

Hannu Halkola

SYVÄSTABILOINNIN LAADUN JA LUJUUDEN VALVONTAMENETELMÄT

Hannu Halkola

SYVÄSTABILOINNIN LAADUN JA LUJUUDEN
VALVONTAMENETELMÄT

Geoteknisen osaston tiedote 30

TIIVISTELMÄ

Tämä selvitys on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla luotettavan in-situ -menetelmän kehittämiseksi syvästabiloidun pilarin laadun eli homogeenisuuden ja lujuuden seuraamiseksi. Lisäksi tutkittiin kalkilla ja kipsikalkilla syvästabiloidun saven lyhytaikaislujuuttamista erilaisilla kenttä- sekä laboratoriotutkimusvälineillä. Pääosin selvitys perustuu Helsingissä Torpparinmäen ja Myllypuron koerakentamiskohteissa tehtyihin tutkimuksiin.

Torpparinmäessä tutkittiin paino- ja puristinkairan, siipikairan sekä ruuvikompressiometrin soveltuvuutta kalkki- ja kipsikalkkipilarien seurantaan. Myllypurossa vertailtiin stabiloitujen pilarien seurantaan suunniteltujen pilarikairan ja $130 \times 65 \text{ mm}^2$ (D x h) pilarisiipikairan ominaisuuksia kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien laadun ja lujuuden tutkimisessa.

In-situ -tuloksen vertailemiseksi tehtiin laboratoriossa puristuskokeita stabilointikoekappaleilla. Lisäksi sekä pieniä että isoja pilarinäytteitä koestettiin eri menetelmillä.

Selvityksen tulokset tukivat käsitystä, että perinteiset kairausmenetelmät eivät sovellu stabiloitujen pilarien tutkimiseen. Pilarikairalla saadaan pilarin tekotavasta johdettavat mahdolliset heikkousvyöhykkeet selville ja se soveltuu sen vuoksi pilarien laadun ja lujuuskehityksen valvontaan. Lujuusparametreja pilarikairalla ei voida määrittää, tähän tarkoitukseen soveltuu pilarisiipikaira.

Selvityksen perusteella ovat laboratoriossa suoritettujen stabilointikokeiden tulokset epäluotettavia. Kokeiden yhteydessä saatiin tietoa stabilointiaineena käytetyn kalkin ja kipsikalkin eroista sekä valmiin pilarin rakenteesta ja lujuudesta. Tutkimusten pohjalta on esitetty tarvittavat jatkoselvitykset. Selvityksen loppuun on laadittu suositus syvästabiloinnin tutkimiseen soveltuvista menetelmistä.

ABSTRACT

This report is done at the Geotechnical Department of the City of Helsinki for development and comparison of reliable quality and strength investigation methods of deep-stabilized columns. Also the strength development of lime- and gypsum-lime-columns was investigated with in-situ and laboratory methods. The report is mainly based on field investigations at Torpparinmäki and Myllypuro test-areas in Helsinki.

At Torpparinmäki a study was made of the applicability of Swedish weight-sounding, penetration test, vane bore and field compressometer in the investigation of stabilized columns. At Myllypuro a 130 x 65 mm² (D x h) column-vane and a column-penetrometer intended for follow-up observations were compared in investigations of the quality and strength of the columns. In comparison to field investigations, stabilization tests were performed with clay in laboratory, where also both small and large samples taken from stabilized columns were tested with different methods.

The results of the study support the opinion that traditional field investigation methods are unsuitable for deep-stabilized columns. The column-penetrometer exposes possible weak zones in stabilized columns and is therefore well suited to making observations of the quality of the columns. Strength parameters can not be determined by column-penetrometer, the column-vane proved to be suitable to that purpose.

On the basis of information obtained, laboratory results of stabilized samples are unreliable. Also important information was obtained about differences of lime and gypsumlime as stabilization material, and about the structure and strength values of stabilized columns.

Necessary further investigations are suggested in the report, also recommendations of suitable investigation methods for stabilized columns are included.

ALKUSANAT

Helsingin kaupunki on käyttänyt sammuttamatonta kalkkia hyväksi käytävää syvästabilointimenetelmää lähinnä kunnallisteknisiin kohteisiin jo vuodesta 1976 lähtien. Kohteissa suoritettut painumaseurantamittaukset osoittavat syvästabiloinnin käyttökelpoisuuden helsinkiläisillä savialueilla. Huolimatta hyvistä seurantamittauksista syvästabilointiin on liittynyt vielä paljon kehitystyötä, jolla voidaan lisätä menetelmän parempaa hallintaa ja taloudellisuutta.

Tärkeimmistä syvästabiloinnin kehitystyöistä voidaan mainita mm. syvästabilointilaitteiston kehittäminen, parempien stabilointiaineiden tutkiminen, laboratoriomenetelmien kehittäminen, mitoitusmenetelmien kehittäminen sekä maastossa suoritettavien in-situ tutkimusten ja valvontamittausten kehittäminen. Vuonna 1980 perustettiin ns. SYSTA(syvästabilointi)-projekti, jonka päätarkoituksena on ollut tutkia uusien stabilointiaineiden, erityisesti kipsi-kalkin soveltuvuus syvästabilointiin. Tätä varten rakennettiin myös Helsingissä muutamia koerakennuskohteita. Systs-projektin koordinointi ja ohjaus on tapahtunut Oulun Yliopiston toimesta. Helsingin kaupungin koerakennuskohteisiin ovat Helsingin kaupungin geoteknisen osaston ja Oulun Yliopiston lisäksi merkittävästi osallistuneet VTT/geotekniikan laboratorio, Vesto Oy sekä Partek Oy.

Tämä tiedote on osa SYSTA-projektin työstä. Työ on samalla DI Hannu Halkolan diplomityö. Tässä tutkimuksessa on selvitetty kalkkipilarin tutkimiseen soveltuvia in-situ tutkimuslaitteita ja kehitetty tutkimiseen soveltuvaa laitteistoa. Tämän työn ansiosta ovat tällä hetkellä geoteknisen osaston käytössä pilari-siipikaira ja syvästabilointisondi (pilari-kaira). Lisäksi tässä tutkimuksessa esitetään Torpparinmäen ja Myllypuron koerakennuskohteista saatuja in-situ tutkimustuloksia, joita on edelleen verrattu laboratoriossa saatuihin

tuloksiin. Varsin oleellinen tulos tästä vertailusta on syvästabiloinnissa jo totutuilla laboratoriotutkimusmenetelmillä ja in-situ tutkimuksilla saatujen tulosten välillä vallitsevan epäjohdonmukaisuuden toteaminen. Tämä tutkimus osoittaa in-situ tutkimuksilla olevan entistä suuremman merkityksen syvästabiloinnin käyttökelpoisuutta harkittaessa.

Helsingissä 29.9.1982



Pentti Lahtinen

apulaisosastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

MERKINNÄT

1.	JOHDANTO.....	1
2.	SYVÄSTABILOINTI.....	2
2.1	Stabilointiaineet.....	2
2.11	Kalkki.....	2
2.12	Kipsikalkki.....	3
2.13	Muut stabilointiaineet.....	4
2.2	Syvästabilointi.....	4
2.21	Rakentaminen.....	4
2.22	Stabiloidun pilarin ominaisuudet.....	4
2.3	Syvästabiloinnin käyttöalueet.....	8
2.31	Stabiloitavan maan vaikutus.....	8
2.32	Käyttökohteet.....	10
3.	KOERAKENTAMISKOHTEET.....	11
3.1	Aikaisemmat koerakentamiskohteet.....	11
3.2	Torpparinmäki.....	11
3.3	Myllypuro.....	15
4.	NÄYTTEIDEN OTTO.....	19
4.1	Näytteet mäntäkairalla.....	19
4.2	Pilarinäytteet.....	19
5.	PURISTINKAIRAUKSET.....	23
5.1	Kairausmonitoimikone, A-sondi.....	23
5.2	Tavallinen puristinkaira.....	24
5.21	Laitteisto.....	24
5.22	Kairaustulokset.....	25
5.3	Pilarikaira.....	26
5.31	Laitteisto ja kairausten suoritus.....	26
5.32	Kairaustulokset.....	29
6.	KUORMITUSKOKEET.....	33
6.1	Levykuormituskoe.....	33
6.11	Laitteisto ja kokeen suoritus.....	33
6.12	Koetulokset.....	34

6.2	Ruuvikompressiometrikokeet.....	35
6.21	Laitteisto.....	35
6.22	Stabiloitujen pilarien koestus.....	37
6.23	Myötöjännityksen määrittäminen.....	38
6.24	Koetulokset.....	39
7.	SIIPIKAIRAUKSET.....	43
7.1	Leikkauslujuuden määrittäminen siipikairalla.	43
7.2	Stabiloitujen pilarien koestus tavallisella siipikairalla.....	43
7.21	Laitteisto.....	43
7.22	Koetulokset.....	44
7.3	Stabiloitujen pilarien koestus pilarisiipi- kairalla.....	47
7.31	Laitteisto.....	47
7.32	Koetulokset.....	49
8.	LABORATORIOTUTKIMUKSET.....	55
8.1	Maalajien indeksiominaisuudet.....	55
8.2	Stabilointikoekappaleiden valmistus.....	55
8.3	Puristuskokeet.....	56
8.31	Stabilointikoekappaleet.....	56
8.32	Kokonaiset pilarit.....	61
8.4	Kolmiakselikokeet.....	64
8.5	Rasialeikkaukset.....	66
8.6	Kartiokokeet.....	68
9.	IN-SITU- JA LABORATORIOTULOSTEN VERTAILU.....	70
9.1	Torpparinmäen koerakentamiskohde.....	70
9.2	Myllypuron koerakentamiskohde.....	72
9.3	Yhteenvedo tuloksista.....	77
10.	SUOSITUS SYVÄSTABILOINNIN TUTKIMUSMENETELMISTÄ....	81
10.1	Stabilointikokeet.....	81
10.11	Koekappaleiden valmistus ja säilytys..	81
10.12	Koestus.....	81
10.2	Laadunvalvonta.....	81
10.21	Kairaukset pilarikairalla.....	81
10.22	Näytteiden otto ja koestus.....	82
10.3	Suunnitteluparametrien määrittäminen.....	83
10.31	Myötökuorma.....	83
10.32	Leikkauslujuus.....	83
10.33	Kokoonpuristuvuus.....	84
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	86

MERKINNÄT

B	ruuvikompressiometrin kuormitusruuvin halkaisija, m
C_1	integroimisvakio
D	siipikairan siiven halkaisija, m
F_p	puristinkairausten kokonaisvastus, kN
F_s	puristinkairausten vaippavastus, kN
H_u	humuspitoisuus, %
I_p	plastisuusluku, %
M	siipikairan siiven kiertämiseen tarvittava momentti, kNm
M_f	siipikairan vaippahankausta vastaava momentti, kNm
M_s	siipikairan siiven ja tankojen kiertämiseen tarvittava momentti, kNm
S	ruuvikompressiometrin kuormitusruuvin painuma, mm
a_1, b_1	vakioita ruuvikompressiometrin ruuvin painumaa kuvaavassa yhtälössä
c'	tehokas koheesio, kPa
h	korkeus, m
m	moduliluku
q	kuormitus, kPa
q_p	puristinkairan kärkivastus, kPa
q_r	myötökuormitus, kPa
q_v	vertailukuormitus, kPa
s_v	leikkauslujuus siipikairalla, kPa
t	aika, vrk
t_{90}	aika, 90 vrk
w	vesipitoisuus, %
w_1	juoksuraja, %

z	syvyys, m
Δx	sivusiirtymä, mm
γ	tilavuuspaino, kN/m ³
ϵ	suhteellinen painuma, %
ϵ_1	muodonmuutos pystytasossa, %
ϕ	tehokas kitkakulma
σ	n-painotteinen keskihajonta, %
σ_1	jännitys pystytasossa, kPa
σ'	tehokas jännitys, kPa
σ_0	tehokas esijännitys maassa, kPa
σ'_n	tehokas nettojännitys, kPa
σ_3	sivupaine, kPa
σ_r	myötöjännitys, kPa
σ_v	vertailujännitys, kPa
\emptyset	läpimitta, mm
τ	leikkauslujuus, kPa

1. JOHDANTO

Maahan tehdyt syvästabiloidut pilarit ovat tekotavasta johtuen epähomogeenisia, joskus voi esiintyä jopa katkoja, joissa maa ei ole stabiloitunut esim. stabilointiaineen puuttumisen vuoksi. Pilarien laadun ja lujuuden seurantaan käytetyt perinteiset pohjatutkimusmenetelmät ovat osoittautuneet aikaisemmin Ruotsissa ja Suomessa tehdyissä selvityksissä epäluotettaviksi. Tämän vuoksi käynnistettiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston toimesta tämä selvitys in-situ menetelmien kehittämiseksi stabiloitujen pilarien seurantatutkimusta varten.

Pääosiltaan työ perustuu Helsingissä Torpparinmäen ja Myllypuron koerakentamiskohteissa perinteisillä pohjatutkimusvälineillä sekä syvästabiloitujen pilarien koestamiseen suunnitelluilla laitteilla saatuihin kairaus-tuloksiin. Tuloksia verrattiin kohteiden seurannan yhteydessä tehtyihin laboratoriotuloksiin.

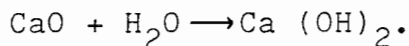
Erilaisten in-situ menetelmien lisäksi selvitettiin kalkilla ja kipsikalkilla syvästabiloitujen pilarien lujittumista Torpparinmäessä 0 - 270 vrk ja Myllypurossa 0 - 90 vrk aikana, koska pilarien lujittumisnopeutta on aikaisemmin seurattu pääasiassa laboratorio-olosuhteissa. Selvityksen lopussa esitetään suositus syvästabiloiduille pilareille soveltuvista tutkimusmenetelmistä saatujen kokemusten pohjalta.

- 2. SYVÄSTABILOINTI
- 2.1 Stabilointiaineet
- 2.11 Kalkki

Kalkkisyvästabiloinnissa käytetään stabilointiaineena sammuttamatonta kalkkia. Stabiloitavan maan lujittuminen aiheutuu sammuttamattomassa kalkissa olevan CaO:n reaktioista, joita ovat

- 1) sammutusprosessi
- 2) ioninvaihtoreaktio
- 3) putsolaanireaktiot.

Sammutusprosessi alkaa heti sekoittamisen jälkeen, kun kalkki reagoi maassa olevan veden kanssa sitoen sitä, jolloin syntyy kalsiumhydroksidia



Samalla maan vesipitoisuus alenee /12/. Reaktio etenee lämmönkehityksen myötä. Lämpötila stabiloidussa pilarissa voi nousta 10 - 15^o C ensimmäisen puolen tunnin aikana, jonka jälkeen lämpötila laskee ympäröivän maan lämpötilan tasolle. Maan vesipitoisuus voi alentua myös lämmön vaikutuksesta /12/. Sammutusprosessissa, joka päättyy noin tunnin kuluttua sekoittamisesta, nousee maan pH-arvo. Alkavalle ioninvaihtoreaktiolle on edellytyksenä korkea pH-arvo, vähintään 8.

Ioninvaihtoreaktiossa tapahtuu maan rakenteessa muutos. Reaktio alkaa samanaikaisesti sammutusprosessin kanssa. Savimineraalien ioninvaihtokyky tekee mahdolliseksi nopean alkulujittumisen. Reaktiossa kalkki pienentää savimineraalien välisten vesikerrosten paksuutta, jolloin kalkki dissosioituu osittain kalsium (Ca²⁺) ja OH-ioneiksi, jolloin tapahtuu ioninvaihto savihiukkasissa olevien

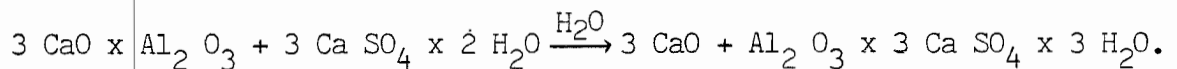
natrium (Na^+), kalium (K^+), magnesium (Mg^+) ja vetyionien (H^+) kanssa. Savi koaguloituu suuremmiksi ryhmiiksi, aggregaateiksi, jotka ovat välittömässä kosketuksessa keskenään, ja osa vedestä muuttuu passiiviseksi huokosvedeksi. Reaktio tapahtuu pääasiallisesti ensimmäisten vuorokausien aikana kalkin sekoittamisen jälkeen. /12/

Putsolaanireaktiot alkavat samanaikaisesti ioninvaihtoreaktion kanssa ja jatkuvat useita vuosia. Reaktiossa kalkki reagoi maassa olevien erilaisten silikaattien ja aluminaattien sekä piihapon kanssa. Näin muodostuu geeli, joka sitoo saviaggregaatit betonimaiseksi massaksi. Putsolaanireaktioista aiheutuva saven lujuuden lisäys vaihtelee eri savilajeilla. Useimmilla savilla kehittyä lujuus nopeimmin ensimmäisten 3 kuukauden aikana, jolloin voidaan saavuttaa 2/3 yhden vuoden lujuudesta. /12/

2.12 Kipsikalkki

Pelkällä kipsillä stabiloitaessa eivät saadut lujuuden lisäykset ole olleet merkittäviä. Kalkin lisäyksen vaikutuksesta maan pH-arvo nousee, ja myös kipsi osallistuu ioninvaihdosreaktioihin luovuttamalla Ca^{2+} -ioneja. Osa kipsin sisältämästä hemihydraatista $2 \text{CaSO}_4 + 1/2 \text{H}_2\text{O}$ muodostaa sulfoaluminaatteja tai -silikaatteja saviaineksen kanssa, mikä antaa lisälujuutta seokseen. /16/

Kun kipsi reagoi kalsiumaluminaattien kanssa, syntyy alhaisissa lämpötiloissa muodostuva sementtimineraali kalsiumtrialuminaatti eli ettringiitti.



Tällöin muuttuu kiintoaineksen tilavuus, koska kidevesimäärä lisääntyy. Ettringiitti on lujittava aine silloin, kun lujittumisreaktiot tapahtuvat hitaasti, kuten kipsikalkilla stabiloitaessa.

2.13 Muut stabilointiaineet

Plastisissa savissa sekä silteissä on todettu lentotuhkan lisäämisen kalkkiin parantavan lujittumista sekä vähentävän kokoonpuristuvuutta. /4/, /16/

Japanissa on käytetty kalkin ohella sementtiä stabilointiaineena stabiloitaessa siltti- ja hiekkakerroksia. /17/

2.2 Syvästabilointi

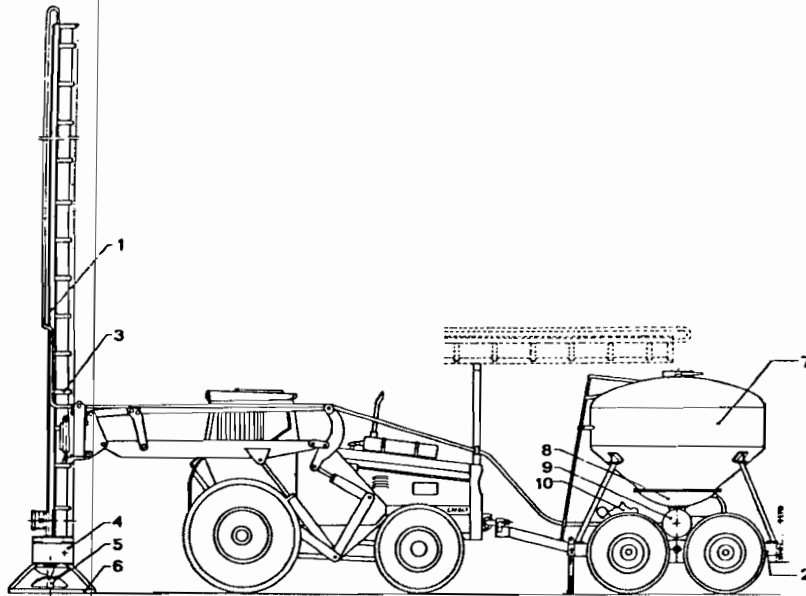
2.21 Rakentaminen

Syvästabiloinnin kalkkipilarimenetelmällä kehitti Kjeld Paus 1967 /12/, jolloin valmistettiin kalkkipilarikoneen ensimmäinen prototyyppi, jonka jälkeen laitteistoa on kehitetty useaan otteeseen 1970-luvulla. Japanissa on kehitetty oma syvästabilointilaitteisto /17/. Ruotsissa on käytössä jo ns. 4-polven koneita, LPS-4, kun Suomessa on käytössä 2 -polven koneet, LPS-2. Kone koostuu peruskoneesta, siihen kiinnitetystä mastosta sekä perävaunusta, jossa on kalkkisäiliö sekä kompressori (kuva 1). Uudemmissa koneissa on etuna pienempi pohjapaine, joka helpottaa liikumista, stabilointimaston suurempi kallistuskulma, parempi stabilointiaineen syöttö sekä stabilointiainemenekin automaattinen rekisteröintilaitteisto. Syvästabiloidun pilarin valmistusperiaate esitetään kuvassa 2. Menetelmä on vielä osittain kehittelyasteella.

