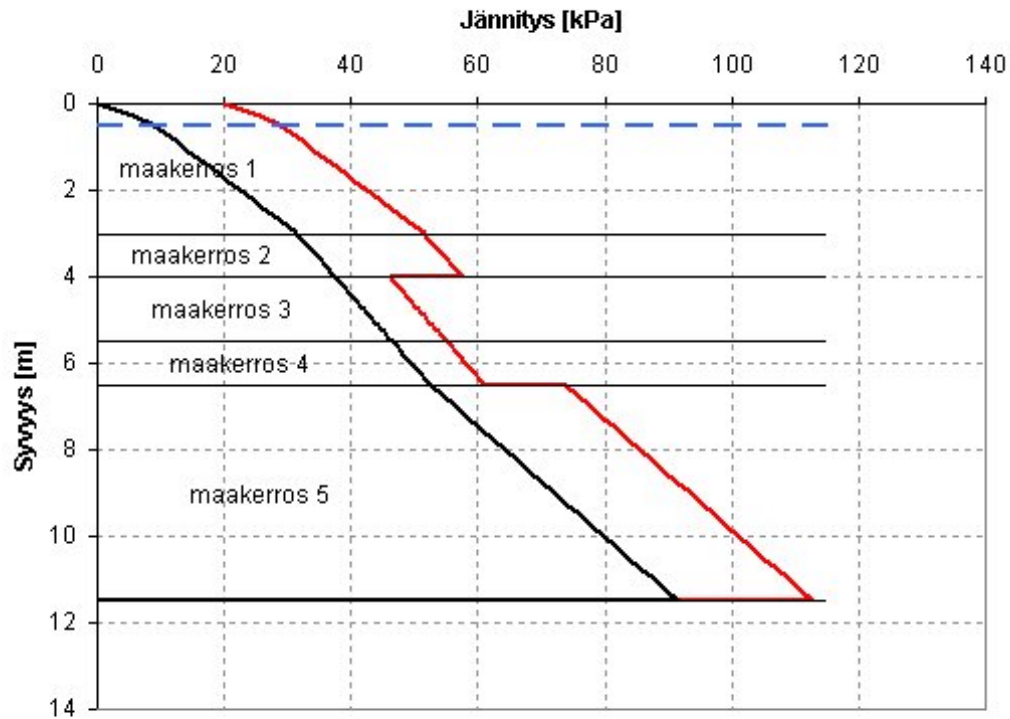
## Talin laskenta

 <b>KPO 2000</b>	Kohde	koy Taiteentekijäntie		Huom.	Pisteen kohdalla ollut 3m täytettä, täyteen alla Sa. Täyteen gamma=19, Pihan tasausta nostettu noin 1 m					
	Laskija	Mip								
	pvm	18.11.2003								
Maakerrosten lkm.	$\sigma'_{cu}$ määrittäminen	Maaparametrit			Pilarin moduuli					
5	POP	Tangentti moduuli			$E_p = 50 \cdot t_p$					
pvp. etäisyys	0,5				50					
Maakerros	z [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	POP [kPa]	$\sigma'_{cu}$						
				Maan muodonmuutosparametrit						
				m2	b2	m	b	s'cv	Pilarit	
									$t_p$ [kPa]	$E_p$ [kPa]
1	3	19	20	1000	1	1000	0,5		60	3000
2	1	16	20	10,8	1	6,2	-0,446		60	3000
3	1,5	16	8,6	17,4	1	15,4	-0,241		100	5000
4	1	16	8,6	15	1	7,9	0,076		100	5000
5	5	17,8	21,3	22,4	1	12,3	0,001		120	6000

Laske

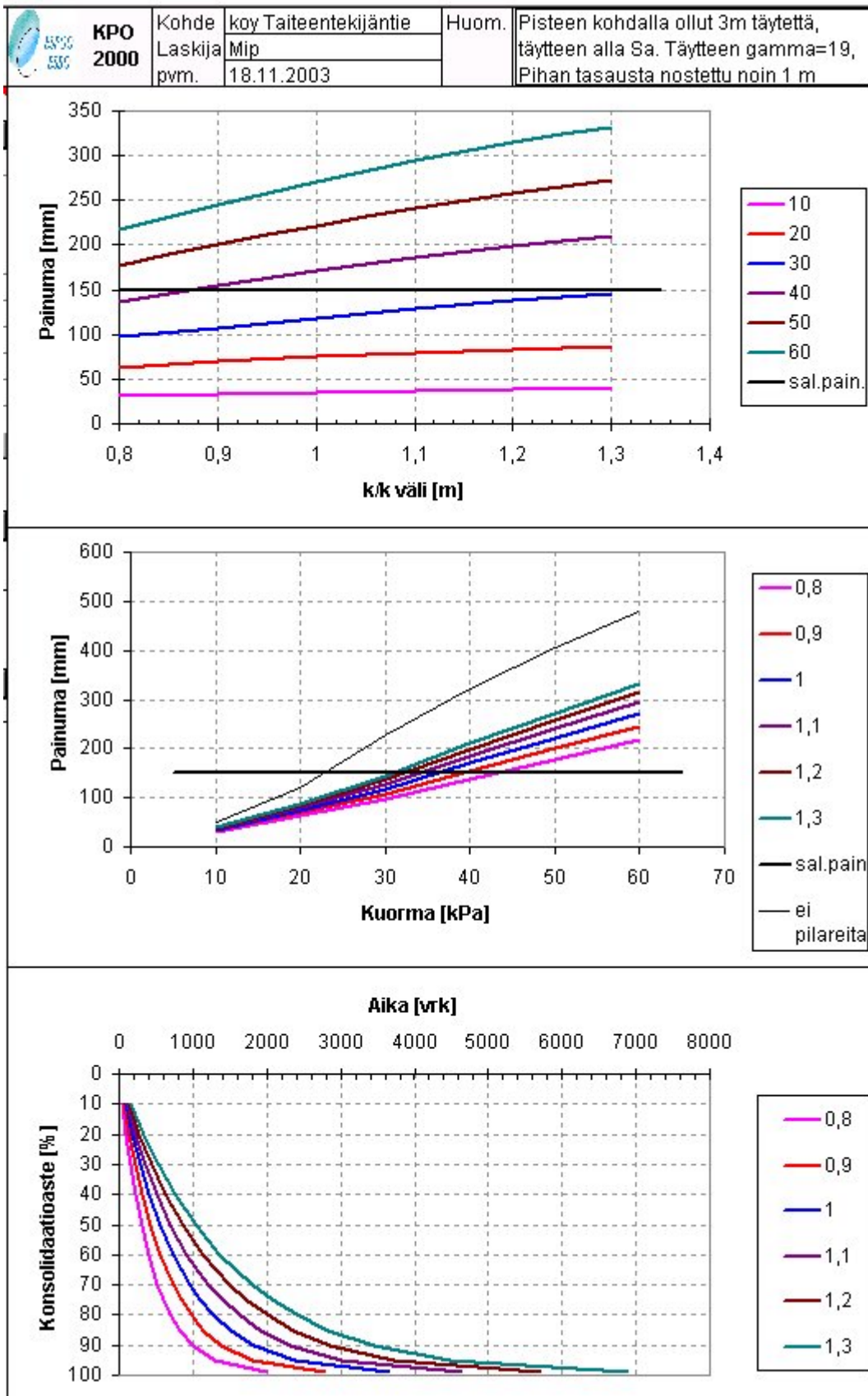
Pilarihalkaisija mm	500	Pilarien myötökerroin	0,7
Pilarien pituus m	11,5	Varmuus sortumista vastaan	Yli 1,5
Pilarien sijoituskuviot	Neliö	Huomioi horisontaalijännityksen korotus	<input checked="" type="radio"/> Kyllä <input type="radio"/> Ei
Pilarien k/k väli, m	0,8	askel	0,1
Kuormitus, kPa	10	maks	1,3
Kuormitus alueen pituus	101	Maan konsolidaatiokerroin $c_v$	0,8 m <sup>2</sup> /a
Kuormitus alueen leveys	101	Pilarin ja maan k-arvojen suhde	40
		Kuivatus	2-puolinen

**Jännitys [kPa]**




— Esikonsolidaatiojännitys — Tehokas pystyjännitys

LIITE C (2/8)