2.22 Stabiloidun pilarin ominaisuudet

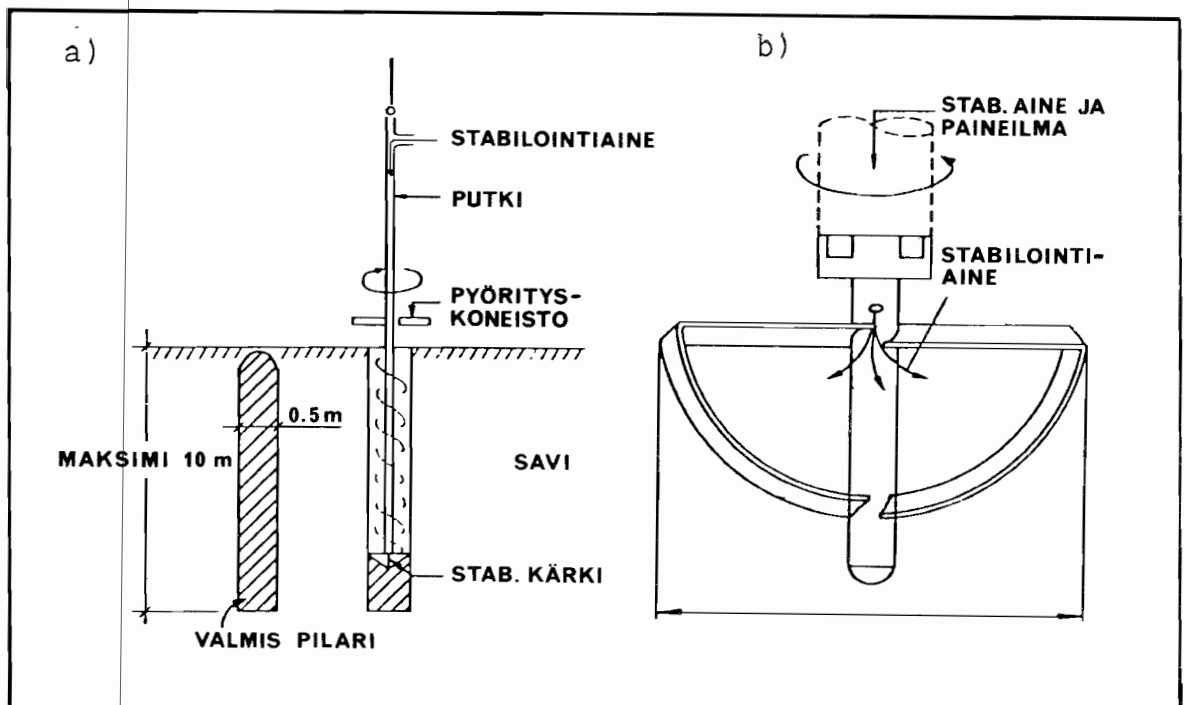
Syvästabiloinnissa muuttuvat maan ominaisuudet. Eniten muuttuu leikkauslujuus, joka suurenee, ja kokoonpuristuvuus, joka pienenee. Lisäksi vesipitoisuus pienenee ja vedenläpäisevyys kasvaa. Vedenläpäisevyyden kasvu johtuu rakeisuuden muuttumisen lisäksi pilarien epähomogeenisuudesta. Stabilointituloksen parantuessa vedenläpäisevyys todennäköisesti pienenee.

Syvästabiloidun pilarin ominaisuudet riippuvat maaperän ja käytetyn stabilointiaineen lisäksi stabilointikärkikappaleesta. Ruotsissa suoritettussa tutkimuksessa /5/ verrattiin

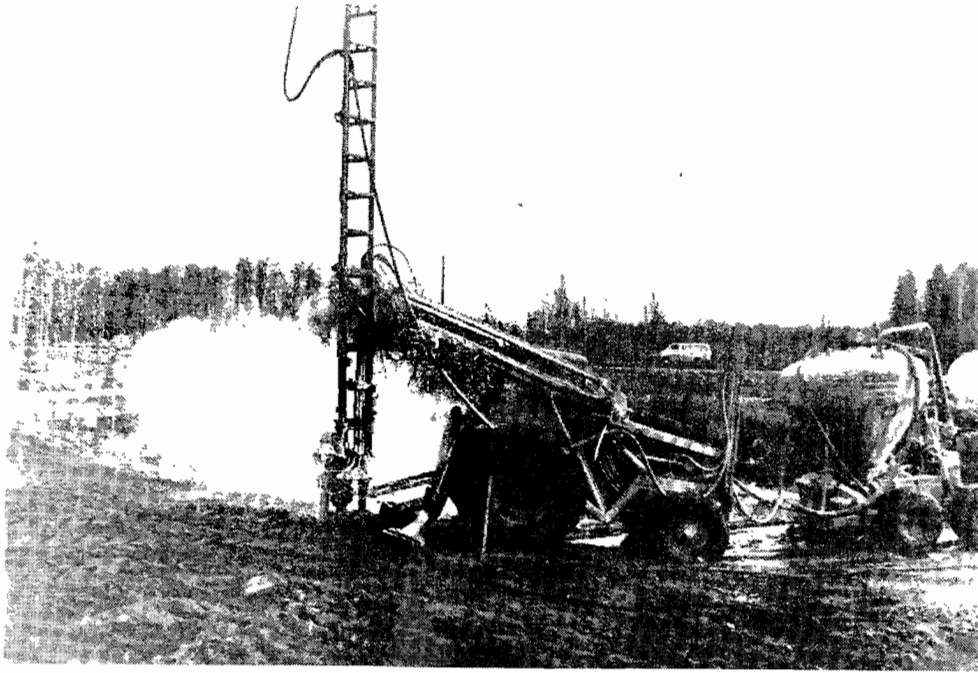


Kuva 1. Syvästabilointikone LPS-2 /1/.

- | | |
|----|------------------|
| 1 | Mastoyksikkö |
| 2 | Perävaunu |
| 3 | Masto |
| 4 | Pyörityskoneisto |
| 5 | Stabilointikärki |
| 6 | Tuki |
| 7 | Säiliö |
| 8 | Nesteyttäjä |
| 9 | Syöttölaite |
| 10 | Kompressor |

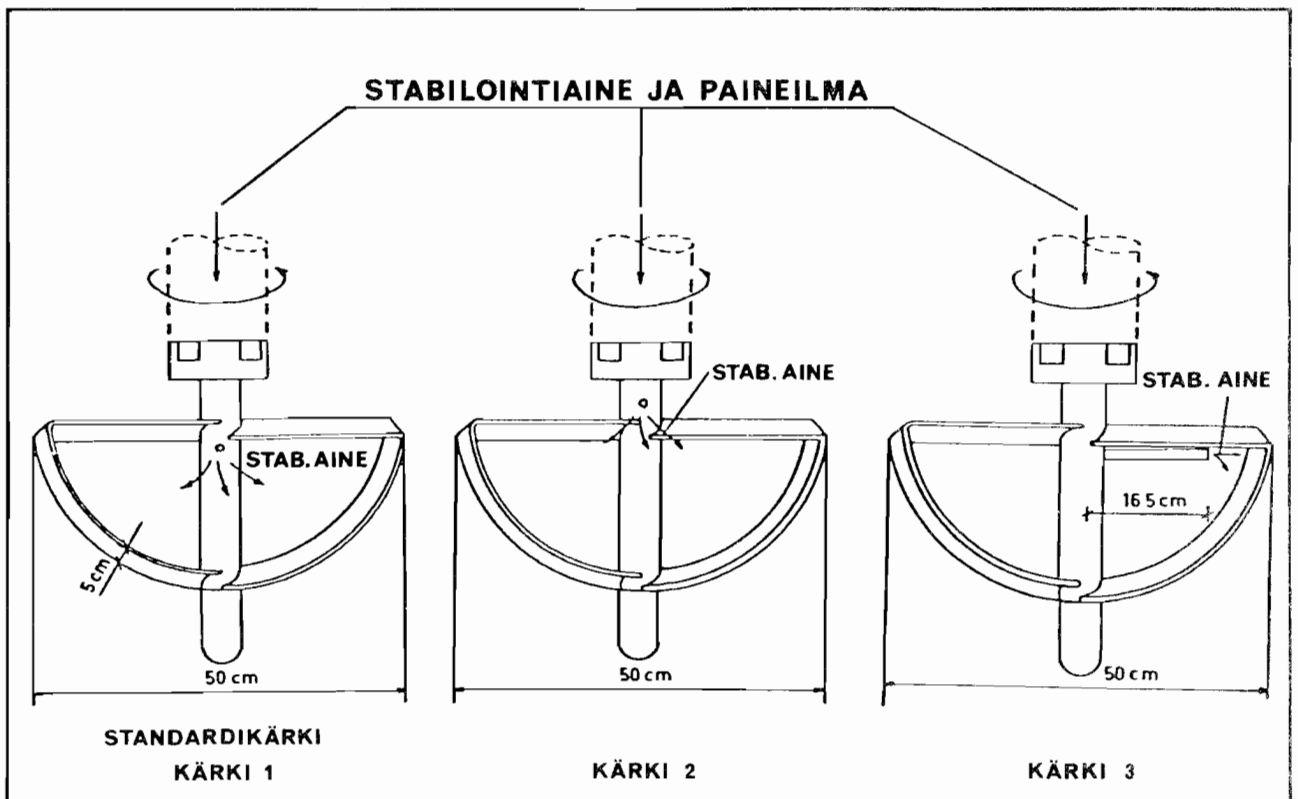


Kuva 2. a) Syvästabiloinnin periaate, b) Syvästabilointikärki /4/.



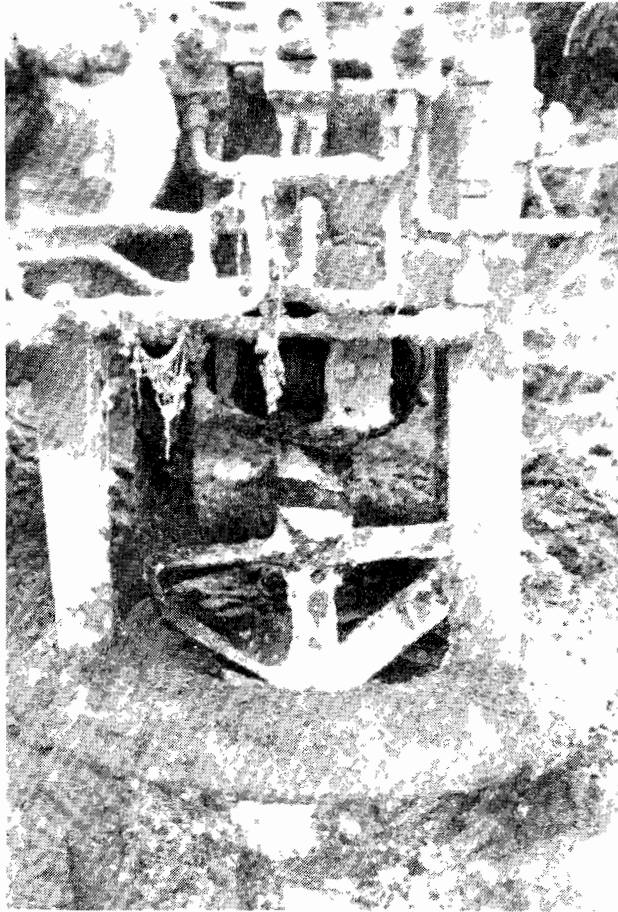
Kuva 3. Myllypuro. Syvästabilointikone LPS-2.

kolmella erityyppisellä kärkikappaleella (kuva 4) tehtyjen pilarien lujuuksia. Paras tulos saavutettiin kärjellä n:o 2, kuvassa 4, jossa stabilointiaine purkautuu kärjen siipien yläpuolelta.



Kuva 4. Ruotsissa kokeiltuja syvästabilointikoneen stabilointikärkiä /5/.

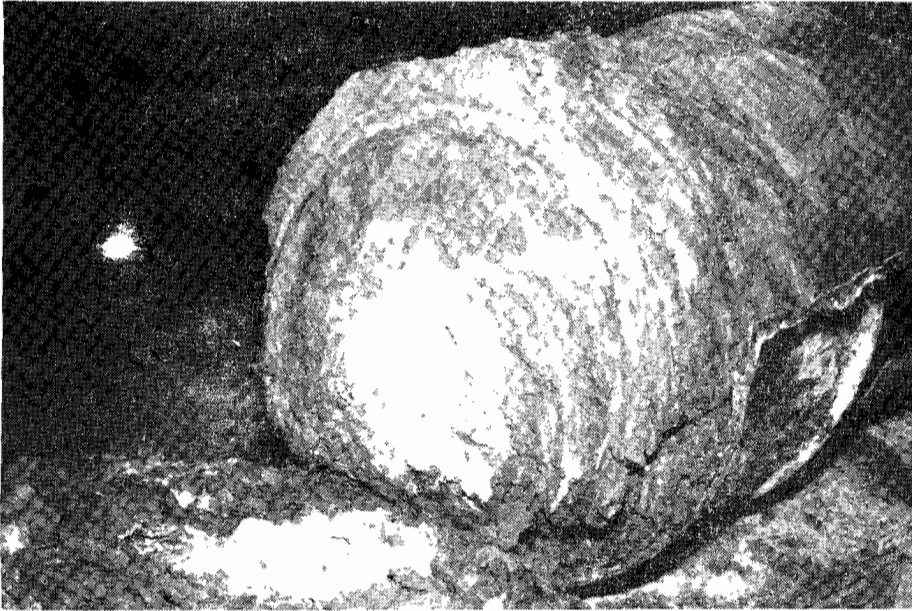
Suomessa tehdyt pilarit on toistaiseksi tehty käyttäen standardikärkeä (n:o 1, kuvassa 4, kuva 5), jossa stabilointiaineen purkuaukko on siipien alapuolella.



Kuva 5. Myllypuro. Suomessa käytetty stabilointikärki.

Kokonaisia pilareita poikkileikkattaessa on havaittu stabilointiainetta olevan runsaasti pilarin keskellä \emptyset 20 cm suuruisella alueella. Tämä alue on selvästi pehmeämpi ja vettä läpäisevämpi kuin muu osa poikkileikkauksesta. Pilarin epähomogeenisuus käy hyvin ilmi kuvasta 6. Kuvasta ilmenee lisäksi pilarin kerroksellinen rakenne sekä murtumistapa.

Tutkittaessa stabiloituja pilareita havaittiin, että pilarien halkaisija oli pienempi kuin 500 mm, keskimäärin noin 450 mm. Tämä johtuu mm. kärkikappaleen kulumisesta ja lisäksi todennäköisesti stabilointiaineen purkuaukon sijainnista; kun purkuaukko on ollut kärkikappaleen siipien alapuolella, eivät siivet ole pystyneet sekoittamaan stabilointiainetta riittävästi sivulle, ja syntynyt pilari jää



Kuva 6. Katkaistu kalkkistabiloitu pilari.

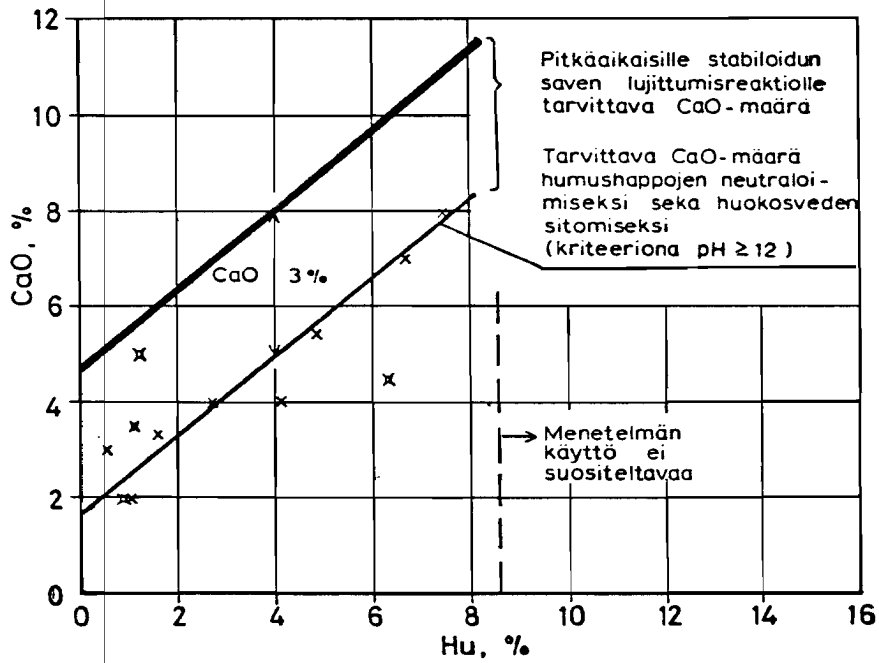
halkaisijaltaan pienemmäksi kuin kärkikappaleen halkaisija. Tätä kirjoitettaessa (maaliskuu 1982) on Vesto Oy:llä ja Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla käynnissä tutkimus, jossa selvitetään stabilointiaineen purkuaukon optimisijaintia.

2.3 Syvästabiloinnin käyttöalueet

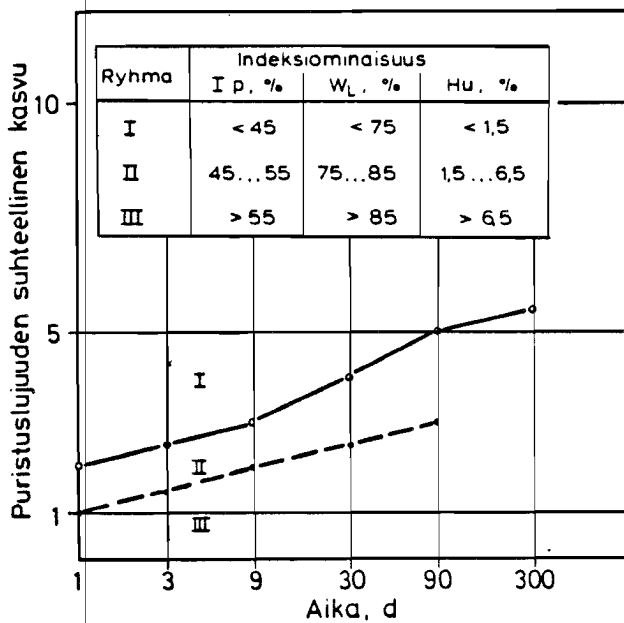
2.31 Stabiloitavan maan vaikutus

Kalkkia stabilointiaineena käytettäessä on todettu lujuuden kasvun riippuvan mm. maan vesipitoisuudesta sekä humuspitoisuudesta /14/. Kuvassa 7 esitetään stabilointiin tarvittava CaO määrä humuspitoisuuden funktiona /14/, kun reaktioihin tarvittavana pH-arvona pidetään 12. Tulokset on saatu laboratoriokokeiden perusteella.

Rathmayer /14/ on jakanut savi- ja silttimaalajit ryhmittäin lujittumisen suhteen kolmeen eri ryhmään, kun stabilointiaineena käytetään kalkkia. Jako ryhmiin perustuu laboratoriokokeisiin, joissa tutkittujen savinäytteiden humuspitoisuus vaihteli välillä 0.5 - 8 %, plastisuusluku I_p välillä 6 - 130 ja juoksuraja w_1 välillä 25 - 175 %. Tutkitut maalajit edustivat suurimmaksi osaksi Litorina- ja Ancycluskerrostumia (kuva 8) /14/.



Kuva 7. Stabilointiin tarvittava CaO-määrä humuspitoisuuden funktiona /14/.



Kuva 8. Kalkilla stabiloidun savinäytteen suhteellinen lujuuden kasvu eri stabiloitavuusryhmissä /14/.

Kipsikalkkia stabilointiaineena käytettäessä on laboratoriossa /8/ sekä kenttäkokeissa /13/ saavutettu hyviä lujitustuloksia myös humuspitoisessa savessa, jonka vesipitoisuus on > 85 %. Stabilointiin käytettiin aluksi dihydraattimuodossa olevaa jättekipsiä $\text{Ca SO}_4 \times 2 \text{ H}_2\text{O}$ sekoitettuna sammuttamattomaan kalkkiin, mutta vaikka stabilointitulokset olivat lupaavia, ei stabilointiaine soveltunut työmaalle. Kidevedellinen kipsi reagoi jo stabilointikoneen säiliössä CaO:n kanssa, kuumeni ja tarttui osittain kiinni säiliöön. Hemihydraattimuodossa oleva kipsi $\text{CaSO}_4 + 1/2 \text{ H}_2\text{O}$ on sitä vastoin soveltunut työmaalle hyvin sisältämänsä pienen kidevesimäärän vuoksi.

2.32 Käyttökohteet

Syvästabilointi on taloudellinen vaihtoehto perinteisille menetelmille kuten paalutukselle silloin, kun kuormat eivät ole suuria ja rakenteelle sallitaan pieniä painumia. Toisaalta stabiloinnin maksimisyvyys on koneesta johtuen tois-
taiseksi 10 m. Syvästabiloinnilla voidaan rakenteen painumia ja painumaeroja huomattavasti vähentää luonnolliseen maanvaraan perustamiseen verrattuna. Tämän perusteella syvästabilointi soveltuu tie- ja ratapenkereiden, piha- ja varastoalueiden, putkijohtojen sekä tietyissä tapauksissa kevyiden rakennusten perustamiseen. Koska stabilointi nostaa maan keskimääräistä leikkauslujuutta, voidaan sitä käyttää myös luiskien ja penkereiden vakavuuden parantamiseen sekä kaivantojen tukemiseen.

3. KOERAKENTAMISKOHTEET

3.1 Aikaisemmat koerakentamiskohteet

Helsingin Itäkeskuksessa suoritettiin 1974 - 1976 ensimmäiset syvästabiloinnin kenttäkokeet Suomessa /15/. Itäkeskuksen kenttäkokeiden jatkona tehdyistä metroradan Roihuvuoren kalkkistabilointikoealueiden kenttäkokeista v. 1976 on tässä työssä käsitelty levykuormituskokeita kohdassa 5.23. Itäkeskuksen ja Roihuvuoren kokemuksien pohjalta julkaisivat Hartikainen ja Lahtinen artikkelin (Rakennustekniikka 1977:1), jota voidaan pitää avauksena kalkkipilarimenetelmän käytölle Suomessa.

Ruotsissa tehtiin 1970-luvun lopulla laajoja kenttäkokeita, joissa selvitettiin kalkkistabiloinnin soveltuvuutta erilaisiin rakenteisiin. Tuloksia on esitetty mm. lähteissä /3/, /5/, /10/ ja /12/.

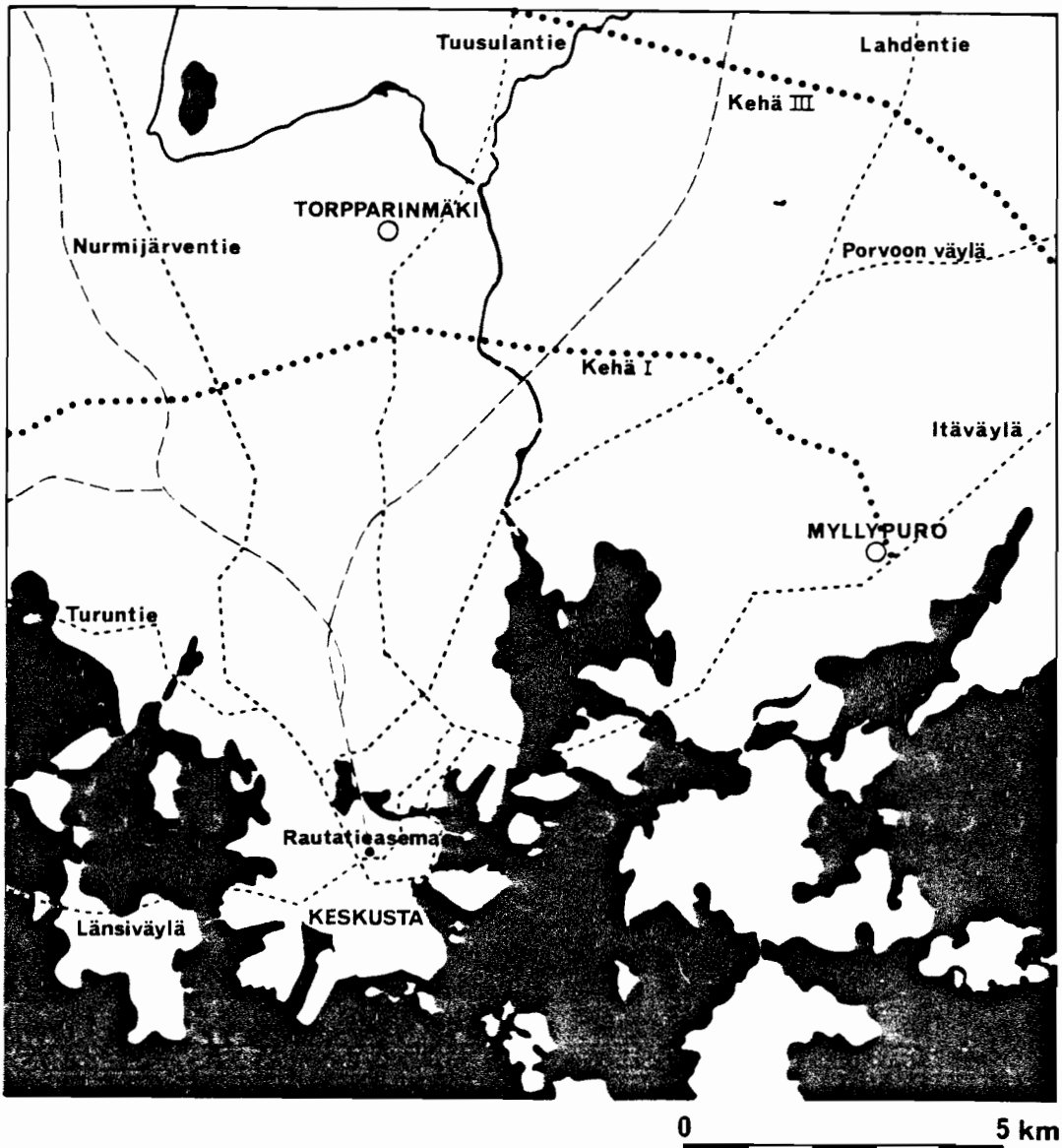
Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungin sekä Oulun yliopiston yhteistyönä perustettiin 1980 syvästabilointi (SYSTA) -projekti, jonka puitteissa on tutkittu mm. kipsikalkin käyttöä stabiloimiseen laboratorio- ja kenttäkokeilla. Koealueita on Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla. Espoon ja Vantaan koealueiden tuloksia on käsitellyt Kujala /13/.

3.2 Torpparinmäki

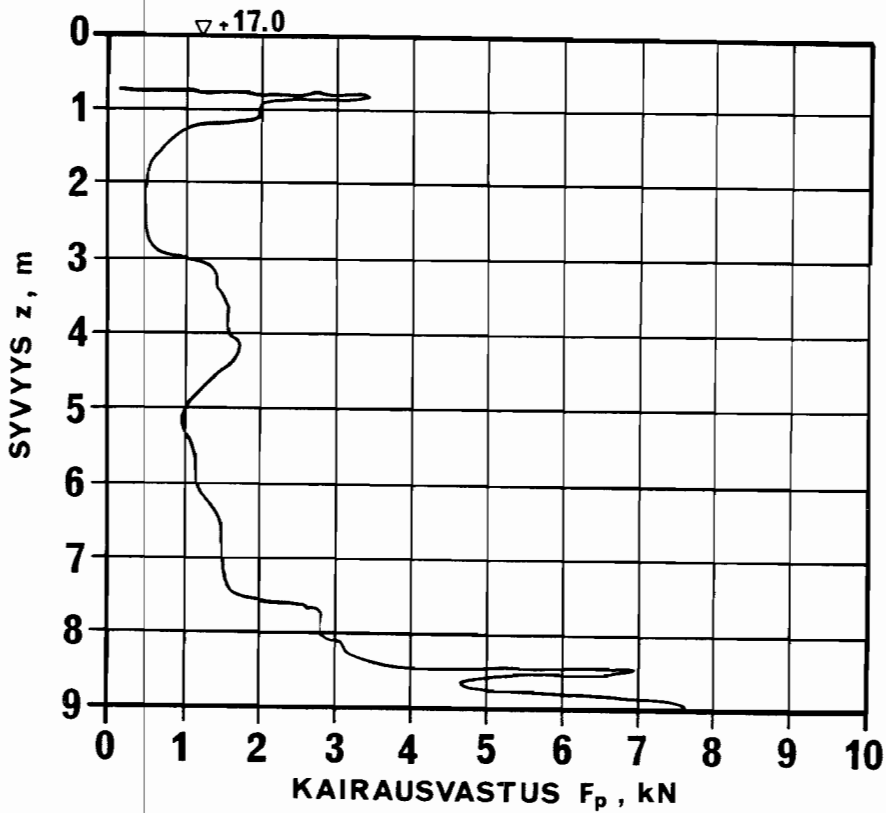
Torpparinmäen syvästabiloinnin koerakentamiskohteet sijoituvat Torpparinmäen asuntomessualueelle, joka on samalla pientalojen koerakentamiskohde (PIKO-projekti). Alue sijaitsee Pohjois-Helsingissä (kuva 9) tyyppillisellä savi-alueella.

Alueella, jossa suurin osa stabilointitutkimuksista tehtiin, on noin 0.3 - 0.5 m paksu humusmaakerros. Alla on 5 - 6 m paksu savikerros, jonka yläosassa on 0.6 - 0.8 m paksu kuivakuorisavikerros. Paikoitellen syvyydellä 3 - 4 m

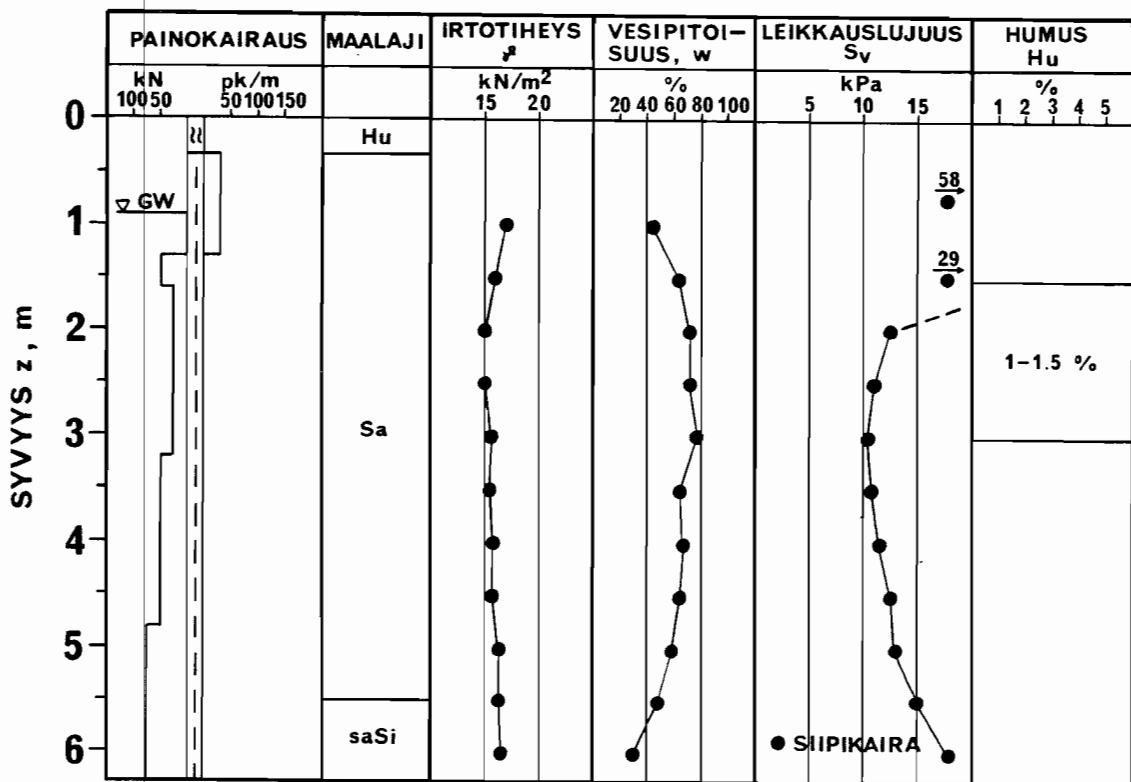
esiintyy ohuita silttikerroksia. Savikerrosten alla on 2 - 3 m paksu silttikerros, jonka alla on moreenikerros ja kallio noin 10 m syvyydessä. Pohjavesi on n. 0.8 m syvyydellä maanpinnasta. Alueen kerrosrajat käyvät ilmi puristinkairausdiagrammista (kuva 10). Laboratoriossa määritetyt savikerroksen indeksiominaisuudet esitetään kuvassa 11.



Kuva 9. Torpparinmäen ja Myllypuron koerakentamiskohteiden sijainti Helsingissä.

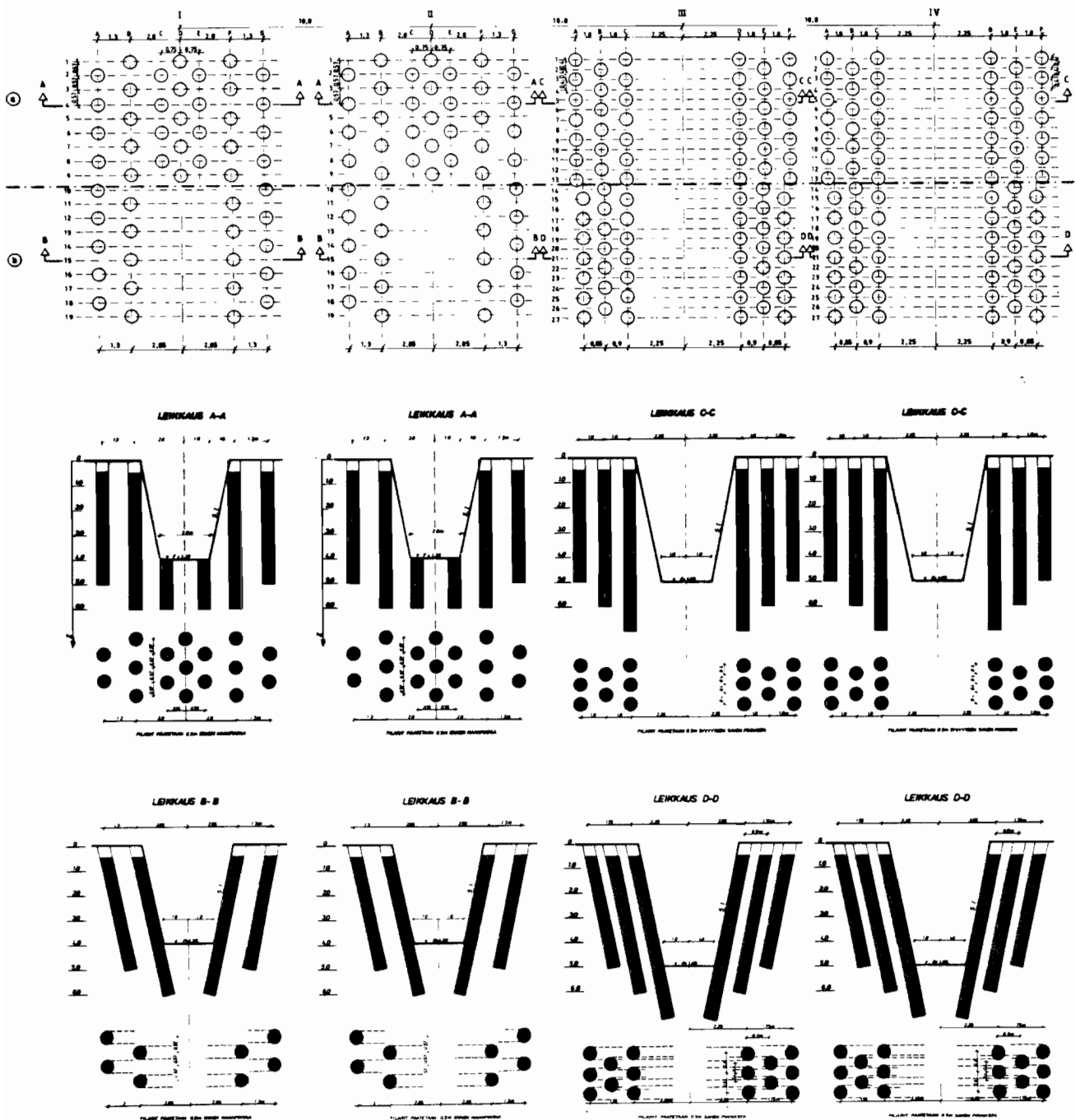


Kuva 10. Torpparinmäen kaivantokoealue. Puristinkairauksen tulos.



Kuva 11. Torpparinmäen kaivantokoealue. Savikerroksen indeksiominaisuudet.

PIKO-projektiin liittyvässä kunnallistekniikan koerakentamisessa sovellettiin mm. syvästabilointia kalkkia ja kipsikalkkia stabilointiaineena käyttäen. Syvästabilointia käytettiin kadun painumien tasaamiseen, putkijohtojen perustamiseen sekä kaivannon tukemiseen. Lisäksi alueella suoritettiin erillinen SYSTA-projektiin liittyvä kaivantokoe, jossa tutkittiin kaivannon tukemista syvästabiloinnilla. Asemapiirros ja poikkileikkaukset kaivantokoealueesta esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Torpparinmäki. a) koepilareiden sijainti
b) koepilareiden poikkileikkaukset.