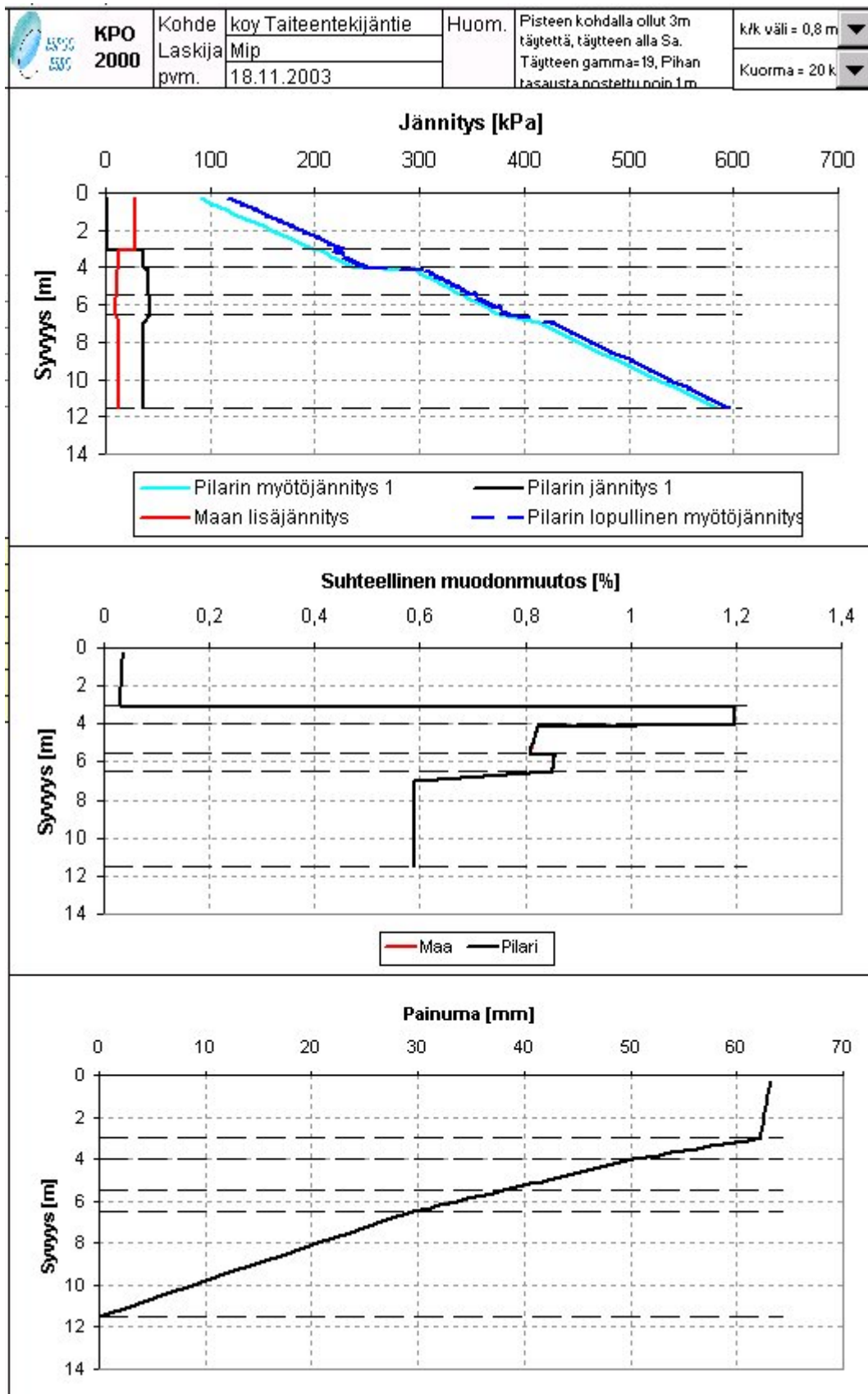


## LIITE C (3/8)


	Kohde	koy Taiteentekijäntie	Huom.	Pisteen kohdalla ollut 3m täytettä, täyteen alla Sa. Täyteen gamma=19, Pihan tasausta nostettu noin 1 m																																																																																																																																																																																																											
	Laskija	Mip																																																																																																																																																																																																													
	pvm.	18.11.2003																																																																																																																																																																																																													
<b>Yhteenveto pilaristabiloidun alueen painumalaskennasta</b>																																																																																																																																																																																																															
pvp. etäisyys	0,5	$\sigma'_{cu}$	Maan muodonmuutospaarametrit			Pilarit																																																																																																																																																																																																									
Maake rros	z [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	POP kPa	m2	b2	m	b	s'cv	tp kPa	Ep kPa																																																																																																																																																																																																					
1	3	19	20	1000	1	1000	0,5		60	3000																																																																																																																																																																																																					
2	1	16	20	10,8	1	6,2	-0,446		60	3000																																																																																																																																																																																																					
3	1,5	16	8,6	17,4	1	15,4	-0,241		100	5000																																																																																																																																																																																																					
4	1	16	8,6	15	1	7,9	0,076		100	5000																																																																																																																																																																																																					
5	5	17,8	21,3	22,4	1	12,3	0,001		120	6000																																																																																																																																																																																																					
<p><b>Painumalaskenta</b></p> <p style="text-align: right;"> <span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> = maks. kokoonpuristuma &gt; 3 %  <span style="background-color: red; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px;"></span> = maks. kokoonpuristuma &gt; 5 % </p> <table border="1"> <tr> <td rowspan="2">painuma a</td> <td rowspan="2">Kuorma kPa</td> <td colspan="6">Painuma mm - k/k väli, m</td> <td rowspan="2">ei pilareit</td> <td rowspan="2">Raja k/k</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>0,9</td> <td>1</td> <td>1,1</td> <td>1,2</td> <td>1,3</td> </tr> <tr> <td>150</td> <td>10</td> <td>31</td> <td>33</td> <td>35</td> <td>37</td> <td>38</td> <td>39</td> <td>51</td> <td>yli 1,3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>20</td> <td>63</td> <td>69</td> <td>75</td> <td>80</td> <td>84</td> <td>87</td> <td>122</td> <td>yli 1,3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>30</td> <td>97</td> <td>108</td> <td>118</td> <td>128</td> <td>137</td> <td>146</td> <td>229</td> <td>yli 1,3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>40</td> <td>137</td> <td>155</td> <td>171</td> <td>186</td> <td>199</td> <td>211</td> <td>323</td> <td>0,87</td> </tr> <tr> <td></td> <td>50</td> <td>177</td> <td>201</td> <td>222</td> <td>241</td> <td>258</td> <td>273</td> <td>406</td> <td>alle 0,8</td> </tr> <tr> <td></td> <td>60</td> <td>217</td> <td>246</td> <td>271</td> <td>294</td> <td>314</td> <td>332</td> <td>480</td> <td>alle 0,8</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Raja kPa</td> <td>43</td> <td>39</td> <td>36</td> <td>34</td> <td>32</td> <td>31</td> <td>23</td> <td></td> </tr> </table> <p><b>Konsolidaatioaste</b></p> <table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Voit laskea tietyn painuman vaatiman ajan, tai tietyssä ajassa tapahtuvan painuman</td> <td rowspan="2">U %</td> <td colspan="6">Aika vrk - k/k väli, m</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>0,9</td> <td>1</td> <td>1,1</td> <td>1,2</td> <td>1,3</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>46</td> <td>64</td> <td>84</td> <td>106</td> <td>131</td> <td>158</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>97</td> <td>135</td> <td>177</td> <td>225</td> <td>277</td> <td>334</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>155</td> <td>215</td> <td>283</td> <td>359</td> <td>442</td> <td>533</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>222</td> <td>308</td> <td>406</td> <td>514</td> <td>633</td> <td>764</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>301</td> <td>418</td> <td>551</td> <td>698</td> <td>860</td> <td>1037</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>398</td> <td>553</td> <td>728</td> <td>922</td> <td>1136</td> <td>1370</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td>523</td> <td>727</td> <td>956</td> <td>1212</td> <td>1493</td> <td>1800</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>602</td> <td>837</td> <td>1101</td> <td>1395</td> <td>1719</td> <td>2073</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>699</td> <td>972</td> <td>1279</td> <td>1620</td> <td>1996</td> <td>2407</td> </tr> <tr> <td>85</td> <td>824</td> <td>1145</td> <td>1507</td> <td>1909</td> <td>2353</td> <td>2837</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>1000</td> <td>1390</td> <td>1829</td> <td>2317</td> <td>2855</td> <td>3443</td> </tr> <tr> <td>95</td> <td>1301</td> <td>1809</td> <td>2380</td> <td>3015</td> <td>3715</td> <td>4480</td> </tr> <tr> <td>99</td> <td>2000</td> <td>2780</td> <td>3658</td> <td>4635</td> <td>5711</td> <td>6886</td> </tr> </table> <p>     valitse kuorma      Kuorma = 20 kPa   </p> <p>     valitse k/k väli      k/k väli = 0,8 m   </p> <p>     Painuma mm      63   </p> <p>     U vrk      100 2432   </p> <p>     Aika vrk      3478   </p> <p>     U Painuma      100 63   </p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">18.11.2003</td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td>aika</td> <td>paikka</td> <td>allekirjoitus</td> </tr> </table>											painuma a	Kuorma kPa	Painuma mm - k/k väli, m						ei pilareit	Raja k/k	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	150	10	31	33	35	37	38	39	51	yli 1,3		20	63	69	75	80	84	87	122	yli 1,3		30	97	108	118	128	137	146	229	yli 1,3		40	137	155	171	186	199	211	323	0,87		50	177	201	222	241	258	273	406	alle 0,8		60	217	246	271	294	314	332	480	alle 0,8		Raja kPa	43	39	36	34	32	31	23		Voit laskea tietyn painuman vaatiman ajan, tai tietyssä ajassa tapahtuvan painuman	U %	Aika vrk - k/k väli, m						0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	10	46	64	84	106	131	158	20	97	135	177	225	277	334	30	155	215	283	359	442	533	40	222	308	406	514	633	764	50	301	418	551	698	860	1037	60	398	553	728	922	1136	1370	70	523	727	956	1212	1493	1800	75	602	837	1101	1395	1719	2073	80	699	972	1279	1620	1996	2407	85	824	1145	1507	1909	2353	2837	90	1000	1390	1829	2317	2855	3443	95	1301	1809	2380	3015	3715	4480	99	2000	2780	3658	4635	5711	6886	18.11.2003			aika	paikka	allekirjoitus
painuma a	Kuorma kPa	Painuma mm - k/k väli, m						ei pilareit	Raja k/k																																																																																																																																																																																																						
		0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3																																																																																																																																																																																																								
150	10	31	33	35	37	38	39	51	yli 1,3																																																																																																																																																																																																						
	20	63	69	75	80	84	87	122	yli 1,3																																																																																																																																																																																																						
	30	97	108	118	128	137	146	229	yli 1,3																																																																																																																																																																																																						
	40	137	155	171	186	199	211	323	0,87																																																																																																																																																																																																						
	50	177	201	222	241	258	273	406	alle 0,8																																																																																																																																																																																																						
	60	217	246	271	294	314	332	480	alle 0,8																																																																																																																																																																																																						
	Raja kPa	43	39	36	34	32	31	23																																																																																																																																																																																																							
Voit laskea tietyn painuman vaatiman ajan, tai tietyssä ajassa tapahtuvan painuman	U %	Aika vrk - k/k väli, m																																																																																																																																																																																																													
		0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3																																																																																																																																																																																																								
10	46	64	84	106	131	158																																																																																																																																																																																																									
20	97	135	177	225	277	334																																																																																																																																																																																																									
30	155	215	283	359	442	533																																																																																																																																																																																																									
40	222	308	406	514	633	764																																																																																																																																																																																																									
50	301	418	551	698	860	1037																																																																																																																																																																																																									
60	398	553	728	922	1136	1370																																																																																																																																																																																																									
70	523	727	956	1212	1493	1800																																																																																																																																																																																																									
75	602	837	1101	1395	1719	2073																																																																																																																																																																																																									
80	699	972	1279	1620	1996	2407																																																																																																																																																																																																									
85	824	1145	1507	1909	2353	2837																																																																																																																																																																																																									
90	1000	1390	1829	2317	2855	3443																																																																																																																																																																																																									
95	1301	1809	2380	3015	3715	4480																																																																																																																																																																																																									
99	2000	2780	3658	4635	5711	6886																																																																																																																																																																																																									
18.11.2003																																																																																																																																																																																																															
aika	paikka	allekirjoitus																																																																																																																																																																																																													