Alueen stabilointityöt tehtiin kesällä 1980 ja rakenteiden painumisseuranta aloitettiin välittömästi pilarien valmistamisen jälkeen. Kaivantokokeen yhteydessä lujittumista seurattiin paino- ja puristinkairalla, siipikairalla 65 x 130 mm ja 32.5 x 65 mm siivillä sekä ruuvikompressometrillä. Pilareista otettiin sekä pilari- että mäntäkairanäytteitä laboratoriokokeita varten.

Laboratoriokokeissa, jotka suoritettiin pääosin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa, tutkittiin saven stabiloitavuutta kalkilla ja kipsikalkilla tekemällä koekappaleilla puristinkokeita eri stabilointiainepitoisuuksilla. Syvästabiloiduista pilareista otetuilla näytteillä tehtiin kolmiaksiaalikoesarja /13/. Kokonaisten pilarinäytteiden lujuutta tutkittiin yksiaksiaalisella puristuskokeella. Laboratoriokokeita käsitellään enemmän luvussa 8.

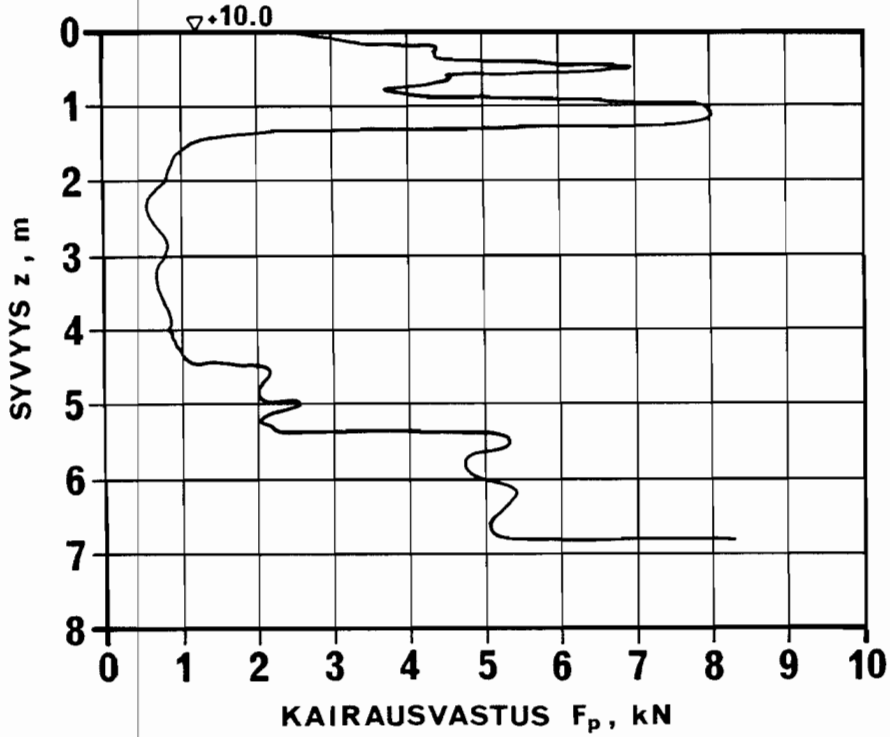
3.3 Myllypuro

Myllypuron koealue (kuva 9) liittyy osana Myllypuron pehmeikön metroradan stabilointityöhön välillä Itäkeskus - Kontula. Projektin syvästabilointityö käsitti n. 38 000 j m kalkkisyvästabilointia ja on siten suurin stabilointikohde Suomessa toistaiseksi. Kohteen stabilointi kesti n. 7 kk (heinäkuu 1981 - tammikuu 1982). Koealueella, joka sijaitsee stabiloitavan alueen keskellä (kuva 13), kokeiltiin myös kipsikalkkia stabilointiaineena.

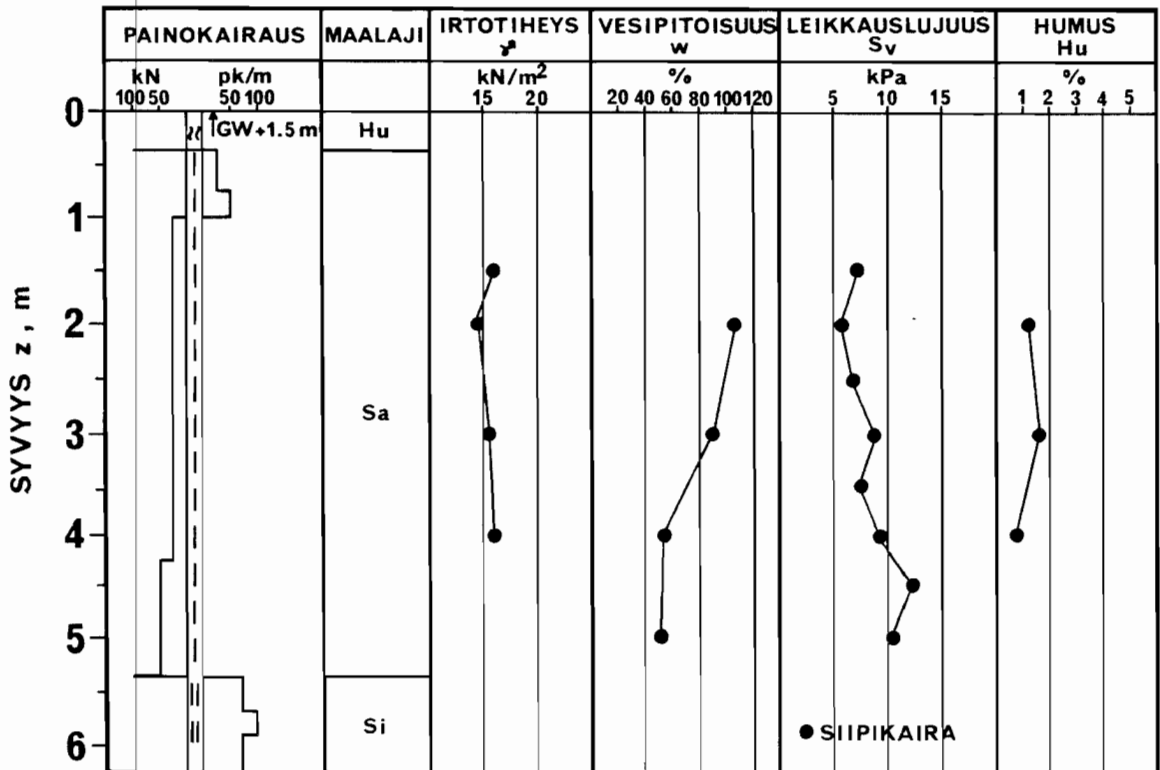
Myllypuron koealue sijaitsee laajalla, pohjarakentamisen kannalta vaikealla pehmeikköalueella. Alueella on päällimmäisenä 1 - 1.5 m paksu täytehiekkakerros, jonka alla on 4 - 5 m paksu savikerros. Savikerroksen alla on 3 - 4 m paksu silttikerros, kiinteä pohjakerros on syvyydellä noin 10 m. Rakennusaikana oli koerakentamiskohteessa paineellinen pohjavesi n. 1.5 m maanpinnan yläpuolella. Alueen kerrosrajat määritettiin painokairan lisäksi puristinkairalla (kuva 14). Laboratoriossa määritetyt savikerroksen indeksiominaisuudet esitetään kuvassa 15.



Kuva 13. Myllypuron koealue.



Kuva 14. Myllypuron koealue. Puristinkairauksen tulos.



Kuva 15. Myllypuron koealue. Savikerroksen indeksimi-naisuudet.

Stabilointikoealueen pilarit tehtiin lokakuussa 1981 ja maastossa tutkittiin stabiloinnin lujittumista pilari-puristinkairalla sekä pilarisiipikairalla $130 \times 65 \text{ mm}^2$, jotka suunniteltiin syvästabiloitujen pilarien laadun ja lujuuden seuraamiseen. Laboratoriossa suoritettiin puristinkokeita koealueen savesta tehdyillä kalkki- ja kipsikalkkikoekappaleilla. Valmiista pilareista otetuilla näytteillä tehtiin rasialeikkauskoesarja.

4. NÄYTTEIDEN OTTO
4.1 Näytteet mäntäkairalla

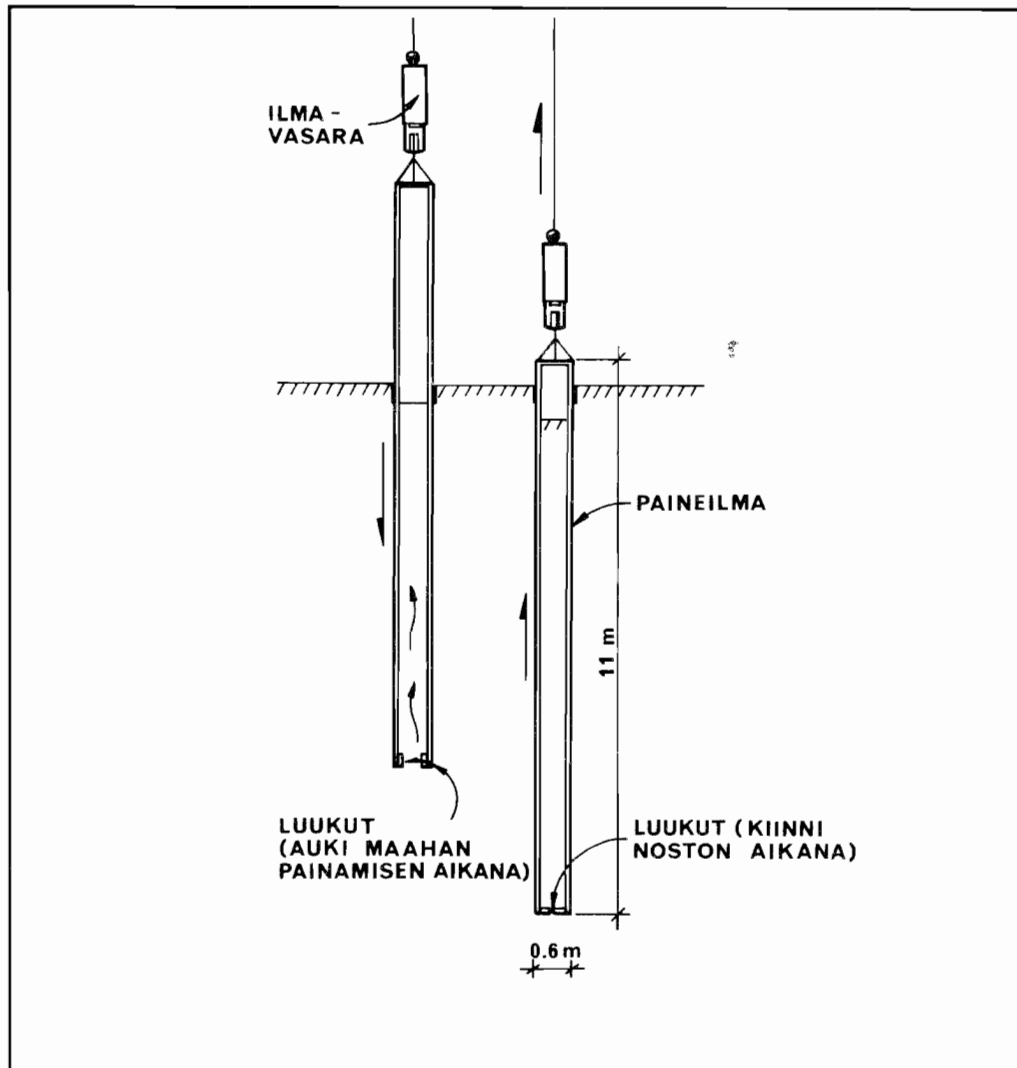
Häiriintymättömät savinäytteet sekä näytteet stabiloiduista pilareista otettiin ST-II tyyppisellä mäntäkairalla. Stabiloiduista pilareista näytteitä otettaessa oli hankaluutena, että näyte ei aina työntynyt sylinteriin saven hankauksen vuoksi. Lisäksi ylös saadut näytteet olivat häiriintyneitä.

Myllypurossa kokeiltiin näytteenottoa ST-II:lla siten, että pilarit olivat lujittuneet vain 2 vrk näytteenottohetkellä, ja varsinainen lujittuminen tapahtui näytteenottoputkissa kylmähuoneessa (+4^o C) veden alla. Verrattuna näytteenottoon kovettuneista pilareista osoittautui menetelmä hyväksi, koska saadut näytteet vaikuttivat häiriintymättömiltä. Haittana menetelmässä oli, että näytteet eivät lujittuneet luonnonmukaisissa olosuhteissa (lämpötila, sivupaine).

Koestusta varten kokeiltiin myös työstää näytteitä isommista kappaleista, mutta se osoittautui hankalaksi materiaalin haurauden vuoksi. Sen vuoksi rasialeikkaus- ja kolmiaksiaalikokeissa koestettiin näytteet siinä muodossa, kun ne olivat näytteenottoputkessa.

4.2 Pilarinäytteet

Ruotsissa on kehitetty /4/ menetelmä kokonaisten pilarien maasta ottamiseen pyöreällä 11 m pitkällä putkella, joka painetaan maahan stabiloidun pilarin kohdalle, kuten kuvassa 16 esitetään. Putken halkaisija on 0.6 m ja alaosassa on luukut, jotka estävät näytteen putoamisen ylösnostettaessa. Putki on tehty kahdesta osasta, jotka on pultattu yhteen. Kun näyte on saatu ylös, irrotetaan putken toinen puolisko ja halkaistaan pilari pituussuunnassa silmämääräistä tarkastelua sekä koestusta varten.



Kuva 16. Laite kokonaisten pilarien maasta ottamiseen /4/.



Kuva 17. Ks. seuraava sivu.



Kuva 17. Torpparinmäki. "Tynnyrinäytteiden" otto,
a) esiin kaivettu pilari
b) rei'itetty tynnyri valellaan vedellä
c) tynnyri painetaan pilarin päälle
d) tynnyri kaadetaan ylösnostoa varten.

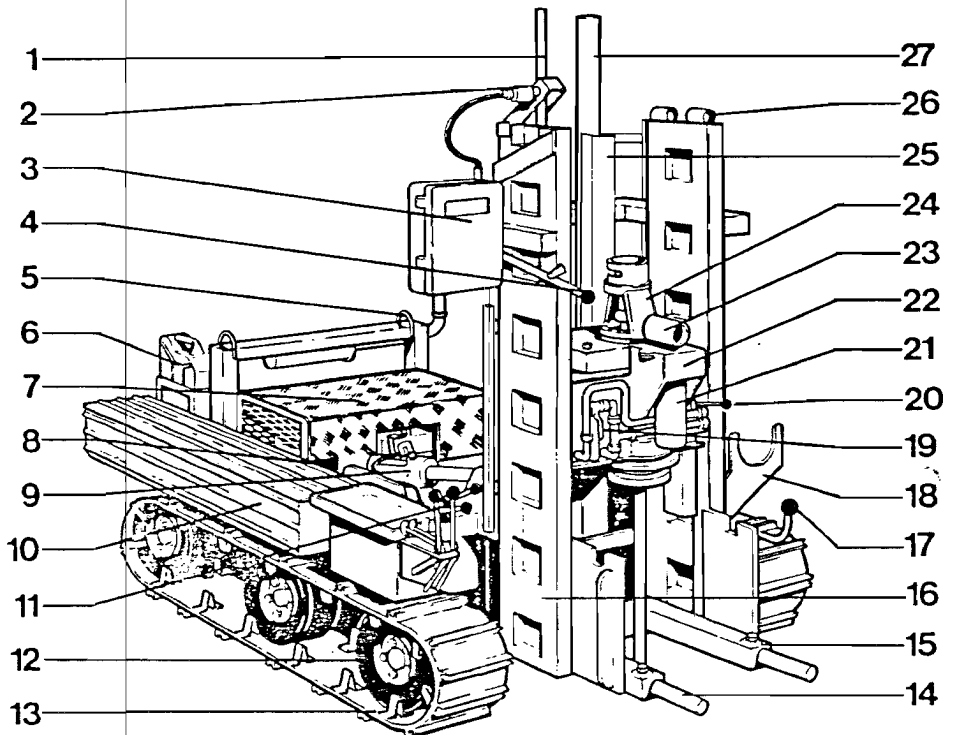
Suomessa on pilarinäytteiden otto tapahtunut lähinnä kaivinkoneella koekuopista, mutta näytteet ovat rikkoutuneet nostovaiheessa.

Torpparinmäen koealueella kehitettiin yksinkertaistettu näytteenottomenetelmä, jonka vaiheet esitetään kuvassa 17. Menetelmässä kaivettiin ensin kuoppa halutun näytteen yläpinnan tasoon ja etsittiin lapiolla pilarin pää. Tavallisen öljytynnyrin (\emptyset 600 mm, h= 900 mm) pohja rei'itettiin sekä valeltiin tynnyri vedellä hankauksen pienentämiseksi, jonka jälkeen se painettiin pilarin päälle kaivinkoneen kauhalla. Tynnyrin viereen kaivettiin kuoppa, johon tynnyri kaadettiin. Lopuksi nostettiin näyte ylös ja suojattiin muovilla kosteuden haihtumisen estämiseksi.

5. PURISTINKAIRAUKSET

5.1 Kairausmonitoimikone, A-sondi

Helsingin kaupunki tekee puristin- ja painokairaukset sekä näytteiden oton nykyisin pääasiassa kairausmonitoimikone A-sondilla. Kaaviokuva koneesta esitetään kuvassa 18.



- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1. Syvyyden mittaustanko | 10. Varustelaatikko | 19. Säätvvipu iskuvasaralle |
| 2. Mittapyörä | 11. Hallintavivut6kpl | 20. " apunostosylinterille |
| 3. Piirturi | 12. Pyörät 6 kpl | 21. Apunostosylinteri |
| 4. Vipu syvyydmittaukselle | 13. Kumitelat 2kpl | 22. Pyöritys- ja kairausyksikkö |
| 5. Nostorivat 3 kpl | 14. Ankk.putket 2 kpl | 23. Pidin mäntäkairaukselle |
| 6. Bensiiinikannu | 15. Lukitusruuvit | 24. Kiertopitimen teline |
| 7. Moottorinsuojus | 16. Kairausmasto | 25. Syöttösylinterin suoja |
| 8. Vaihdevipu | 17. Vetokoukku | 26. Pidin mäntäkair. sangalle |
| 9. Puomin kallistus-
sylinteri | 18. Kairatankoteline | 27. Hydraulisyylinteri |

Kuva 18. Kairausmonitoimikone A-sondi.

A-sondilla suoritetaan seuraavat toiminnot:

- painokairaus
- puristinkairaus
- siipikairaus
- augerkairaus
- tärykairaus
- näytteenotto mäntäkairalla.

Kone on suunniteltu pohjoismaista maaperää ajatellen, ja käyttökokemukset ovat olleet hyviä. Telaketjujen ansiosta konetta on helppo käsitellä vaikeakulkuisessakin maastossa, jollaisia tutkimuskohteet usein ovat.

A-sondin suurin puristusvoima on 30 kN, mutta jos puristusvoima ylittää 5 kN, on kone pienen oman painon (800 kg) vuoksi ankkuroitava maahan yhdellä tai useammalla maa-ankkurilla. Kone on varustettu piirturilla, joka rekisteröi puristusvoiman 10 kN asti. Piirturi on kalibroitavissa voimamittaria käyttäen.