LIITE C (4/8)



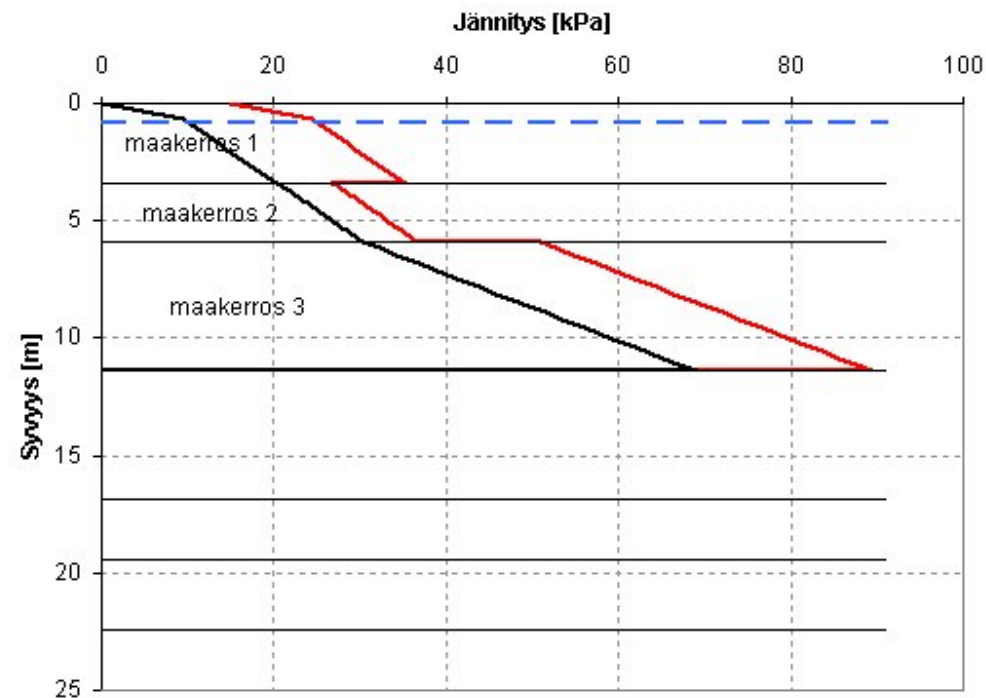
## Fallkullan laskenta

 <b>KPO 2000</b>		Kohde Laskija pvm	YIT 600 MIP 2.12.2003	Huom.
Maakerrosten lkm.	$\sigma'_{cu}$ määrittäminen	Maaparametrit		Pilarin moduuli
3	POP	Tangentti moduuli		$E_p = 100 \cdot \tau_p$
pvp. etäisyys	0,8			00
Maakerros	z [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	POP [kPa]	$\sigma'_{cu}$
1	3,4	14	15	
2	2,5	14	6,4	
3	5,5	17	20,5	
		Maan muodonmuutosparametrit		
		m <sup>2</sup>	b	s'cv
		5,3	1	3,7
		8,2	1	8,8
		16,1	1	5,4
				Pilarit
				$\tau_p$ [kPa]
				$E_p$ [kPa]
				90
				15000
				300
				30000

Laske

Pilarihalkaisija mm	600	Pilarien myötökerroin	0,7
Pilarin pituus m	12	Varmuus sortumista vastaan	Yli 1,5
Pilarin sijoituskuvio	Neliö	Huomioi	<input checked="" type="radio"/> Kyllä <input type="radio"/> Ei
	min askel maks	horisontaalijännityksen korotus	
Pilarien k/k väli, m	0,8 0,1 1,3	Maan konsolidaatiokerroin $c_v$	0,5 m <sup>2</sup> /a
Kuormitus, kPa	16 5 41	Pilarin ja maan k-arvojen suhde	40
Kuormitus alueen pituus	101	Kuivatus	2-puolinen
Kuormitus alueen leveys	101		

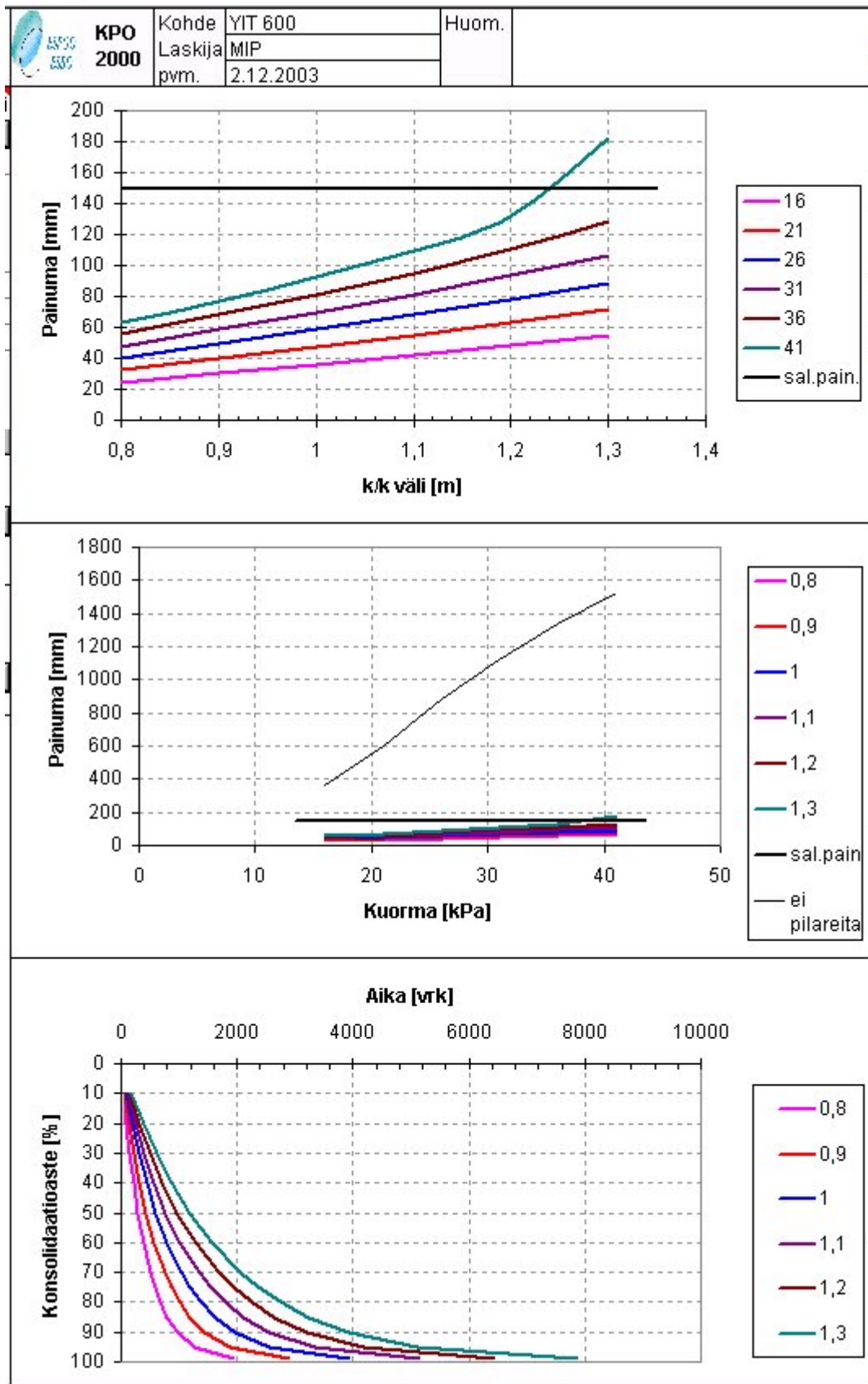
**Jännitys [kPa]**




— Esikonsolidaatiojännitys — Tehokas pystyjännitys



LIITE C (6/8)