5.2 Tavallinen puristinkaira

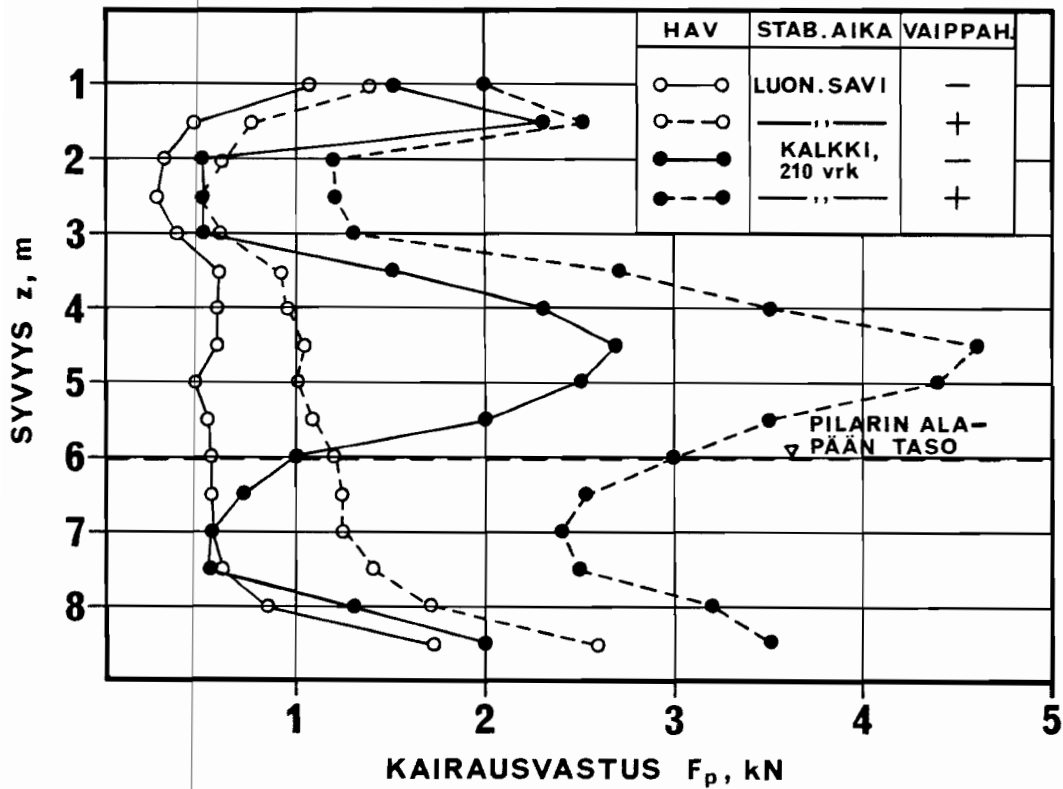
5.21 Laitteisto

Torpparinmäen kaivantokoealueella sekä Myllypurossa tehdyt puristinkairaukset tehtiin Jonell & Nilsson -tyyppisellä puristinkairalla. Kaira on mekaaninen puristinkaira, josta puuttuu liikuteltava hylsy vaippahankauksen määrittämiseksi.

Kairauksissa tehtiin puristaminen A-sondilla 1 m pituisia painokairan tankoja käyttäen. Kairausvastus rekisteröityi tällöin suoraan piirturipaperille.

Puristinkairauksen kokonaisvastus F_p muodostuu vaippavastuksesta F_s sekä kärkivastuksesta q_p . Torpparinmäessä ja Myllypurossa määritettiin puristinkairauksesta usein pelkkä kokonaisvastus tutkittaessa kerrosrajoja sopivan näytteenottosyvyyden määrittämiseksi. Tällöin eri kohteista olevat kairaustulokset eivät ole kuitenkaan vertailukelpoisia esim. täytteen aiheuttaman erilaisen vaippavastuksen vuoksi.

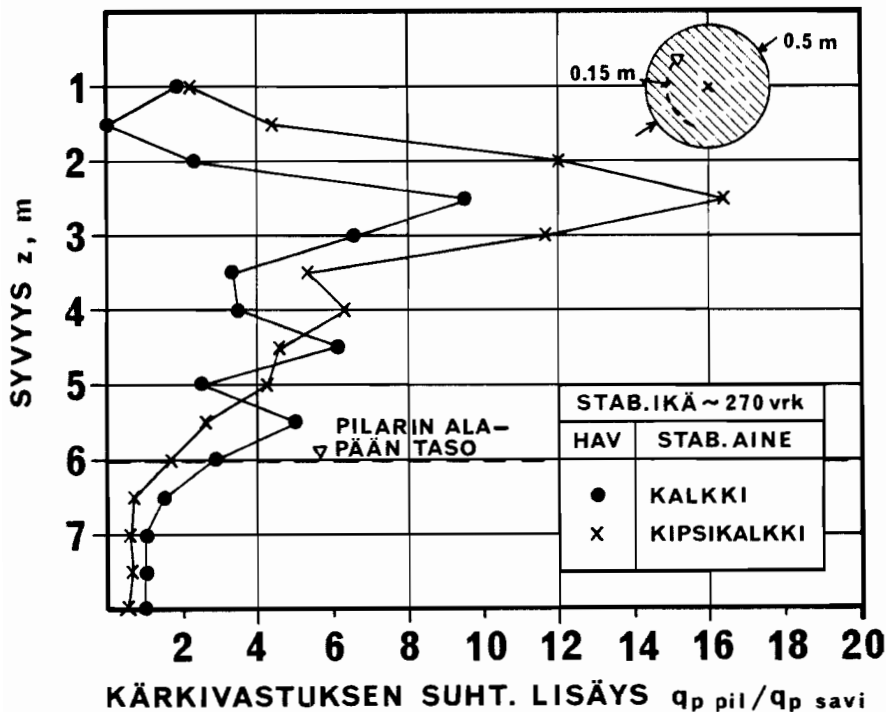
Puristinkairauksen yhteydessä määritettiin vaippavastus nostamalla tankoja metrin välein n. 200 mm, jolloin piirturi rekisteröi vaippavastuksen lyhyellä pystyviivalla. Esimerkki vaippavastuksen suuruudesta suhteessa kokonaisvastukseen luonnollisessa savessa ja kalkkistabiloidussa pilarissa esitetään kuvassa 19.



Kuva 19. Torpparinmäki. Puristinkairausten tulos luonnollisessa savessa sekä kalkkistabiloidussa pilarissa.

5.22 Kairaustulokset

Torpparinmäen kaivantokoealueella tutkittiin syvästabiloitujen pilarien lujittumista mm. puristinkairalla. Kairaukset suoritettiin 8, 14, 35 ja 270 vrk kuluttua stabiloinnista sekä kipsikalkki- että kalkkistabiloiduissa pilareissa. Kairaukset tehtiin vähintään kolmessa samalla stabilointiaineella stabiloidussa pilarissa kunakin ajankohtana. Kaikkiaan puristinkairauksia tehtiin 24 pilarissa. Koska syvästabiloidun pilarin poikkileikkaus oli sangen epähomogeeninen, tehtiin kairaukset aluksi pilarin halkaisijan kolmannes-pisteessä eli n. 15 cm pilarin reunasta. Kuitenkin kairauksia suoritettaessa pyrki kaira pilarin heikompaan keskusta tai kokonaan ulos pilarista. Tämän vuoksi oli kairaustulosten keskihajonta suuri n. 50 - 60 %. Suoritettaessa puristinkairaukset pilarin keskeltä, saatiin hajonta hieman pienemmään, mutta varsinkin pilarin yläpään lujuus jäi tällä tavoin todellista pienemmäksi. Kuvassa 20 on esitetty kairaustulosten perusteella saatu kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien suhteellinen kärkivastuksen lisäys.



Kuva 20. Torpparinmäen kaivantokoealue. 270 vrk lujittuneiden kalkki- ja kipsikalkkipilarien puristinkairausten tulos.

Käyrät on saatu laskemalla eri kairaustulosten keskiarvot. Kairaustulosten perusteella on kipsikalkkistabilointi lujittunut n. 2 kertaa kalkkistabilointia paremmin.

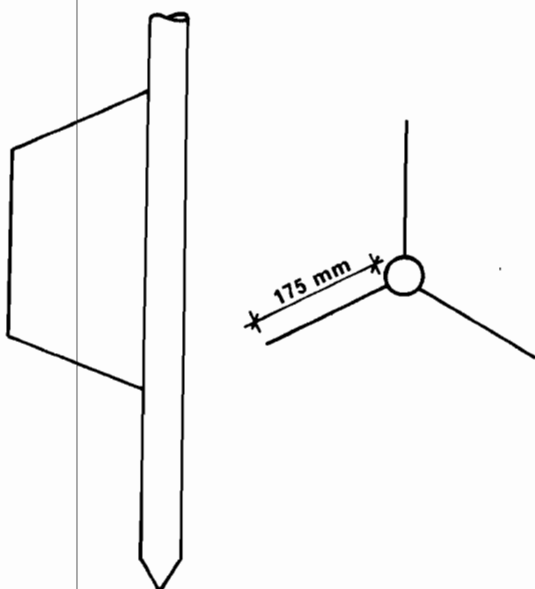
Puristinkairaustuloksista on monesti pyritty määrittämään kärkivastuksen perusteella maan leikkauslujuus, jonka yleisimmin oletetaan olevan $\frac{1}{20} - \frac{1}{30}$ osa kärkivastuksesta. Torpparinmäen savella on suhde n. $\frac{1}{22} - \frac{1}{35}$, mutta menetelmää voidaan pitää vain suunta-antavana.

5.3 Pilarikaira

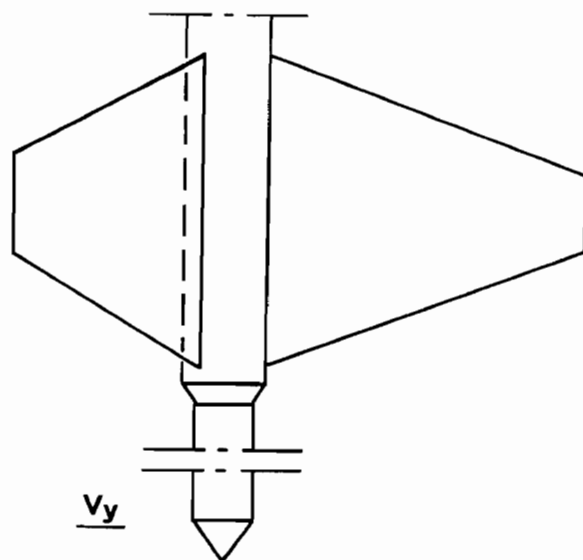
5.31 Laitteisto ja kairausten suoritus

Koska puristinkaira soveltuu huonosti syvästabiloitujen pilarien tutkimiseen, on Ruotsissa kehitetty (/2/, /10/, /12/, /18/) erityisesti syvästabiloinnin tutkimiseen soveltuvia erikoispuristinkairoja. Kuvassa 21 on esitetty erilaisia pilarikairan prototyyppejä. Yhteistä kaikille malleille on ohjainkärki, joka pitää kairan pilarin heikommassa keskiosassa, sekä "siivet", joiden ansiosta kairausvastus edustaa pilarin koko poikkileikkausta.

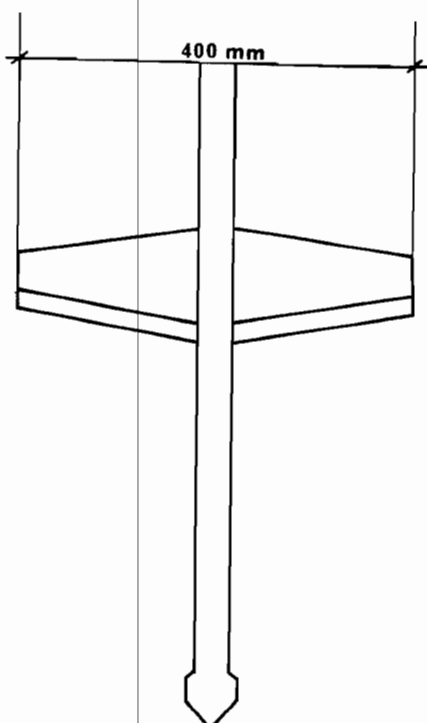
a)



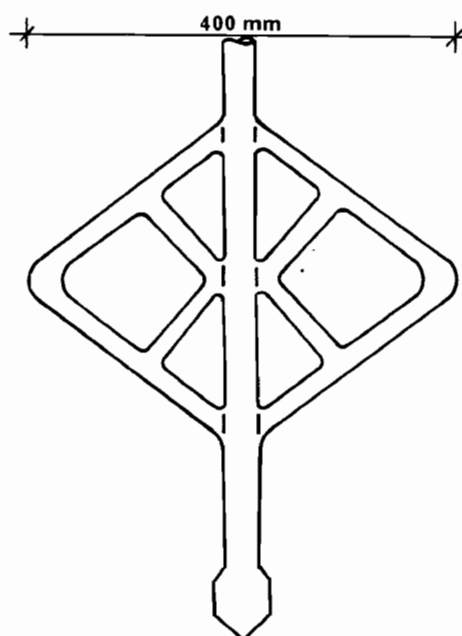
b)



c)



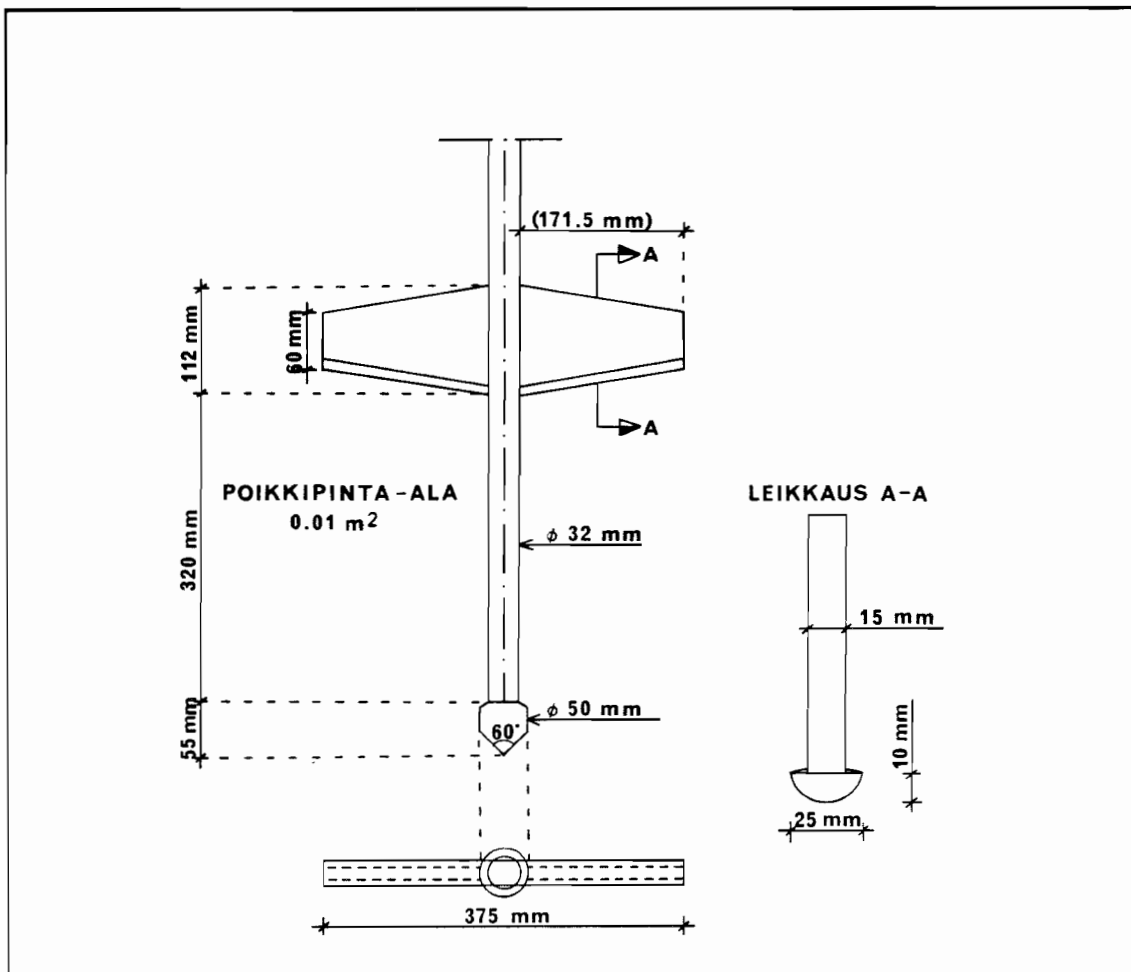
d)



Kuva 21. Pilarikairan prototyyppejä /2/, /10/, /12/.

Kairatyypin a ja b kairausvastus muodostuu lähinnä vaip-
pahankauksesta ja tyyppien c ja d lähinnä kärkivastuksesta.
Kairatyyppi c on Ruotsissa edennyt jo sarjavalmistukseen
/18/ ja lienee käytössä korvannut muut kairatyyppit. Mylly-
puron pehmeikön syvästabiloinnin seurantalutkimuksia varten
valmisti Helsingin kaupungin geotekninen osasto kuvan 21
c-tyyppisen pilarikairan, jonka mitat poikkeavat hieman
ruotsalaisesta. Kairan soveltuvuutta kokeiltiin Myllypuron
koealueella pilarisiipikairan rinnalla.

Myllypurossa käytetyn pilarikairan malli ja mitat esitetään
kuvassa 22. Kaira on muotoiltu siten, että siipien ja tan-
kojen aiheuttama hankaus olisi mahdollisimman pieni. Kairaus-
tankoina käytettiin heijarikairan $\varnothing 32$ mm tankoja. Kairaa
puristettiin maahan A-sondilla, joka oli ankkuroitu maahan
maaruuveilla, jolloin saavutettiin n. 30 kN puristusvoima.
Voiman suuruus luettiin A-sondissa olevasta manometristä
0.2 m välein. Kairaa puristettaessa oli tunkeutumisenopeus
vakio n. 20 mm/s. Kairausvastuksen suuruus merkittiin
0.2 m välein pöytäkirjaan.



Kuva 22. Myllypurossa kokeiltiin pilarikairan mitat. Geotekninen osasto julkaisu 30

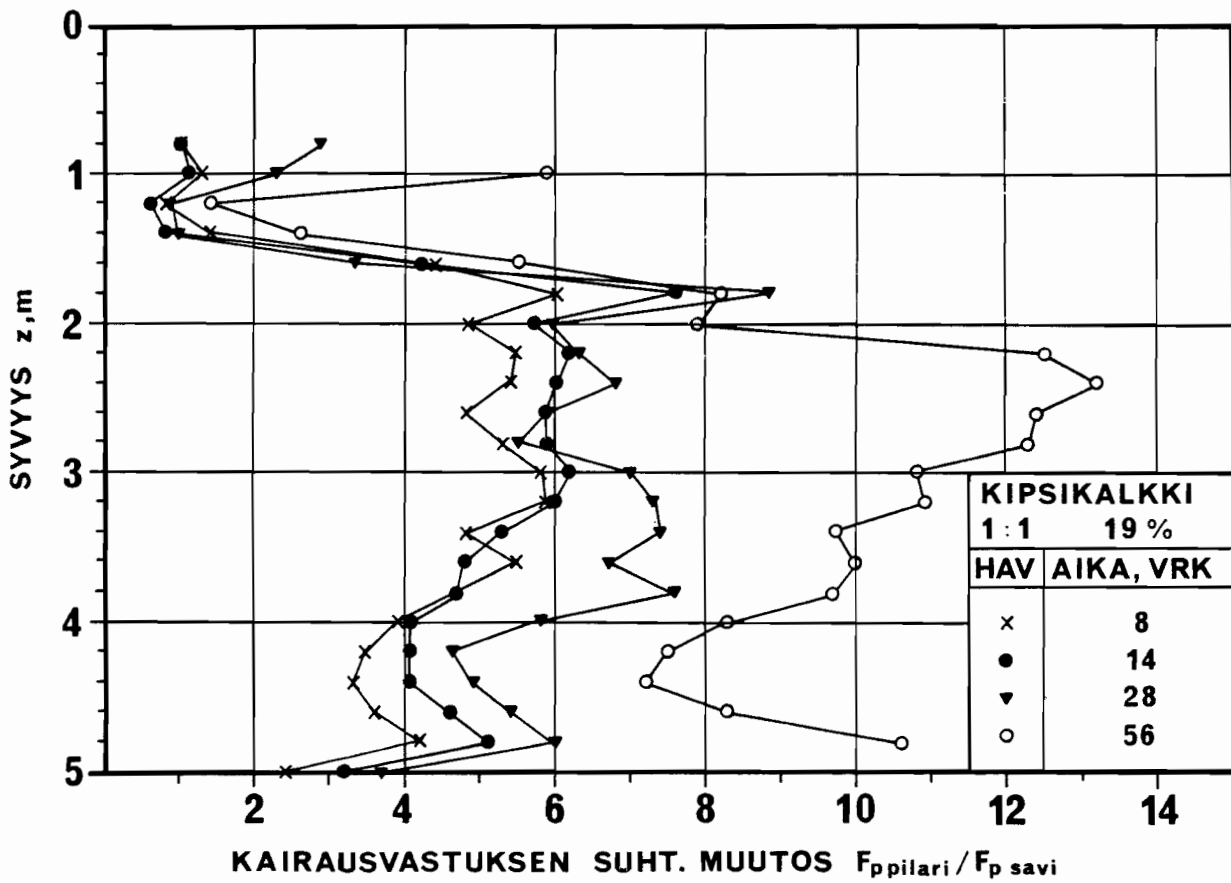
5.32 Kairaustulokset

Myllypuron stabilointikoealueella tutkittiin pilarikairalla kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien homogeenisuutta sekä lujittumista luonnolliseen saveen nähden. Kairaukset suoritettiin 7, 14, 28, 56 ja 90 vrk kuluttua stabiloinnista vähintään kolmessa samalla stabilointiaineella stabiloidussa pilarissa kunakin ajankohtana. Kaikkiaan kairauksia tehtiin 28 pilarissa.

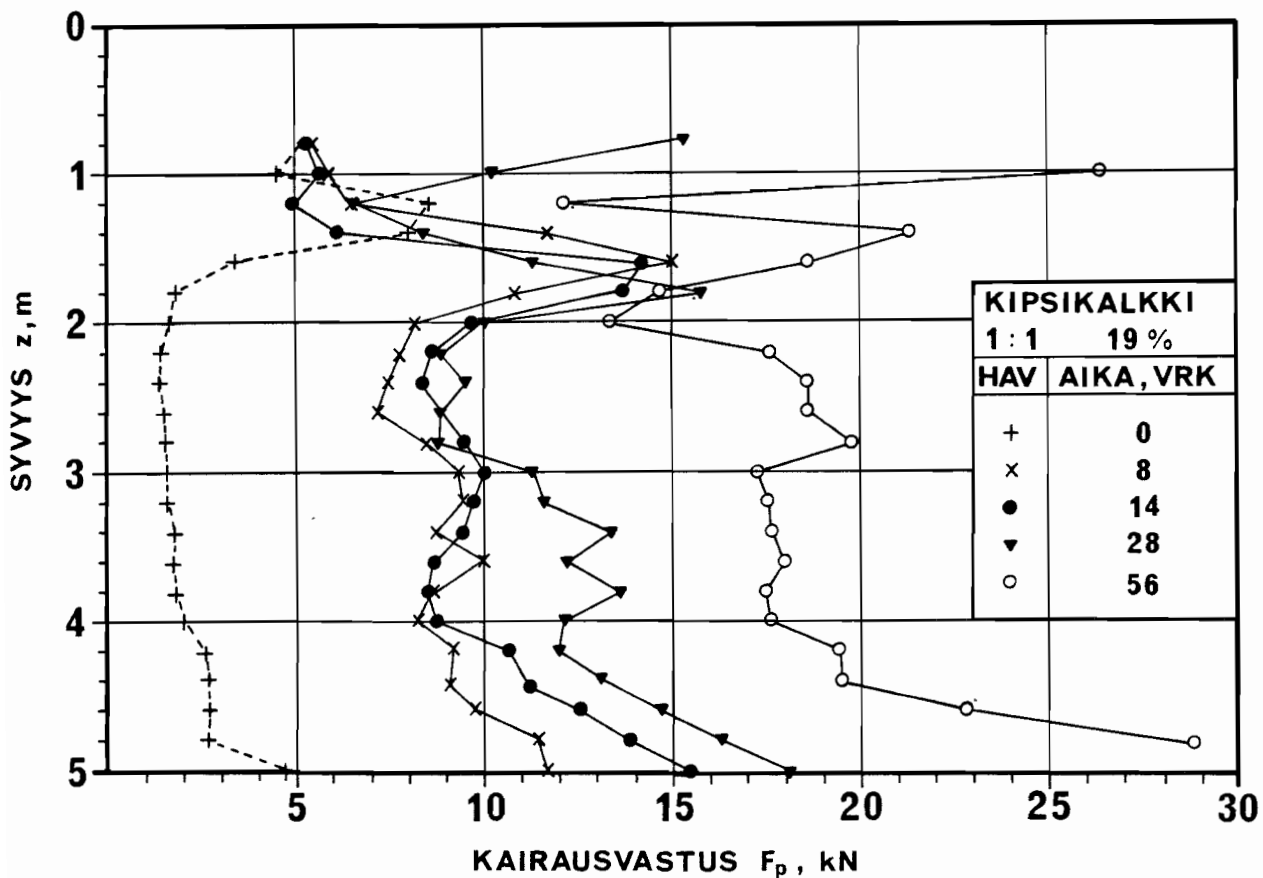
Kuvissa 23 - 26 esitetään kairausdiagrammit, jotka edustavat aina kolmen pilarin keskiarvoja. Keskihajonta vaihteli 10 - 20 % välillä johtuen sekä menetelmästä että pilarien epähomogeenisuudesta. Tulosta on kuitenkin pidettävä hyvänä, koska hajonta $< 20\%$ /14/.

Kairausten suorittamista häirtäsi merkittävästi alueella syvästabilointikoneen työalustaksi ajettu sorakerros, joka suodatinkankaan puuttumisen vuoksi sotkeutui saveen. Stabilointiaineet, varsinkin kipsikalkki, lujittivat maan pintakerroksen noin 1 metrin syvyydelle niin kovaksi, että A-sondin puristusvoima ei aina riittänyt, vaikka pintakerrosta kaivettiinkin n. 50 cm. Kipsikalkilla stabiloitujen 90 vrk ikäisten pilarien kairaukset pilarikairalla eivät enää tästä syystä onnistuneet ankkuroinnin petäessä. Kalkkistabiloidulla alueella kairaukset onnistuivat helpommin. Käytetty pilarikaira osoittautui tarkoitukseen soveliaaksi, yhdessäkään kairauksessa kärki ei tullut pilarista ulos. Pilarien heikkousvyöhykkeet tulivat selvästi esiin. Piirturi, jollainen on Ruotsissa käytössä /18/ aina 100 kN puristusvoimaan saakka, rekisteröi epähomogeenisuudet vieläkin paremmin. Kairauksissa määritettiin ainoastaan kokonaisvastus, jolloin tankojen aiheuttama hankaus vaikutti tuloksiin.

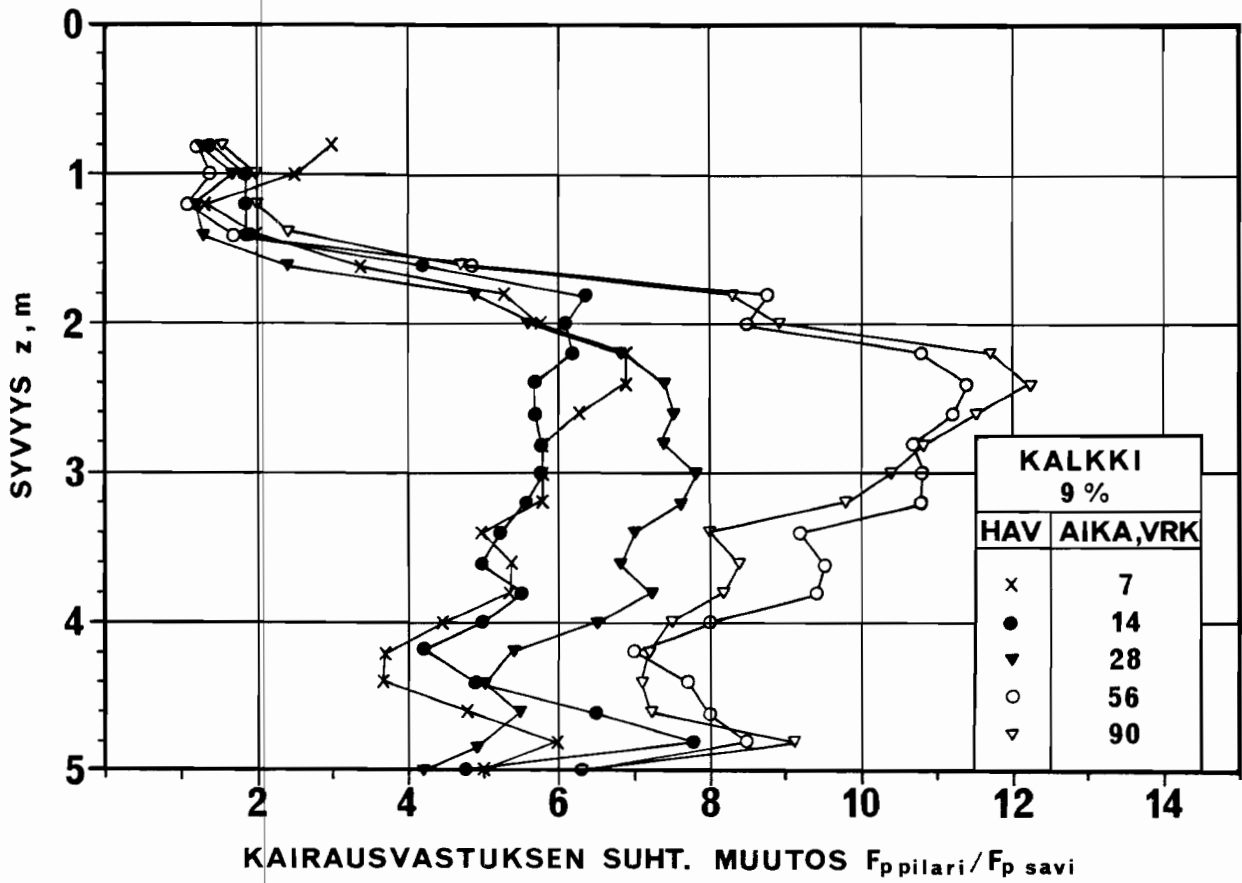
Pilarikairaustulosten mukaan ovat sekä kalkki- että kipsikalkkipilarit lujittuneet 56 vrk:ssa 7 - 11 kertaisiksi luonnolliseen saveen nähden syvyydestä riippuen (kuvat 23 - 26). Kairausvastus on pienin kuivakuorikerroksen alapuolella olevassa kerroksessa, jossa vesipitoisuus on suurin ($w > 100\%$). Kairaustulosten perusteella stabiloitujen



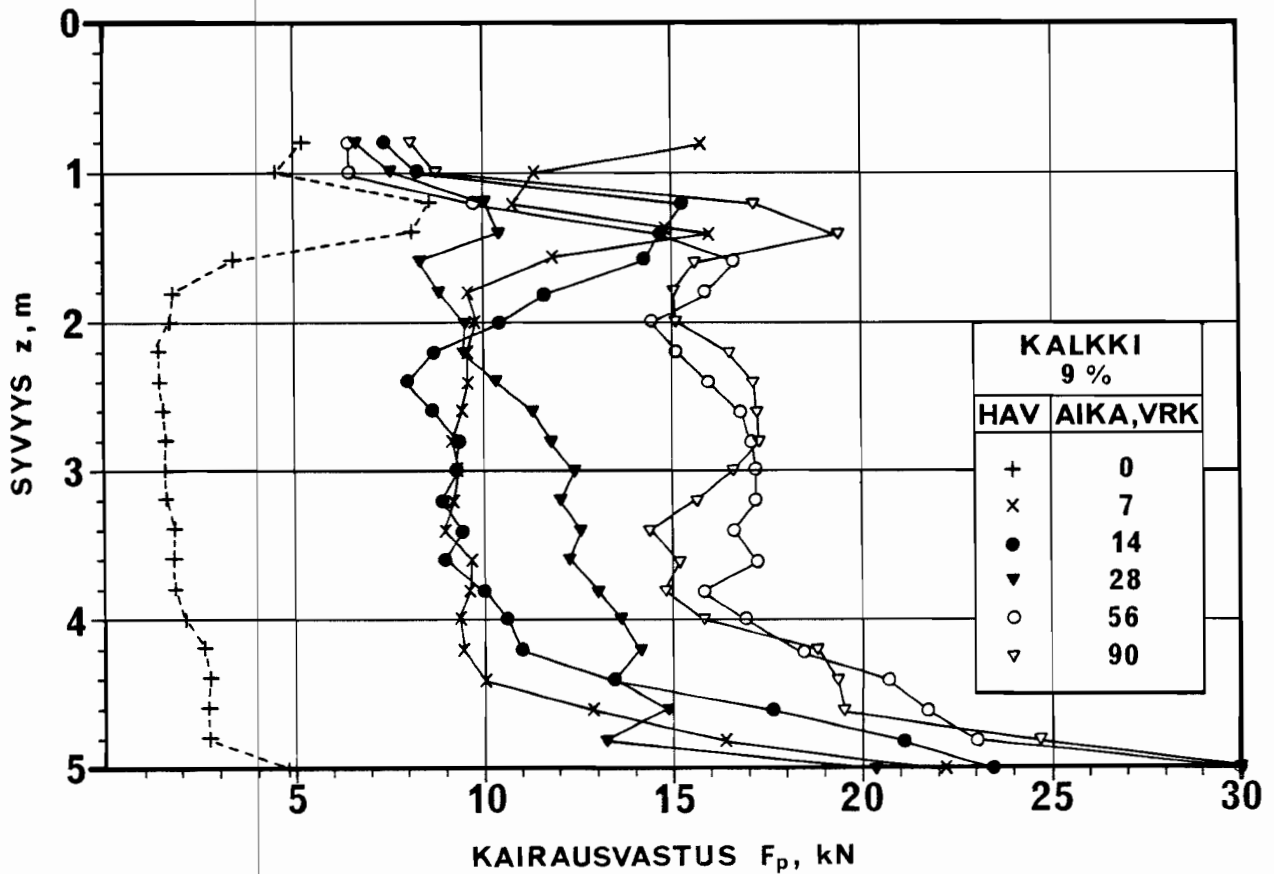
Kuva 23. Myllypuro. Pilarikairan kairaustulokset eri ajankohtina kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa.



Kuva 24. Myllypuro. Pilarikairan kairaustulokset eri ajankohtina kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa.
Geotekninen osasto julkaisu 30



Kuva 25. Myllypuro. Pilarikairan kairaustulokset eri ajankohtina kalkkistabiloiduissa pilareissa.



Kuva 26. Myllypuro. Pilarikairan kairaustulokset eri ajankohtina kalkkistabiloiduissa pilareissa.

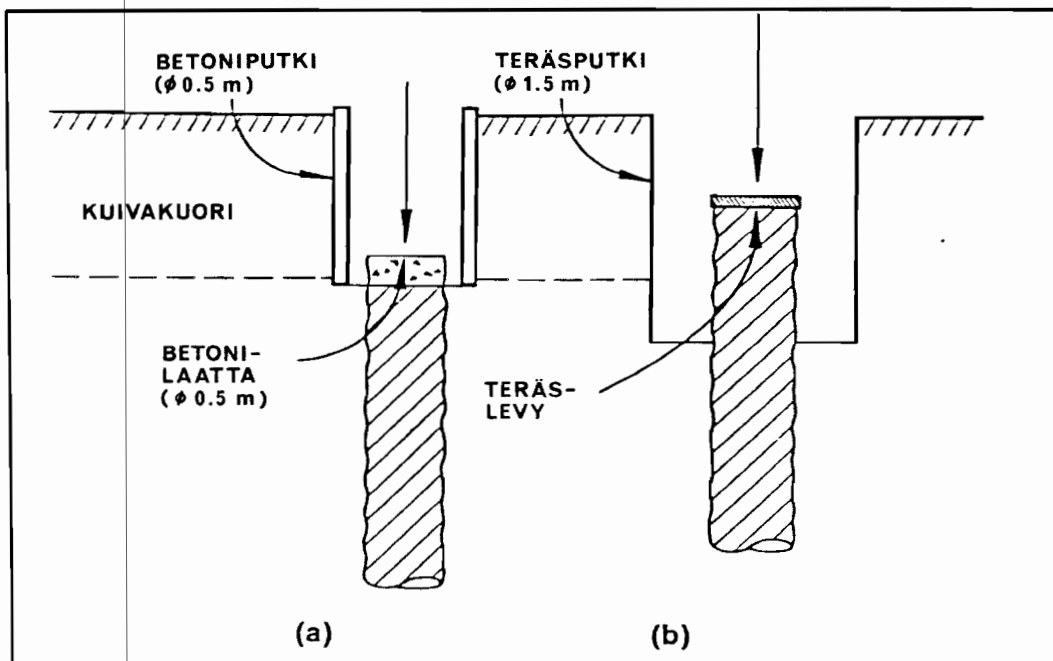
pilarien lujittuminen on verrannollinen luonnollisen saven lujuuteen, mutta ainakin Myllypurossa heikoin kerros lujittui suhteellisesti eniten. Kalkilla ja kipsikalkilla stabiloiduissa pilareissa ei havaittu mitään merkittäviä eroja lujuuden kehittämisessä.

Pilarin yläosan lujuudesta syvyydellä 0 - 1.5 m maanpinnasta ei tällä menetelmällä saatu Myllypurossa luotettavia havain-
toja, koska pilarin yläosaa jouduttiin kaivamaan.

6. KUORMITUSKOKEET
 6.1 Levykuormituskoe
 6.11 Laitteisto ja kokeen suoritus

Levykuormituskoe on aikaisemmin käytetty sekä Suomessa että Ruotsissa stabiloidun pilarin lujuuden seuraamiseen /14/, /15/. Koska menetelmällä pystytään määrittämään vain pilarin yläosan lujuus, käytetään levykuormituskoea syvästabiloinnin seuraamiseen nykyään harvemmin.

Bromsin ja Bomanin suosittelema /4/ koejärjestely esitetään kuvassa 27 a. Menetelmä ottaa huomioon maan sivuvastuksen, suurin tutkimussyvyys on n. 1.5 m. Kuvassa 27 b esitetään koejärjestely syvemällä kuin 1.5 m /4/. Tällöin koe vastaa lähinnä puristuskoetta, ja tulokset ovat epäluotettavia pilarin häiriintymisen ja maan sivuvastuksen puuttumisen vuoksi.



Kuva 27. Stabiloidun pilarin levykuormituskokeen järjestelyt Bromsin ja Bomanin /4/ mukaan, a) kuivakuorikerroksessa, b) kuivakuorikerroksen alapuolella.

Levyä kuormitetaan vastapainon avulla, jonka voi muodostaa esim. maahan ankkuroitu palkki, kauhakuormaaja tai kuorma-auto. Kuormitettaessa seurataan laatan painumaa mittakelloista. Kuormituslisäykset valitaan yleensä siten, että arvioitu murtokuorma saavutetaan 5 - 10 lisäyksen jälkeen. Murtokuormana pidetään yleisimmin kuormaa, jolla levyn painuma on 50 mm (10 % pilarin halkaisijasta) /4/.