## LIITE C (7/8)

 <b>KPO 2000</b>	Kohde	YIT 600	Huom.	
	Laskija	MIP		
	pvm.	2.12.2003		

**Yhteenvedo pilaristabiloidun alueen painumalaskennasta**

pvp. etäisyys		0,8	$\sigma'_{cu}$	Maan muodonmuutosparametrit					Pilarit	
Maake	z	$\gamma$	POP	m2	b2	m	b	s'cv	tp	Ep
rros	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	kPa						kPa	kPa
1	3,4	14	15	5,3	1	3,7	0		90	9000
2	2,5	14	6,4	8,2	1	8,8	-0,738		150	15000
3	5,5	17	20,5	16,1	1	5,4	-0,954		300	30000

**Painumalaskenta**

= maks. kokoonpuristuma > 3 %  
 = maks. kokoonpuristuma > 5 %

painuma a	Kuorma kPa	Painuma mm - k/k väli, m						ei pilareit	Raja k/k
		0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3		
150	16	25	30	36	42	48	54	365	yli 1,3
	21	32	40	47	55	63	71	603	yli 1,3
	26	40	49	59	68	78	88	882	yli 1,3
	31	48	58	70	81	94	107	1125	yli 1,3
	36	55	68	81	95	110	129	1338	yli 1,3
	41	63	77	92	110	132	182	1528	1,24
	Raja kPa	yli 41	yli 41	yli 41	yli 41	yli 41	38	alle 16	

**Konsolidaatioaste**

Voit laskea tietyn painuman vaatiman ajan, tai tietyssä ajassa tapahtuvan painuman

valitse kuorma  
 Kuorma = 16 kPa

valitse k/k väli  
 k/k väli = 1 m

U %	Aika vrk - k/k väli, m	Aika vrk - k/k väli, m					
		0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
10	44	66	90	117	147	180	
20	94	140	191	248	312	381	
30	150	223	306	397	498	609	
40	216	320	438	569	713	872	
50	292	434	594	772	968	1183	
60	387	574	785	1020	1280	1564	
70	508	754	1031	1341	1682	2055	
75	585	868	1188	1544	1936	2366	
80	679	1008	1379	1792	2248	2747	
85	800	1188	1625	2112	2650	3238	
90	972	1442	1973	2564	3216	3930	
95	1264	1876	2566	3336	4184	5113	
99	1943	2884	3945	5128	6432	7860	

Painuma mm  
 36

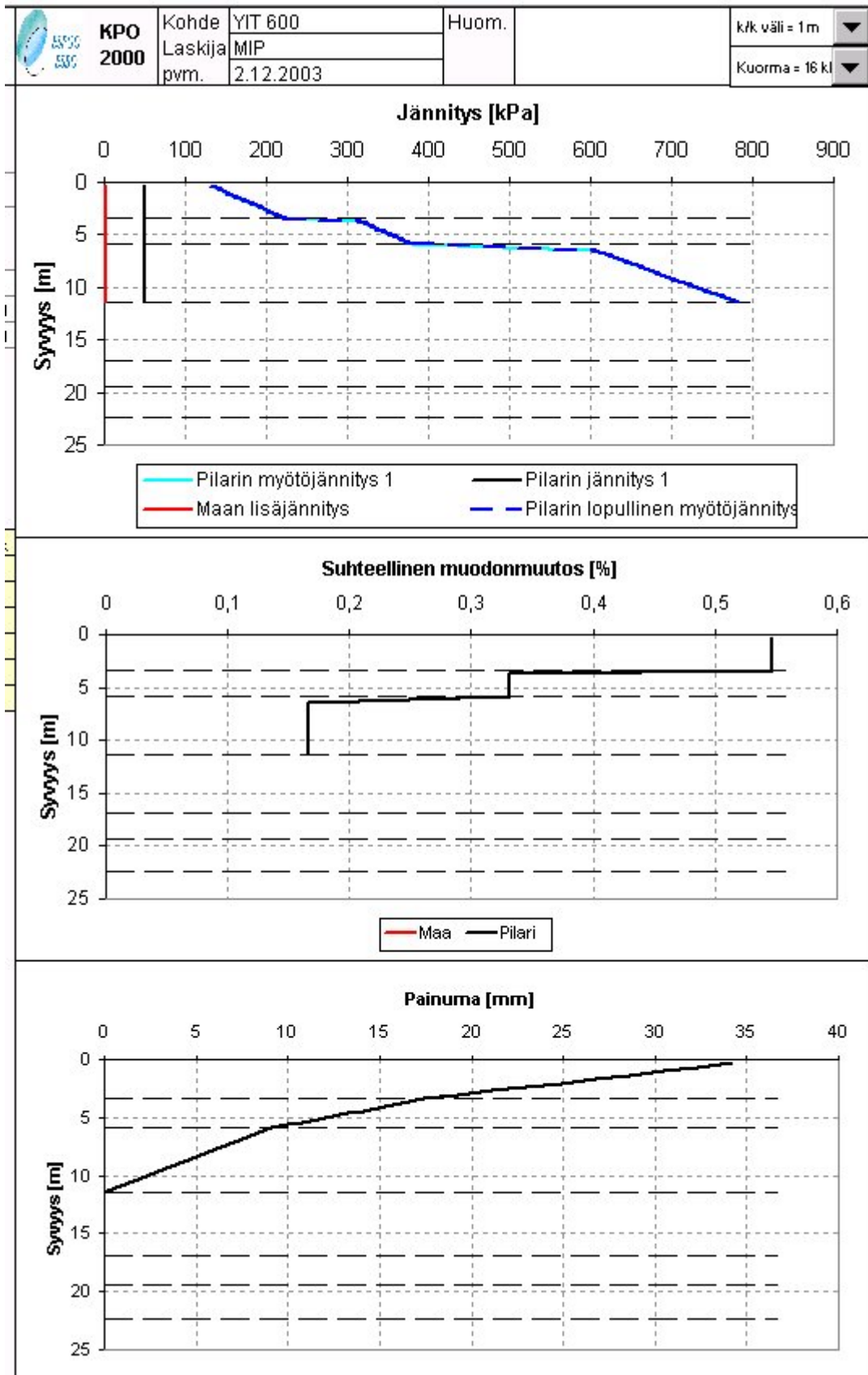
U vrk  
 100 6480

Aika vrk  
 365

U Painuma  
 35 12

2.12.2003		
aika	paikka	allekirjoitus

LIITE C (8/8)



## LIITE D ( 1/1)

Talin painumamittauspisteistä laskettujen logaritmifunktioiden tuloksiin sovitettujen suorien yhtälöt.

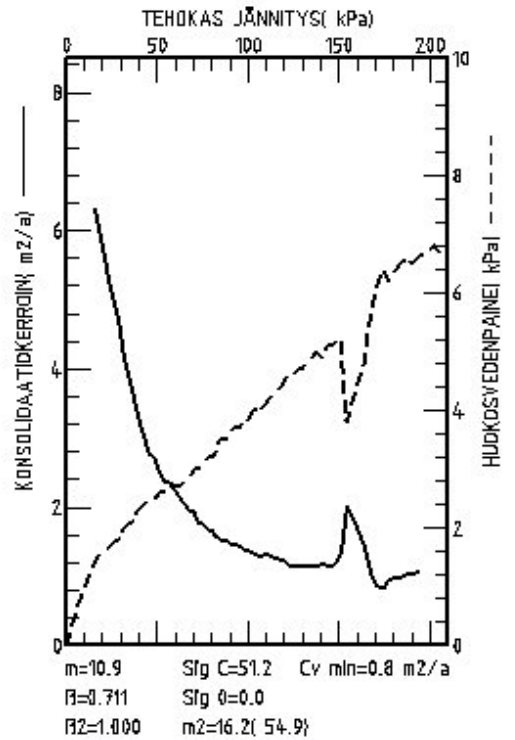
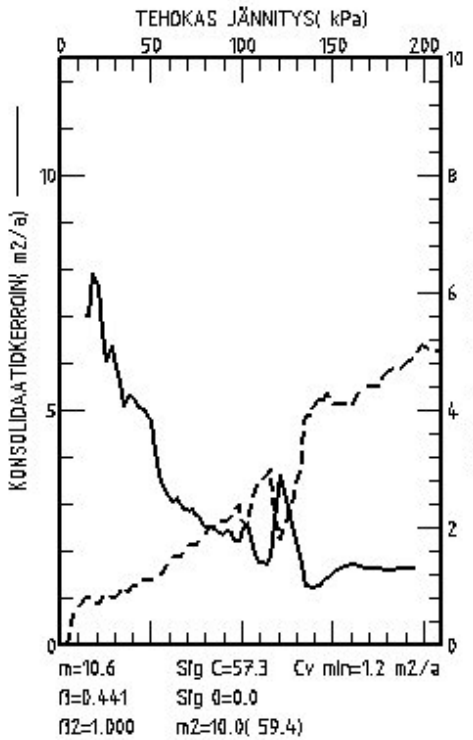
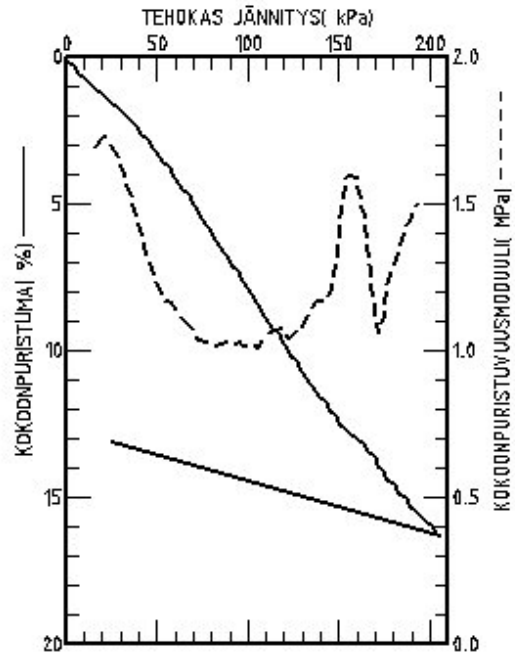
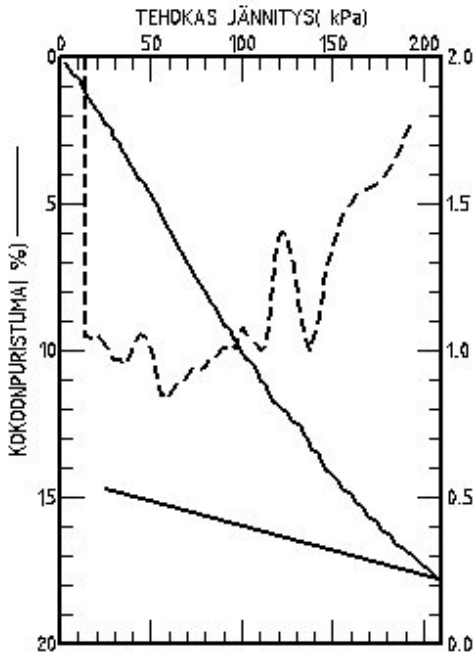
piste	yhtälö
203	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,0135t + 10,927$
205	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,0811t - 3,2825$
206	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,1216t - 2,9254$
302	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,0671t - 2,958$
305	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,0698t - 3,1389$
401	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,2373t - 1,9543$
503	$\ln \frac{\partial s}{\partial t} = -0,1071t - 2,9389$

LIITE E (1/4)

Talin uuden kairauspisteen ödometrikokeiden tulosteet.

Syvyys 3.83 m  
CRS-koee .0015 mm/mln  
6678A3  
Koe pvm

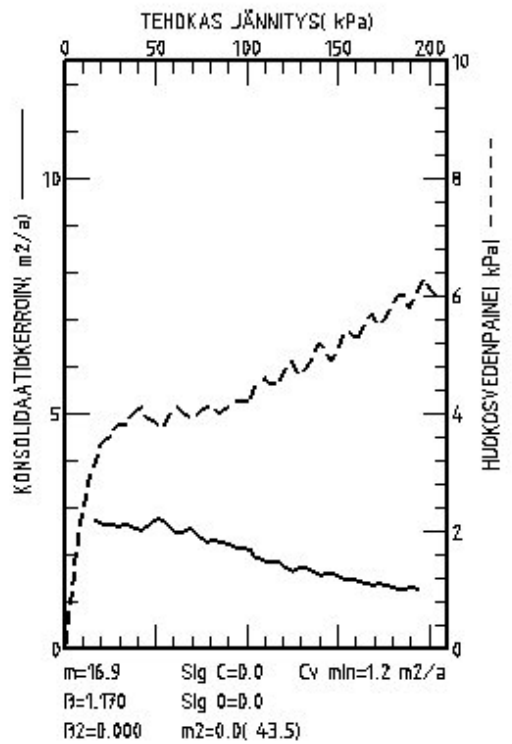
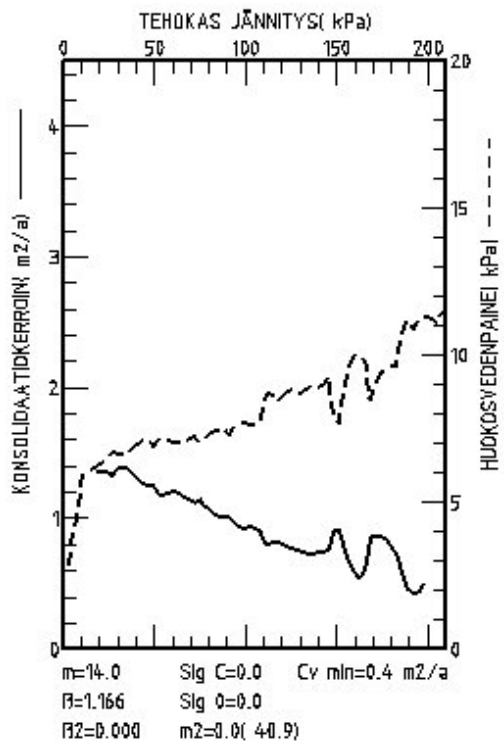
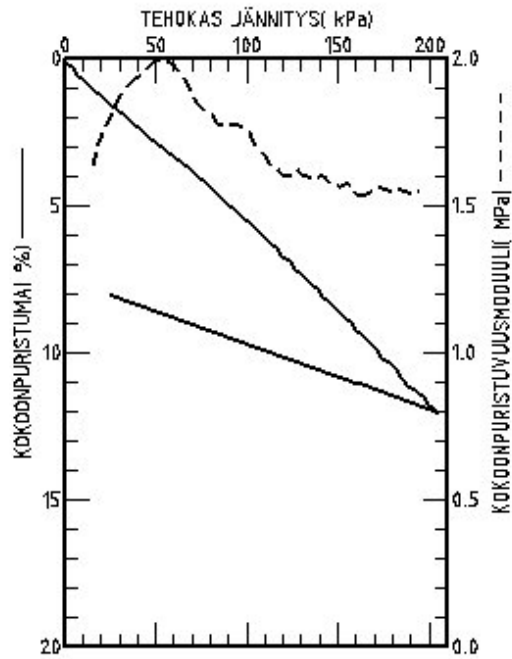
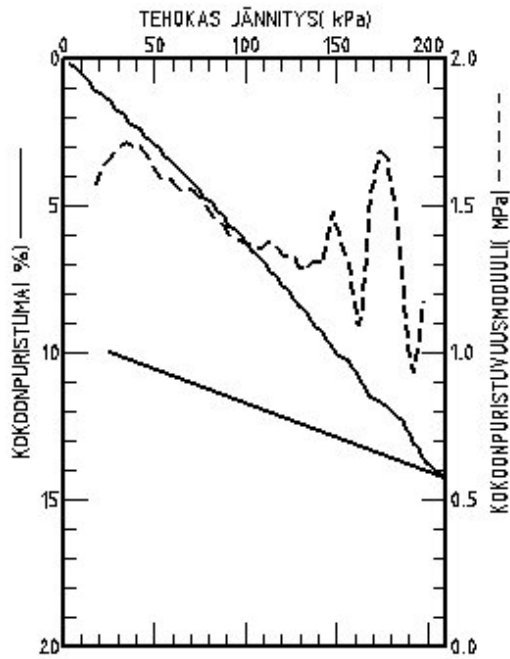
Syvyys 4.00 m  
CRS-koee .0015 mm/mln  
6678A4  
Koe pvm



LIITE E (2/4)