Helsingin Itäkeskuksen ja Roihuvuoren kalkkistabiloiduilla koealueilla tehtiin levykuormituskokeet kaivamalla pilari esiin 1 m matkalla ja kuormittamalla \emptyset 600 mm levyllä. Kuormitusta nostettiin 2 kN välein, kunnes levyn painuma oli 5 mm, ja 1 kN välein, kunnes painuma oli 10 mm, jonka jälkeen tehtiin palautus. Toistokuormitusta jatkettiin, kunnes levyn painuma oli 50 mm. Kutakin kuormitusta jatkettiin niin kauan, että painumanopeus oli <0.1 mm/min.

6.12 Koetulokset

Levykuormituskoetta käytettiin Itäkeskuksen /15/ sekä Roihuvuoren koealueilla kalkkistabiloitujen pilarien lujuusseurantaan. Käytetty stabilointiainemäärä oli noin 9 % saven kuivatilavuuspainosta Roihuvuoressa ja noin 6 % Itäkeskuksessa. Itäkeskuksen koealueella savikerroksen paksuus oli 7 - 9 m, leikkauslujuus siipikairalla 9 - 20 kN/m² ja pilarien pituus 8 m. Roihuvuoren koealueella 1 savea oli 12 - 14 m, leikkauslujuus siipikairalla 12 - 20 kN/m² ja pilarien pituus 9.5 metriä. Koealueella 2 savikerroksen paksuus oli noin 8 m, leikkauslujuus siipikairalla 6 - 10 kN/m² ja pilarien pituus 8 metriä. Vesipitoisuus kaikissa kohteissa oli 60 - 80 % saven kuivatilavuuspainosta.

Levykuormituskokeita tehtiin kaikkiaan 14 kpl Roihuvuoren koealueilla ja 3 kpl Itäkeskuksen koealueella. Taulukkoon 1 on koottu levykuormituskokeiden perusteella määritetyt myötökuormat eri ajankohtina.

Taulukko 1. Roihuvuoren ja Itäkeskuksen koalueet. Kalkki-stabiloitujen pilarien levykuormituskokeiden tulokset.

Kohde	Pilarin ikä t, vrk	Myötökuormat q_r , kPa	Keskiarvot q_r , kPa
Roihuvuori koalue 1	Savi	106	106
	2	132, 132	132
	9	147	147
	30	203, 173	188
	89	231, 234	233
Roihuvuori koalue 2	Savi	83	83
	3	112	112
	10	99, 109	104
	32	137, 176	157
	84	143, 148	146
Itäkeskus	730	99, 242, 255	199

Myötökuormana on pidetty sitä kuormaa, jonka kohdalla tuloksista määritetyn kuormitus-kokoonpuristumakäyrän kaarevuussäde on pienin. Pystykuormitusta laskettaessa huomioitiin pilarin halkaisija, \emptyset 500 mm. Roihuvuoren koalueen 1 pilarit lujittuivat hieman paremmin kuin koalueen 2 pilarit. Tuloksissa on kuitenkin suuri hajonta johtuen mm. kokeen suoritustavasta. Jos oletetaan, että leikkauslujuus τ on puolet pilarin myötökuormasta q_r /4/, on t_{90} leikkauslujuus Roihuvuoren koalueella 1 117 kN/m^2 ja koalueella 2 73 kN/m^2 .

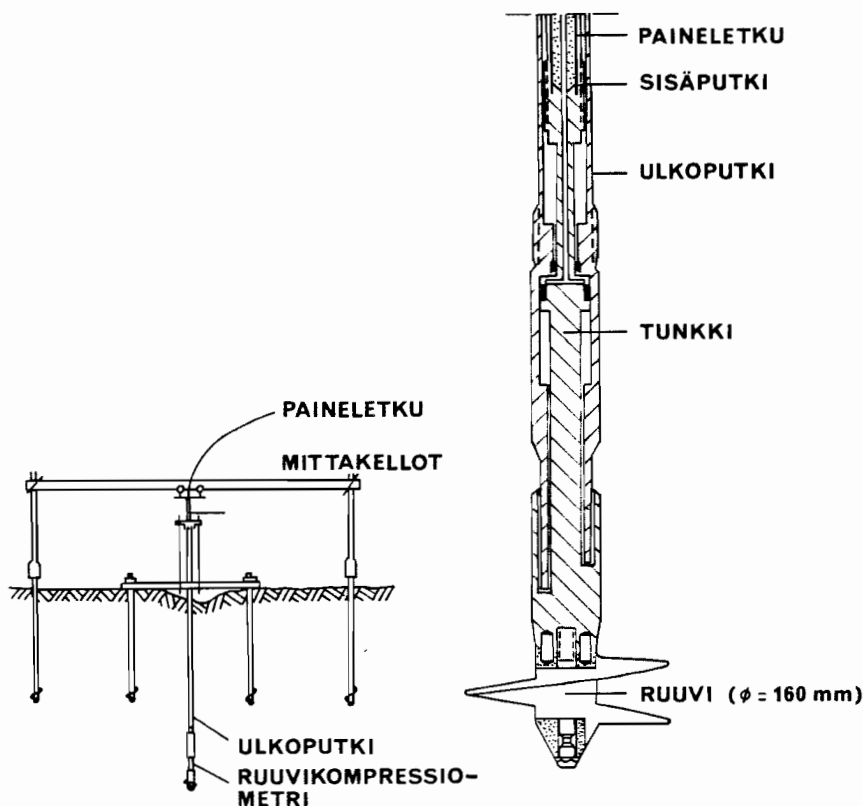
6.2 Ruuvikompressiometrikokeet

6.21 Laitteisto

Ruuvikompressiometri on Jambun ja Sennesetin /11/ 1960-luvun lopulla kehittämä laite savimaalajien kokoonpuristuvuusominaisuuksien selvittämiseen. Myös Suomessa Helenelund kehitti erilaisia kenttäkompressiometrejä 1960-luvulla /9/. Laite on periaatteeltaan levykuormituskoje, jossa kuormituslevy on muotoiltu ruuvilevyksi, joka voidaan kiertää haluttuun syvyyteen. Siten ruuvikompressiometrillä voidaan stabiloidut

pilarit koestaa 1 m välein koko pituudelta. Ruotsissa ja Suomessa on ruuvikompressiometriä käytetty myös syvästabi-
loitujen pilarien koekuormittamiseen /4/, /15/.

Kuvassa 28 esitetään poikkileikkaus ruuvikompressiometrissä sekä kaaviokuva kokeen järjestelyistä. Ruuvi \varnothing 160 mm tai \varnothing 300 mm on kiinnitetty tunkin mäntään. Tunkki, joka on kuormitettaessa maan sisällä, on kytketty ontton ulkoputken välityksellä ankkuripalkkiin. Tunkin hydraulineneste kulkee paineletkussa sisäputkessa, joka on kiinnitetty mäntään. Siten maan painumista voidaan seurata sisäputken päälle nostettavilla mittakelloilla, jotka tukeutuvat erilliseen ankkuroituun palkkiin. Ruuvia maahan kierrettäessä (kuva 29) kiinnitetään sisä- ja ulkoputki toisiinsa ja irrotetaan jäl-
leen kuormitettaessa. Hydraulipaine, joka on luettavissa manometrissä, pidetään vakiona jokaisen kuormitusportaan aikana /11/.



Kuva 28. Ruuvikompressiometri /15/.



Kuva 29. Torpparinmäen kaivantokoealue. Ruuvikompressiometrin kuormitusruuvia kierretään maahan.

6.22 Stabiloitujen pilarien koestus

Ruuvikompressiometrillä koestettiin Torpparinmäen kaivanto-
koealueella n. 270 vrk ikäisiä kalkki- ja kipsikalkkistabi-
loituja pilareita, kumpiakin 3 kpl. Lisäksi tehtiin luon-
nollisessa savessa kokeita yhdessä pisteessä. Pilarissa
tehtiin kuormitukset \emptyset 160 mm ja savessa \emptyset 300 mm ruuveilla
2, 3 ja 4 metrin syvyydellä luonnollisesta maanpinnasta.

Kuormitusportaiden väliä pidettiin vakiona (3 min), ja
ruuvin painuma mitattiin 15", 45", 1'45" ja 2'45" kuluttua
kuormituslisäyksestä. Kuormituslisäykset valittiin siten,
että murtojännitys saavutettiin n. 10 lisäyksen jälkeen.
Murtojännitys määritettiin Bromsin ja Bomanin mukaan jän-
nitykseksi, jolla ruuvin kokonaispainuma on 10 % (16 mm)
levyn halkaisijasta.

Kuormitus lopetettiin, kun laitteiston kapasiteetti (n.
900 kPa \emptyset 160 mm levyllä) tai murtojännitys ylitettiin.
Ruuvikompressiometrikokeisiin kului runsaasti aikaa, yaik-
ka kuormitusportaiden väli oli vain 3 minuuttia. Normaa-
leissa olosuhteissa 8 tunnin työpäivänä 2 - 3 hengen työ-
ryhmällä pystyttiin yhdessä pilarissa suorittamaan kuormitukset

kolmella tasolla, joiden väli oli 1 metri. Eniten kokeessa vei aikaa ankkuroinnin järjestäminen sekä ruuvin maahan-kiertäminen.

Vaikeissa pehmeikköolosuhteissa on ruuvikompressiometri-kokeiden suorittaminen mahdotonta vaikeasti liikuteltavan moottoriyksikön sekä ankkuripalkkien vaatiman $2 \times 2 \text{ m}^2$ suuruisen tasaisen alustan vuoksi. Tulevaisuudessa olisi suunniteltava ruuvikompressiometrilaiteisto syvästabiloitujen pilarien koestamiseen, jolloin esim. A-sondin kaltaista helposti liikuteltavaa monitoimikonetta voisi käyttää apuna.

6.23 Myötöjännityksen määrittäminen

Bromsin ja Bomanin mukaan /4/, /5/ pilarin myötöjännitys määritetään ns. jännitys-hiipumakuvaajasta. Hiipumalla tarkoitetaan ruuvin painumaa $15''$ ja $1'45''$ välillä /4/ tai $15''$ ja $2'45''$ välillä /5/. Myötöjännityksenä pidetään jännitystä, jonka kohdalla kuvaajan kaarevuussäde on pienin. Jos kaarevuussäteen minimiä ei havaita, pidetään myötöjännityksenä jännitystä, jolla hiipuma (165 s) on 1 % (1.6 mm) ruuvin halkaisijasta. /4/

Myötöjännitys määritettiin Torpparinmäessä suoraan kuormituskokonaispainumakuvaajasta, koska kaarevuussäteen minimin määrittäminen hiipumakäyristä ei onnistunut. Kuormituksen ja painuman vuorosuhdetta voidaan kuvata yhtälöllä:

$$\epsilon = a_1 \cdot \left(\frac{q}{q_v}\right)^{b_1} \quad (1)$$

ϵ = laatan painuma, %

q = laatan kuormitus, kN/m^2

q_v = vertailukuormitus, kN/m^2

a_1 = vakio

b_1 = vakio

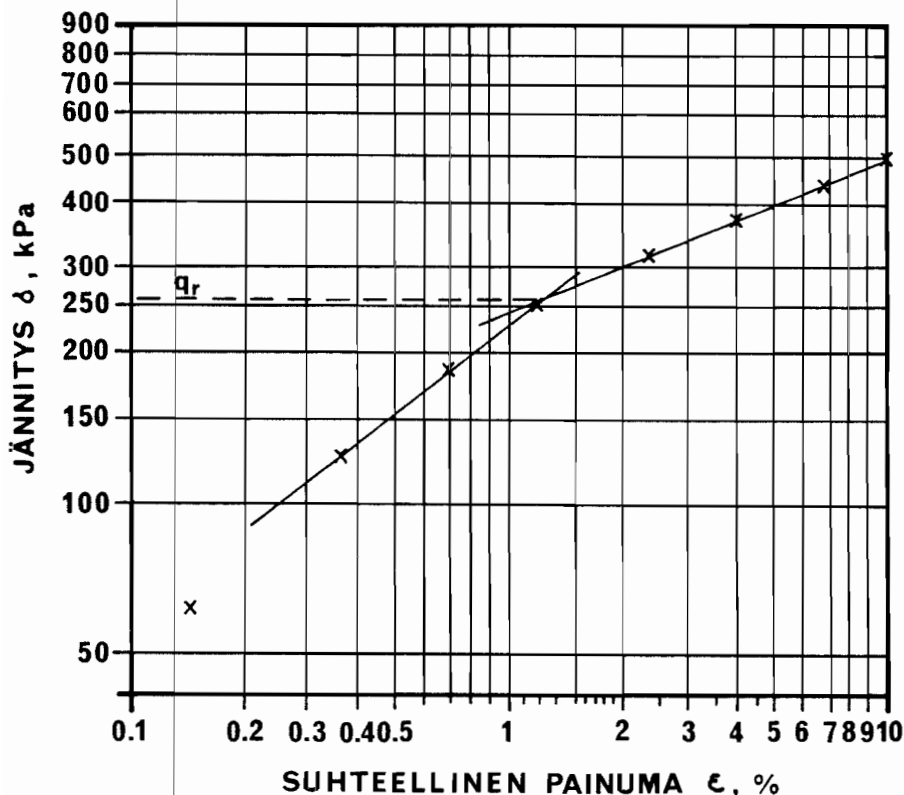
Kaksoislogaritmisessa koordinaatistossa voidaan myötöjännitys määrittää siten kuormitus-kokoonpuristumakäyrien suorille osille piirrettyjen tangenttien leikkauspisteen avulla,

esimerkki määrittämisestä esitetään kuvassa 30. Oletus, että myötöjännitys vastaisi 1.6 mm hiipumaa (0 - 165") /4/ antoi noin 2-kertaisia arvoja. Bromsin ja Bomanin /4/ mukaan voidaan pilarin myötökuormaa approksimoida ruuvikompressiometrikokeesta saadun myötöjännityksen mukaan.

$$q_r = 0,75 \cdot \sigma_r \text{ (kPa)} \quad (2)$$

q_r = myötökuorma stabiloidussa pilarissa

σ_r = myötöjännitys stabiloidussa pilarissa Ø 160 mm levyllä

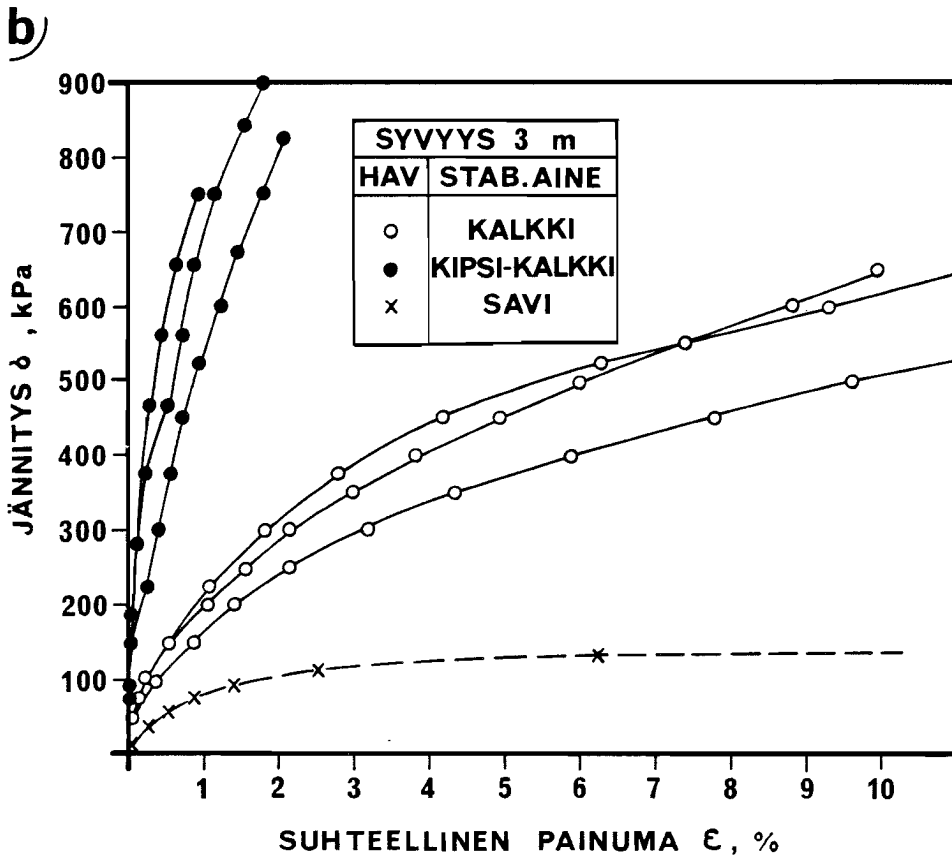
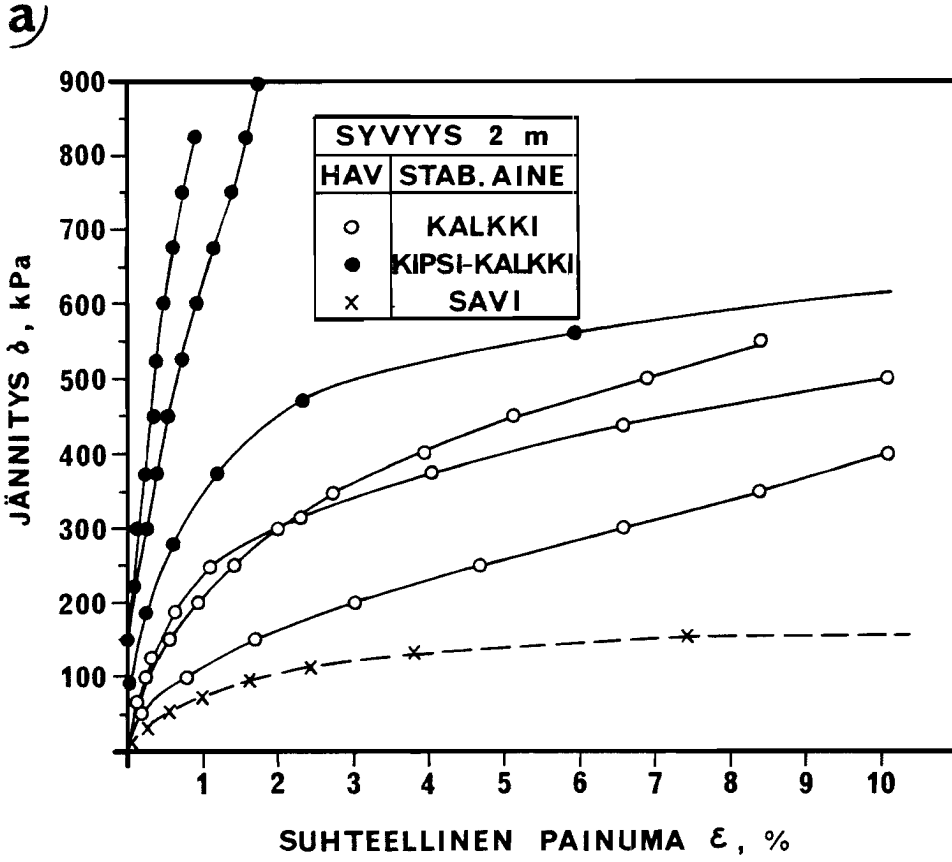


Kuva 30. Syvästabiloidun pilarin myötöjännityksen määrittäminen ruuvikompressiometritulosten perusteella.