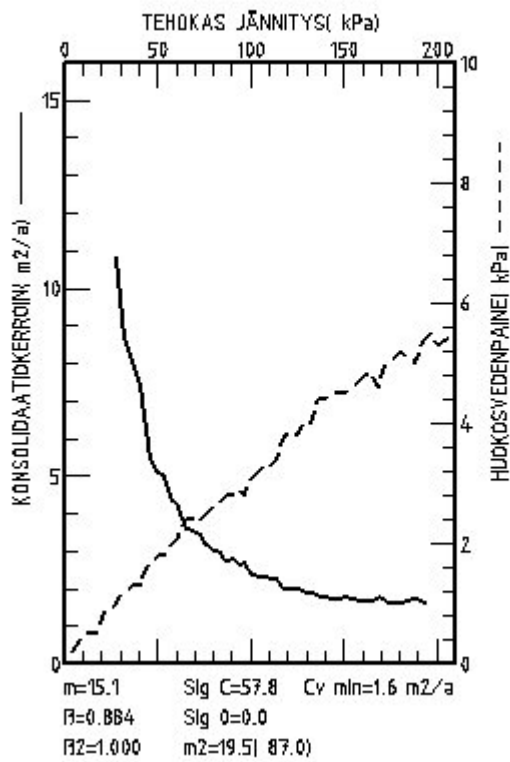
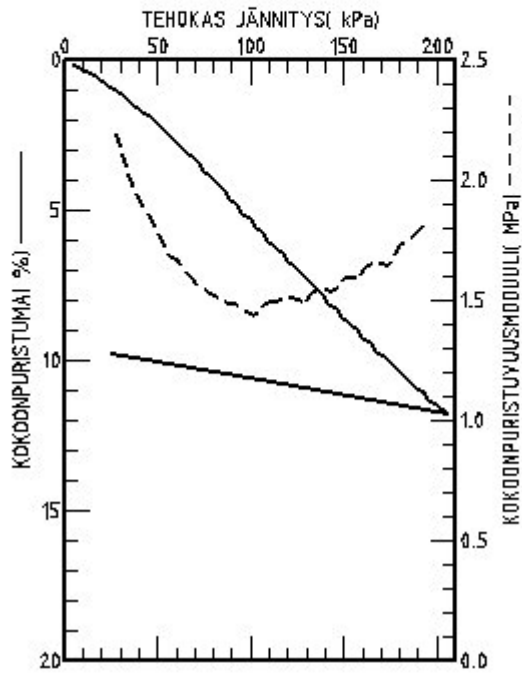
Syvyys 5.76 m  
 CRS-koee .0015 mm/mln  
 6678AS  
 Koe pvm

Syvyys 5.93 m  
 CRS-koee .0015 mm/mln  
 6678AS9  
 Koe pvm



LIITE E (3/4)

Syvyys 6.10 m  
 CRS-koee .0015 mm/mln  
 6678A61  
 Koe pvm



## LIITE E ( 4/4)

Taulukossa on esitetty Talista tehtyjen kairausten yhteydessä tehtyjen ödometrikokeiden tulokset.

taso	Vanha kairaus							Uusi kairaus						
	w%	m	$\beta$	$m_2$	$\beta_2$	$\sigma_c$	$\sigma_0$	w%	m	$\beta$	$m_2$	$\beta_2$	$\sigma_c$	$\sigma_0$
-1,79								74,6	10,6	0,44	10	1	57,3	49
-1,96								73,7	10,9	0,71		1	51,2	50
-2,0	75	6,2	-	10,8	1	60	39,8	73,5						
-3,4	90	15,4	-	17,4	1	57	48,4	55						
-3,72	94							80,5	14	1,16				
-3,89	95							49,8	16,9	1,17				
-4,06	95							78,4	15,1	0,88	19,5	1	57,8	60
-4,8	75	7,9	0,76	15	1	65	56,4	73,5						
-5,47	60	12,3	0,00	22,4	1	86	64,7	61						



## LIITE F (1/8)

## Syvästabiloidun alueen painuminen

Syvästabiloidun alueen kokonaispainuma muodostuu pilaroidun kerroksen painumasta sekä pilareiden alapuolisten kerrosten painumasta. Pilaroidun kerroksen alapuolisten kerrosten painuma lasketaan konsolidaatiopainumana /3/.

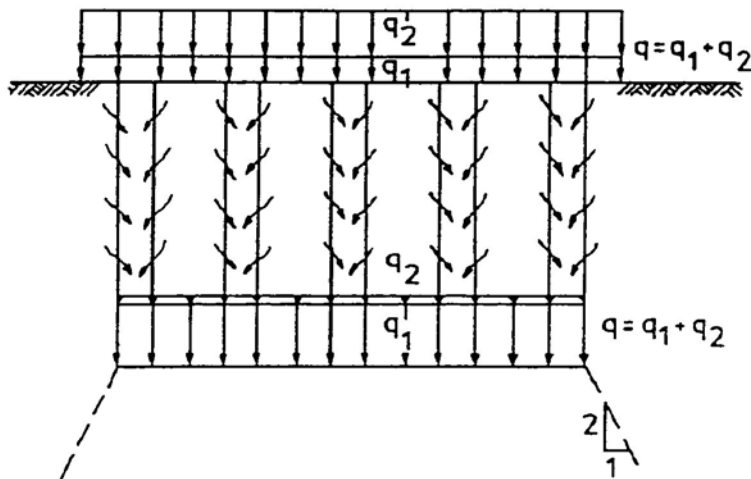
Pilaroidun kerroksen painuman laskeminen erotetaan kahteen eri tapaukseen /3/:

- Kimmoisa mitoitus, jossa pilareille tuleva kuormitus on pienempi kuin pilareiden myötörajakuorma
- Myötävä mitoitus, jossa pilareille tuleva kuormitus on suurempi kuin pilareiden myötörajakuorma.

Käytännössä painuman arviointi on epätarkka pilarien todellisen myötökäyttämisen osalta /42/.

## Kimmoisan pilarin painuman mitoitus

Syvästabiloidulla alueella kuorman oletetaan jakautuvan pilareille ja pilareita ympäröivälle maalle näiden muodonmuutosmoduulien suhteessa /3/. Kuvassa 45 on esitetty kuormien jakautuminen maapohjalle ja pilareille.



**Kuva 45 Kuormien jakautuminen pilareille ja pohjamaalle /5/.**

Tasaisen painuman periaatteen mukaisesti kuvan 44 rakenteelle tulevien kuormien tasapainoehdosta saadaan kaavan 9 mukainen yhtälö. Kaava 9 on voimassa, kun pilarien myötörajakuormaa ei ylitetä ( $\sigma_{pil} < \sigma_{myötö}$ ) /3/.

## LIITE F (2/8)

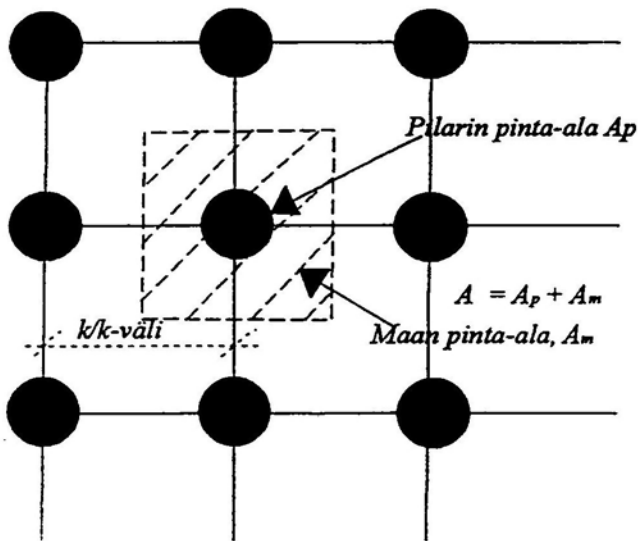
$$q_0 = \sigma_{maa} \frac{A_m}{A} + \sigma_{pil} \frac{A_p}{A} \quad (9)$$

jossa  $q_0$  on rakenteelle tuleva pysyvä kuorma  
 $\sigma_{maa}$  maalle kohdistuva jännitys  
 $\sigma_{pil}$  pilarille kohdistuva jännitys  
 $A_p$  pilarin poikkipinta-ala  
 $A_m$  maan pinta-ala poikkileikkauksessa  
 $A$  pinta-ala

Pilarin poikkipinta-ala  $A_p$  ja maan pinta-ala poikkileikkauksessa  $A_m$  muodostavat kaavan 10 /3/.

$$A = A_m + A_p \quad (10)$$

jossa  $A$  on kuvan 46 mukainen pinta-ala  
 $A_p$  pilarin poikkipinta-ala  
 $A_m$  maan pinta-ala poikkileikkauksessa



Kuva 46 Pinta-alojen  $A$ ,  $A_m$  ja  $A_p$  laskeminen,  $k/k$  on pilarien keskiöetäisyys /41/.

Pilarissa ja maassa vallitseva jännitys saadaan laskettua kaavojen 10 ja 11 mukaisesti. Pilarin jännitys

$$\sigma_{pil} = \frac{q_0}{a + (1-a)/m} \quad (10)$$

## LIITE F (3/8)

## Maan jännitys

$$\sigma_{maa} = \frac{q_0}{1 + (m-1)a} \quad (11)$$

joissa a on pilarisuhde  
 $q_0$  kuormitus  
 $m = \frac{E_{pil}}{M}$   
 $E_{pil}$  pilarin muodonmuutosmoduuli  
 $M$  maan kokoonpuristuvuusmoduuli

Maalle tuleva osuus kokonaiskuormituksesta  $q_0$  saadaan kaavasta 12 /3/.

$$q_{maa} = \left( \frac{(1-a)M}{aE_{pil} + (1-a)M} \right) q_0 \quad (12)$$

jossa a on suhteellinen pilariala  
 $M$  maan kokoonpuristuvuusmoduuli  
 $E_{pil}$  pilarin muodonmuutosmoduuli  
 $q_0$  kokonaiskuormitus

Suhteellinen pilariala a saadaan kaavasta 13 /3/.

$$a = \frac{A_p}{A_p + A_m} \quad (13)$$

jossa a on suhteellinen pilariala  
 $A_p$  pilarin pinta-ala poikkileikkauksessa ( kuva 3)  
 $A_m$  maan pinta-ala poikkileikkauksessa ( kuva 3)

Maan kokoonpuristuvuusmoduuli saadaan kaavasta 14 /17/.

$$M = 100m \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{(1-\beta)} \quad (14)$$

jossa m on moduuliluku  
 $\beta$  jännitysekspONENTTI  
 $\sigma$  maassa vallitseva pystyjännitys

Kokemusperäisesti on arvioitu kalkkisementtipilarin muodonmuutosmoduulin,  $E_{pil}$ , olevan noin 100-200- kertainen ja kalkkipilarin noin 50-150- kertainen pilarin leikkauslujuuteen verrattuna /42/.

Pilarille tuleva kuormitus saadaan vähentämällä kokonaiskuormituksesta maalle tulevan kuormituksen osuus kaavan 15 mukaisesti.

## LIITE F (4/8)

$$q_{pil} = q_0 - q_{maa} \quad (15)$$

jossa  $q_{pil}$  on pilarille tuleva osuus kuormasta  
 $q_0$  kokonaiskuormitus  
 $q_{maa}$  maalle tuleva osuus kuormasta

Pilareiden painuman laskennassa on pilareiden myötöjännitys keskeisessä asemassa. Pilarin myötöjännitys määritetään murtojännityksen perusteella kaavalla 16 /42/.

$$\sigma_{myötö} \leq 0,7\sigma_{murto} \quad (16)$$

jossa  $\sigma_{myötö}$  on pilarin myötöjännitys  
 $\sigma_{murto}$  pilarin murtojännitys

Pilarin murtojännitys,  $\sigma_{murto}$ , koostuu pilarin omasta leikkauslujuudesta,  $\tau_p$ , sekä ympäröivän maan antamasta sivuttaisesta tuesta,  $\sigma'_h$ , kaava 17 mukaisesti /42/.

$$\sigma_{murto} = [2 * \tau_p + k_h \sigma'_h] \quad (17)$$

jossa  $\sigma'_h$  on pilareihin vaikuttava tehokas vaakajännitys  
 $\tau_p$  pilarien leikkauslujuus  
 $k_h$  horisontaalijännityksen kerroin (=1)  
 $\sigma_{murto}$  pilarin murtojännitys

Pilareihin vaikuttava vaakajännitys saadaan kaavasta 18 /42/.

$$\sigma'_h = \sigma'_v + \frac{\Delta\sigma'}{2} \quad (18)$$

jossa  $\sigma'_v$  on maan pystysuora tehokas jännitys alkutilanteessa tarkasteluvuorokaudella  
 $\Delta\sigma'$  kuormituslisäys (ilman liikennekuormaa)  
 $\sigma'_h$  pilareihin vaikuttava tehokas vaakajännitys

Painuman laskennassa pilarin ja pilareiden välisen stabiloimattoman maan oletetaan painuvan yhtä paljon. Pilarien painuma lasketaan kaavalla 19 /3/.

$$s_{pil} = \frac{\Delta h q_{pil}}{a E_{pil}} \quad (19)$$

jossa  $\Delta h$  on pilarin pituus  
 $s_{pil}$  pilarin painuma  
 $q_{pil}$  pilarille tuleva osuus kokonaiskuormasta  $q_0$   
 $a$  suhteellinen pilariala  
 $E_{pil}$  pilarien muodonmuutosmoduuli

## LIITE F (5/8)

Pilarien väliin jäävän stabiloimattoman maan painuma lasketaan kaavalla 20 /3/.

$$s_{maa} = \frac{\Delta h q_{maa}}{(1-a)M} \quad (20)$$

jossa  $\Delta h$  on pilaroidun maakerroksen paksuus  
 $s_{maa}$  maalle siirtyvän kuormaosuuden aiheuttama painuma  
 $q_{maa}$  maalle tuleva osuus kokonaiskuormituksesta  $q_0$   
 $M$  maan kokoonpuristuvuusmoduuli  
 $a$  suhteellinen pilariala

Painuman laskemisen jälkeen tarkistetaan pilarijännityksen ja pilarin myötöjännityksen suhde kaavalla 21. Tässä tarkastelussa huomioidaan myös liikennekuormat /42/.

$$\frac{\sigma_{pil}}{\sigma_{myötö}} \leq 1 \quad (21)$$

jossa  $\sigma_{pil}$  on pilarin jännitys, jossa on huomioitu myös liikennekuorma  
 $\sigma_{myötö}$  pilarin myötöjännitys

Kimmoisan pilarin laskentamenetelmää käytettäessä on huomioitava muutamia reunaehtoja /42/:

- pilarin lujuuden on oltava pienempi kuin 15-kertainen pohjamaan lujuus
- pilarin lujuutta määritettäessä käsitellään lujuuden keskiarvoa kahden metrin matkalta
- pilaristabiloidun alueen vakavuus ilman stabilointia ja pilareiden asettaminen yhtenäisiksi rakenteiksi on tarkastettava
- kimmoisassa mitoituksessa pilarin sideaineen on oltava ominaisuuksiltaan tiedossa.

## Myötäävän pilarin mitoitus

Myötäävälle pilarille tuleva jännitys ylittää pilarin myötöjännityksen. Jännityksen kasvaessa myötörajan ylittävä osa jännityksestä kohdistuu stabiloimattomalle maalle. Pilarijännitys pysyy koko ajan myötöjännityksen suuruisena kaavan 22 mukaisesti /3/.

## LIITE F (6/8)

$$q_0 = \sigma_{maa} \frac{A_m}{A} + \sigma_{myötö} \frac{A_{pil}}{A} \quad (22)$$

jossa  $q_0$  on rakenteelle tuleva pysyvä kuorma  
 $\sigma_{maa}$  maalle kohdistuva jännitys  
 $\sigma_{myötö}$  pilarille kohdistuva jännitys  
 $A_p$  pilarin poikkipinta-ala  
 $A_m$  maan pinta-ala poikkileikkauksessa  
 $A$  pinta-ala

Myötävän pilarin painumamitoituksen lähtökohtana on tasaisen painuman periaate kuten kimmoisallakin pilarilla. Maalle tuleva kuormitus lasketaan myötävän pilarin tapauksessa kaavalla 23 /42/.

$$q_{maa} = q_0 - 0,7a\sigma_{murto} \quad (23)$$

jossa  $q_{maa}$  on maalle tuleva osa kuormituksesta  
 $q_0$  kokonaiskuorma  
 $a$  suhteellinen pilariala  
 $\sigma_{murto}$  pilarin puristuslujuus

Sijoittamalla maalle tuleva osa kuormituksesta  $q_{maa}$  kaavaan 20 saadaan maakerroksen painuma.

Myötävän pilarin painuma lasketaan analogisesti kimmoisan pilarin painuman kanssa. Pilarille tuleva kuorma  $q_{pil}$  korvataan pilarin myötörajakuormalla  $q_{myötö}$  kaavan 24 mukaisesti /3/.

$$s_{pil} = \frac{\Delta h q_{myötö}}{a E_{pil}} \quad (24)$$

jossa  $\Delta h$  on pilarin pituus  
 $s_{pil}$  pilarin painuma  
 $q_{myötö}$  pilarin myötökuorma  
 $a$  kaavan 8 mukaan laskettu suhteellinen pilariala  
 $E_{pil}$  pilarien muodonmuutosmoduuli

Myötävän pilarin laskennalle on asetettu seuraavia reunaehtoja /42/:

- Pilarin sideaineena on käytettävä kalkkia tai kalkkisementtiä, jossa kalkin osuus on vähintään 50%. Mikäli käytetään muita sideaineita on osoitettava näillä olevan vastaavat jäännöslujuus- ja vedenjohtavuusominaisuudet kuin kalkilla tai kalkkisementillä.
- Tarkasteltaessa 2 metrin matkalta pystysuuntaista keskiarvoa ei pilarin ljuuus saa ylittää yli 10-kertaista pohjamaanlujutta.
- Penkereen varmuuden sortumaa vastaan on oltava ilman pilareita yli 1,0-1,2. Tällöin pilareita ei tarvitse asettaa yhtenäiseksi rakenteeksi.

## LIITE F (7/8)

- Laskettu painuma ei saa geoteknisessä kerroksessa olla suurempi kuin 3% kerroksen pilaripituudesta. Penkereelle varataan painumanopeuslaskelmien mukainen yleensä vähintään 3 – 6 kk pituinen seisonta-aika ennen rakenteen kuormittamista.

Arvioitaessa kuinka paljon stabiloimalla saadaan painumia pienennettyä, käytetään kaavaa 25. Painuman pienennyssuhde,  $\beta$ , kuvaa, kuinka paljon stabiloimalla on saatu pienennettyä painumia stabiloimattomaan pohjamaahan verrattuna /3/.

$$\beta = \frac{M}{aE_{pil} + (1 - a)M} \quad (25)$$

jossa  $\beta$  on painuman pienennyssuhde  
 $M$  maan kokoonpuristuvuusmoduuli  
 $E_{pil}$  pilarin muodonmuutosmoduuli  
 $a$  suhteellinen pilariala

## Syvästabiloidun alueen painumanopeus

Laskettaessa pilaroimalla vahvistetun maapohjan painumisnopeutta oletetaan pilareiden toimivan pystyjoina. Painumisnopeus lasketaan hiekkapystyjojen laskentamenetelmien mukaisesti. Tällöin pilarin halkaisijaa pidetään pystyjojan tehokkaana halkaisijana. Huokosvedenvirtauksen oletetaan tapahtuvan vaakasuorassa suunnassa. Konsolidaatioaste  $U$  ajan  $t$  funktiona lasketaan kaavalla 26 /3/.

$$U = 1 - e^{\left(\frac{-2c_h * t}{R^2 f(n)}\right)} \quad (26)$$

jossa  $U$  on konsolidaatioaste  
 $c_h$  konsolidaatiokerroin  
 $t$  aika  
 $R$  kalkkipilarin vaikutussäde.  
 Vaikutussäde on sen ympyrän säde, jonka pinta-ala on yhtä suuri kuin yhdellä pilarilla lujitetun alueen pinta-ala.  
 $r$  pilarin säde  
 $f(n)$  kaavan 27 mukainen termi

## LIITE F (8/8)

Termi  $f(n)$  saadaan kaavasta 27 /42/.

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[ \ln(n) - 0,75 + \frac{1}{n^2} \left( 1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right] + \left[ \frac{n^2 - 1}{n^2} \frac{1}{r^2} \frac{k_{maa}}{k_{pil}} L_D^2 \right] \quad (27)$$

jossa  $n = \frac{R}{r}$

R kalkkipilarin vaikutussäde

r pilarinsäde

$k_{maa}$  maan vedenläpäisevyyskerroin

$k_{pil}$  pilarin vedenläpäisevyyskerroin

$L_D$  veden virtausmatka, puolet pilaripituudesta 2-suuntaisessa konsolidaatiossa, pilaripituus yksisuuntaisessa konsolidaatiossa

Pilarin lujittumisen seurauksena tapahtuvaa muutosta ei huomioida painumisnopeutta laskettaessa. Kuormituksen ollessa myötörajakuormaa pienempi keskittyy kuormitus ajan funktiona yhä enemmän pilareille ja painuminen tapahtuu tällöin yleensä laskettua nopeammin /39/.



Julkaisija <b>HELSINGIN KAUPUNKI</b> <b>KIINTEISTÖVIRASTO</b> <b>GEOTEKNINEN OSASTO</b> PL 2202 00099 HELSINGIN KAUPUNKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 <a href="http://www.hel.fi/kv/geo">http://www.hel.fi/kv/geo</a>		Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston julkaisut 87 /2003 Joulukuu 2003	
		Projektinumero(t) 6678	
Tekijä(t) Miia Paatsema Heikki Kangas		Julkaisija <b>HELSINGIN KAUPUNKI</b> <b>KIINTEISTÖVIRASTO</b> <b>GEOTEKNINEN OSASTO</b>	
Nimike Syvästabiloinnin pitkäaikaiset seurantatutkimukset			
Tiivistelmä  <p>Helsingissä on suurin osa pohjasuhteiltaan hyvistä rakennusalueista jo käytetty ja uudisrakentaminen on jouduttu suuntaamaan huonopohjaisille pehmeikköalueille. Tämän myötä ovat geotekniset ongelmat kasvaneet ja pohjarakennuskustannukset nousseet merkittävästi. Esirakentamisella voidaan parantaa pehmeikköalueiden laatua maarakennustekniikan keinoin ennen alueen varsinaista rakentamista. Esirakentamisella voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä pohjarakennus-, korjaus- ja kunnossapitokustannuksissa.</p> <p>Alueellisen stabilointityön tarkoituksena on ensisijaisesti rakennettavien pihojen, katujen ja putki-johtojen haitallisten painumien ehkäiseminen pitkällä aikavälillä. Esirakentamisen yhteydessä asetetaan alueelle painumakriteerit, joiden avulla varmistetaan rakenteiden toiminta ja riittävä laatutaso. Tässä työssä on kerätty mittaustietoa Helsingin Talissa sijaitsevalta syvästabiloidulta alueelta. Lisäksi esitetään Fallkullan alueen stabilointi ja painuman seurannan aloitus.</p> <p>Syvästabiloinnin laadunvalvonta on keskittynyt suurelta osin pilarointityön ja valmiin pilarin laaduntarkkailuun. Pilarikentän pitkäaikaisia muodonmuutoksia käyttökuormien vaikutuksesta on tutkittu hyvin vähän. Pitkäaikaisella painumaseurannalla pystytään yksinkertaisin mittauksin seuraamaan syvästabiloidun alueen muodonmuutoksia. Seurattavan alueen mittausohjelman tulee olla riittävän pitkä, jotta kerätty tieto on luotettavaa.</p> <p>Painuman tarkkailulla saatu tieto on arvokasta kokemusperäistä tietoa esirakennetun alueen muodonmuutoksista kuormituksen alaisena. Kerättyä tietoa voidaan hyödyntää muun muassa lähialueiden esirakentamisessa. Kokemukseen perustuvan tiedon perusteella voidaan lähialueiden tulevaa esirakentamista kehittää paremman lopputuloksen suuntaan.</p> <p>Talin alueella on painumia tapahtunut koko kymmenvuotisen mittausjakson ajan. Painumanopeus alueella on ollut huomattavasti pienempi kuin laskennallisesti arvioitu painumanopeus. Alueen mittaustuloksiin sovitettuna painumaennusteen mukaan alueen painumat tulevat jatkumaan. Sekä laskennallisesti saadut että mitatut painumat ovat alueelle asetettuja painumakriteerejä pienempiä.</p> <p>Fallkullan alueen esirakentamisen onnistumisen lopulliset tulokset tullaan saamaan pitkäaikaisin mittauksin. Tässä työssä esitetään laskennallisesti saatu arvio alueen tulevasta painumasta. Saatua arvio on alueelle annettuja painumakriteerejä pienempi.</p>			
Avainsanat Esirakentaminen, stabiloidun alueen painuminen, jälkiseuranta, Tali; Fallkulla			
ISSN 1458-2198		ISBN 952-473-195-9	Luokitus (UDK) 624.13
Kieli suomi, ruotsi, engl. tiivistelmä		Sivuja 67 s. + liitteet 25 s.	

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT <b>GEOTECHNICAL DIVISION</b> P.O Box 2202 00099 THE CITY OF HELSINKI FINLAND PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555 <a href="http://www.hel.fi/kv/geo">http://www.hel.fi/kv/geo</a>		Series title, number and date Geotechnical Division, publications 87 /2003 December 2003	
Author(s) Miia Paatsema Heikki Kangas		Project number(s) 6678	
		Commissioned by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT <b>GEOTECHNICAL DIVISION</b>	
Nimike Long time follow-up of the deep mixing			
Abstract  The city Helsinki has reached a situation where most of the areas with good ground conditions are in use. Now construction is directed to areas with more inadequate ground conditions. Due to this, geotechnical problems have grown and ground engineering costs have increased. These problems can be solved by prebuilding. Soil properties can be improved before the actual construction takes place with prebuilding. Prebuilding can also help in making substantial saves in the ground engineering, repair and maintenance costs.  The purpose of areal deep mixing in planned areas is primarily to prevent harmful long-term settlements. In the planning stage of the prebuilding settlement criteria for the area is decided. With this criteria the long-term working conditions of the structures and adequate quality is assured. In this publication the purpose is to gather information from deep mixed areas within Helsinki.  Quality control of deep mixing is mainly control of execution and the column itself. Long term behaviour under loading is fairly unknown. With simple settlement measurements settlement behaviour of the deep mixed area can be monitored. The follow-up has to be long enough for the settlements to occur and for the information to be reliable.  The settlement monitoring gives valuable practical information of the deformation behaviour in the area. The gathered information can be used for example when the neighbouring areas are being constructed. The information can then be taken into account and the new deep mixing work can be directed towards a better result.  The Tali residential area has settled steadily during the whole survey. The speed at which the settlements occur has been much slower than the estimated speed. A settlement estimate directed from the field measurements show that the area will continue to settle in the future. Calculated and estimated settlements in the Tali area are smaller than the settlement criteria.  Long- term monitoring of the Fallkulla residential area will give the answer to how the deep mixing has succeeded to prevent settlements. This publication presents the calculated estimation of the settlement in the area. Calculated value of the settlements in the area is smaller than the settlement criteria.			
Keywords Prebuilding, ground improvement, settlement of improved ground, Tali, Fallkulla			
ISSN 1458-2198		ISBN 952-473-195-9	
Kieli Finnish, Engl. Abstr.		Class (UDK) 624.13	
		Pages 67 p. + app. 25 p.	