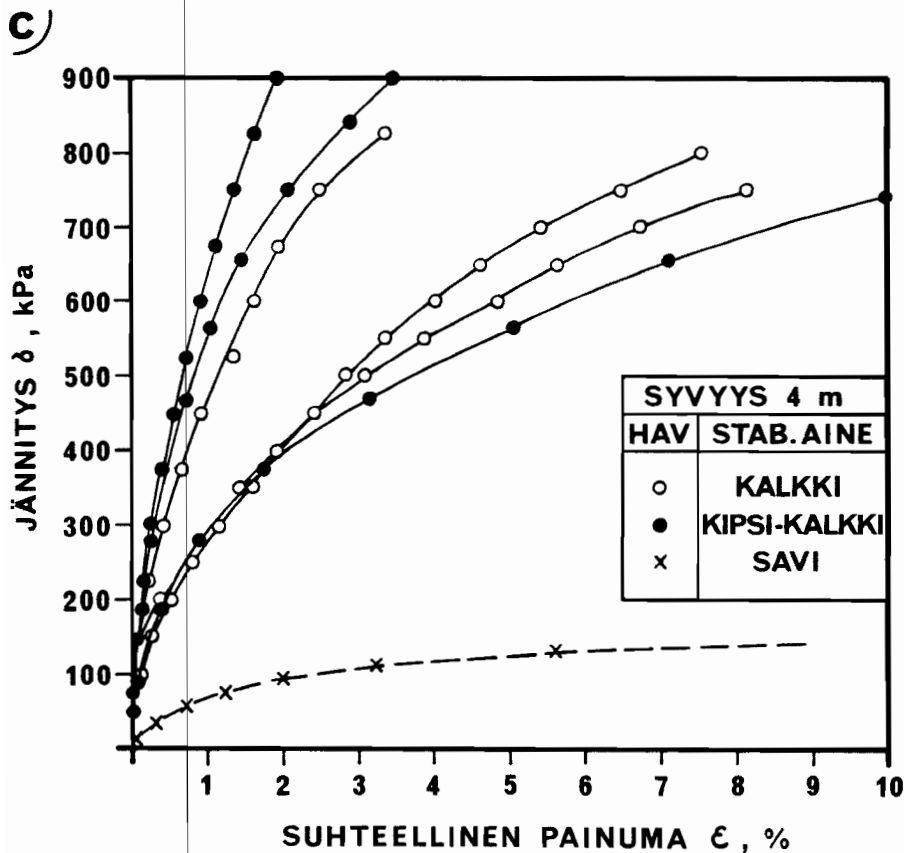
Stabiloidun pilarin leikkauslujuus vastaa puolta pilarin myötökuormasta /5/. Ruotsissa on määritetty stabiloitujen pilarien kantavuudeksi se jännitys, jolla ruuvin kokonaispainuma on 5 % (8 mm) halkaisijasta /5/. Saatuja kantavuusarvoja voidaan pitää kuitenkin vain suuntaa antavina.

6.24 Koetulokset

Kuvassa 31 on esitetty Torpparinmäen savessa sekä kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa 2, 3 ja 4 metrin



Kuva 31. Ks. seuraava sivu.



Kuva 31. Torpparinmäen kaivantokoealue. Kuormitusruuvien suhteellinen painuma (ruuvien painuma s suhteessa halkaisijaan B) jännityksen funktiona kalkki- ja kipsikalkkipilareissa a) 2 m, b) 3 m, c) 4 m syvyydessä.

syvyydessä tehtyjen kuormitusten tulosten pohjalta määritetyt kuormitusruuvien kokonaispainumakuvaajat. Kuvaajista on selvästi havaittavissa kipsikalkkipilarien selvästi pienempi kokoonpuristuvuus ja siten suuremmat myötökuormat kuin kalkkipilareissa varsinkin 2 ja 3 metrin syvyydellä. Laitteen kapasiteetti ei riittänyt kuormittamaan kipsikalkkipilareita murtoon saakka. Kuvista käy lisäksi ilmi koetulosten hajonta (n. 20 %). Kuvaajien perusteella ei voida määrittää pilareiden lujittumiskertoimia luonnolliseen saaveen nähden erilaisen murtumistapahtuman vuoksi. Myötökuormat on määritetty kohdassa 6.23 esitetyllä tavalla, ja tulokset on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Torpparinmäki. Ruuvikompressiomietrikokeiden tulokset.

Stab.aine	Syvyys z, m	Myötökuormat q _r , kN/m	Keskiarvo kN/m ²	Keskihajonta %
Kalkki 9 %	2	180, 250, 340	257	25
	3	330, 270, 390	330	15
	4	650, 450, 550	550	15
Kipsikalkki 1:1 9 %	2	440, 550, 700	563	19
	3	460, 660, 675	598	16
	4	650, 675, 350	558	26
Savi	2	120	120	-
	3	105	105	-
	4	105	105	-

Ruuvikompressiomietrikokeissa saadun murtokuorman perusteella on laskettu saven leikkauslujuus kaavan 3 mukaan olettaen että $\phi = 0$ (Tergaghi).

$$q \text{ murto} = N_c \cdot c - \gamma' \cdot z \quad (3)$$

q murto = murtokuormitus ruuvikompressiomietrikokeessa

N_c = kantavuuskerroin (= 6, Skemton)

c = koheesio

γ' = tehokas tilavuuspaino

z = kuormitussyvyys

Pilarien leikkauslujuuden on oletettu olevan puolet myötökuormasta kohdan 6.12 mukaan. Tulokset on kerätty taulukkoon 3. Saatujen tulosten perusteella on leikkauslujuus kalkkistabiloiduissa pilareissa noussut n. 7-kertaiseksi ja kipsikalkkipilareissa n. 11-kertaiseksi luonnollisen saven leikkauslujuuteen verrattuna.

Taulukko 3. Torpparinmäki. Ruuvikompressiomietrikokeiden tuloksista määritetyt leikkauslujuudet.

Syvyys z, m	Leikkauslujuus τ, kN/m ²		
	Savi	Kalkki	Kipsikalkki
2	21	96	211
3	18	124	244
4	17	206	209

7. SIIPIKAIRAUKSET

7.1 Leikkauslujuuden määrittäminen siipikairalla

Siipikairaa käytetään hienorakeisten maalajien leikkauslujuuden määrittämiseen in-situ sekä laboratorioissa. Pohjoismaissa yleisimmin käytössä olevan vakiosiiven mitat ovat 65 x 130 mm (D x h), mutta myös muita siipikokoja on käytössä.

Siiven kiertymiseen tarvittava momentti määritetään nykyisin piirturilla varustetulla momenttimittarilla. Kun momentti kerrotaan siiven koosta riippuvalla vakiokertoimella, saadaan leikkauslujuus. Koska siipikairalla saatu leikkauslujuus on ajasta riippuva suure, on yleensä leikkausaikana pidetty noin 3 min, johon on lisättävä tankojen kiertymään kuluva aika.

Cadlingin ja Odenstadin /7/ mukaan sylinterin muotoisen murtopinnan korkeus ja halkaisija ovat myös karkearakeisissa maalajeissa samat kuin siiven mitat. Siten siipikaira soveltuu syvästabiloitujen pilarien tutkimiseen. Ruotsissa on tähän tarkoitukseen käytetty lähinnä laboratoriosiipikairoja /4/, koska tavallisen siipikairan momenttikapasiteetti ei ole riittävä. Bromsin ja Bomanin /4/ mukaan on Torstensson kokeillut Tuven maanvyörymäalueella 500 x 500 mm² siipikairaa kalkkisyvästabiloinnin tutkimiseen 1978, tuloksia ei kuitenkaan ole julkaistu.

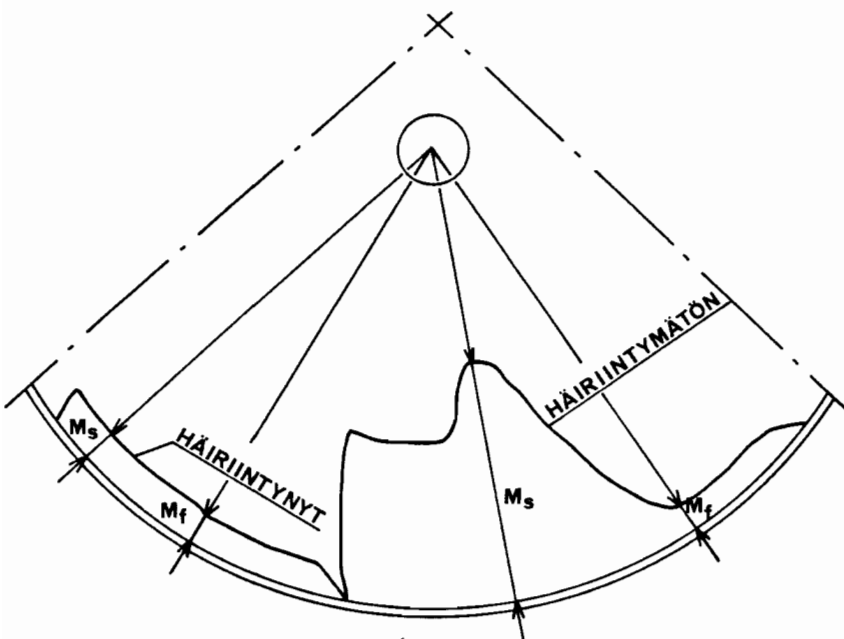
7.2 Stabiloitujen pilarien koestus tavallisella siipikairalla

7.21 Laitteisto

Torpparinmäen kaivantokoealueella käytettiin syvästabiloitujen pilarien lujuuden seurantaan Jonell & Nilsson -tyyppistä siipikairaa, jossa ei käytetä suojaputkia. Laitteisto koostuu siipikairakojeesta, Ø 20 mm tangoista, kulmaliikekytkimestä ja siivestä. Nosto- ja painamislaitte on käsikäyttöinen. Siipikairakoje sisältää vahapaperille rekisteröivän vääntömomenttimittarin sekä vaihteiston. Laitteiston momenttikapasiteetti on 0.13 kNm, joka vastaa 65 x 130 mm² (D x h)

siivellä n. 130 kN/m^2 leikkausvoimaa ja $65 \times 32.5 \text{ mm}^2$ siivellä n. 450 kN/m^2 leikkausvoimaa, käytännössä saavutettava maksimimomentti on hieman pienempi.

Tankoja kierrettäessä kiertyvät vain tangot aluksi, jolloin tankojen hankauksesta aiheutuva momentti M_F rekisteröityy paperille (kuva 32). Kun kulmaliike (15°) loppuu kiertyvät tangot ja siipi yhdessä, jolloin saadaan momentti M_S . Siiven murtohetkellä kiertämiseen tarvittava momentti M saadaan edellä mainittujen momenttien erotuksesta.

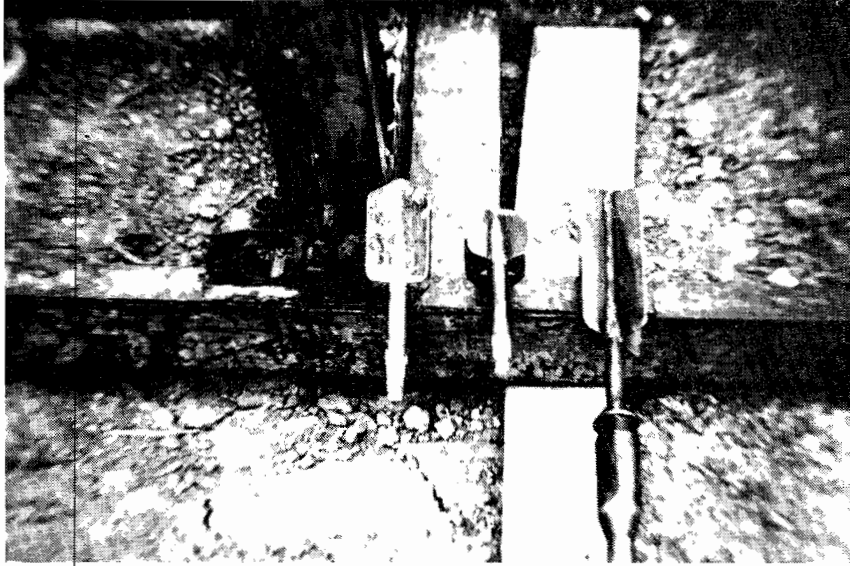


Kuva 32. Esimerkki tavallisen siipikairan piirturin momenttikäyrästä häiriintymättömässä ja häiriintyneessä maassa.

7.22 Koetulokset

Torpparinmäen kaivantokoealueella seurattiin kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien lujittumista $65 \times 130 \text{ mm}^2$ ($D \times h$) siipikairalla 7, 14 ja 28 vuorokauden ikäisinä. Siipikairakojeen leikkauslujuuskapasiteetti n. 120 kPa ei kuitenkaan riittänyt, ja siipikairaukset jouduttiin keskeyttämään.

Pilarien ollessa n. 270 vrk ikäisiä kokeiltiin pienten siipien $65 \times 32.5 \text{ mm}^2$ ja $65 \times 65 \text{ mm}^2$ käyttöä pilarien koestamiseen (kuva 33).

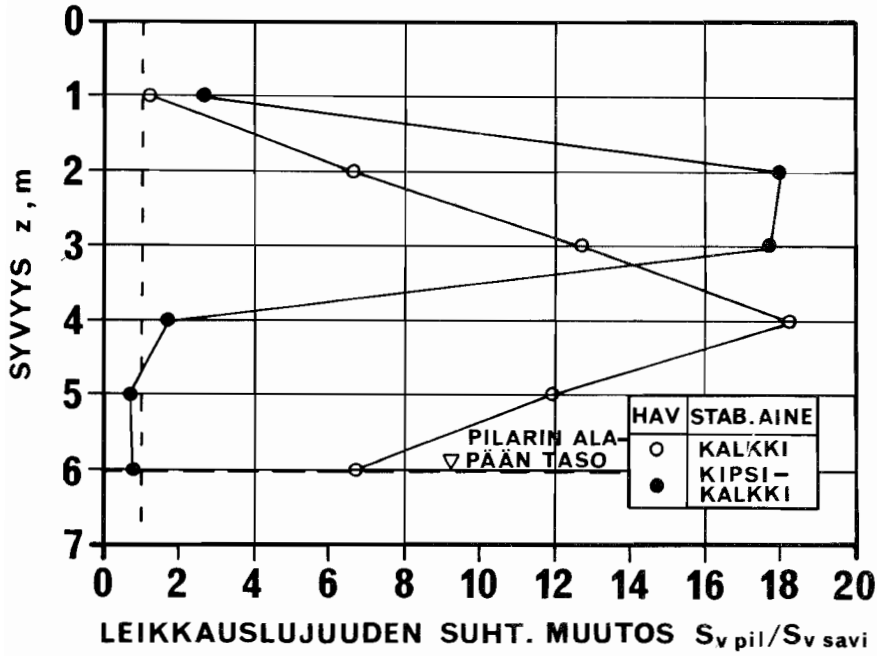


Kuva 33. Torpparinmäessä käytettyjä siipikairan siipiä vasemmalta 65 x 65, 65 x 32.5 ja 65 x 130 mm² sekä kulmaliikeykytkin.

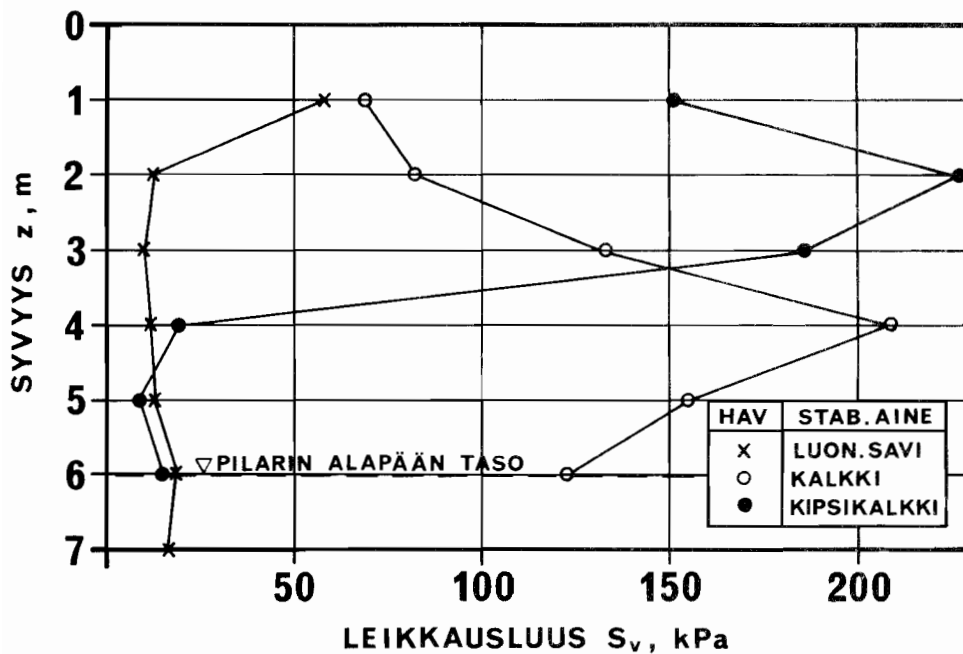
Kairaukset tehtiin pilarin keskeltä vähintään kolmessa samalla stabilointiaineella stabiloidussa pilarissa metrin välein syvyysuunnassa.

Kairaustulokset 65 x 32.5 mm² siivellä esitetään kuvissa 34 ja 35. Kipsikalkilla stabiloidut pilarit lujittuivat selvästi kalkkistabiloituja pilareja paremmin 1 - 3 m syvyydessä, 4 m syvyydellä ei kipsikalkkipilareissa ollut havaittavissa enää lujittumista. Tulos johtui todennäköisesti stabilointikoneen syöttöhäiriöistä, joita dihydraattikipsiä käytettäessä oli runsaasti. Kalkkistabiloitujen pilarien pienempi lujuus 1 - 2 m syvyydessä johtui pilarin heikosta keskiosasta. Koetulosten keskihajonta oli sekä kalkki- että kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa n. 30 %, jota on pidettävä hyvänä tuloksena siiven pienen halkaisijan huomioon ottaen.

Stabiloitujen pilarien kerroksellisuudesta syvyysuunnassa sekä poikkileikkauksen epähomogeenisuudesta johtuen soveltuu ns. matala siipi $D > h$ paremmin stabiloitujen pilarien tutkimiseen. Torpparinmäessä käytetyn 65 x 32.5 mm² siiven halkaisija oli kuitenkin liian pieni, koska siivellä pystyttiin seuraamaan vain pilarin heikomman keskiosan lujuutta.



Kuva 34. Torpparinmäen kaivantokoealue. 270 vrk lujittuneiden kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien suhteellinen leikkauslujuuden muutos syvyyden funktiona 65 x 32.5 mm² siipikairalla.



Kuva 35. Torpparinmäen kaivantokoealue. 270 vrk lujittuneiden kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus syvyyden funktiona 65 x 32.5 mm² siipikairalla,

Torpparinmäen koalueen muut siipikairaustulokset esitetään kenttä- ja laboratoriokokeiden vertailun yhteydessä kappaleessa 9.

7.3 Stabiloitujen pilarien koestus pilarisiipikairalla

7.31 Laitteisto

Myllypuron koerakentamiskohteen pilarien lujuuden tutkimiseen valmistettiin $130 \times 65 \text{ mm}^2$ siipikaira (pilarisiipikaira), jonka kiertämiseen tarvittava momentti saadaan kaavasta:

$$M = \left(\frac{\pi \cdot D^3}{3} + \frac{\pi \cdot D^3}{6} \sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}} \right) \cdot S_v \quad (4)$$

$H = D/2$

$M =$ murtohetkellä mitattu momentti

$h =$ siiven korkeus (= 0.065 m)

$h^2 =$ siiven kärjen korkeus (= 0.020 m)

$D =$ siiven halkaisija (= 0.130 m)

$S_v =$ maan leikkauslujuus siipikairalla

Jos sijoitetaan arvot, saadaan

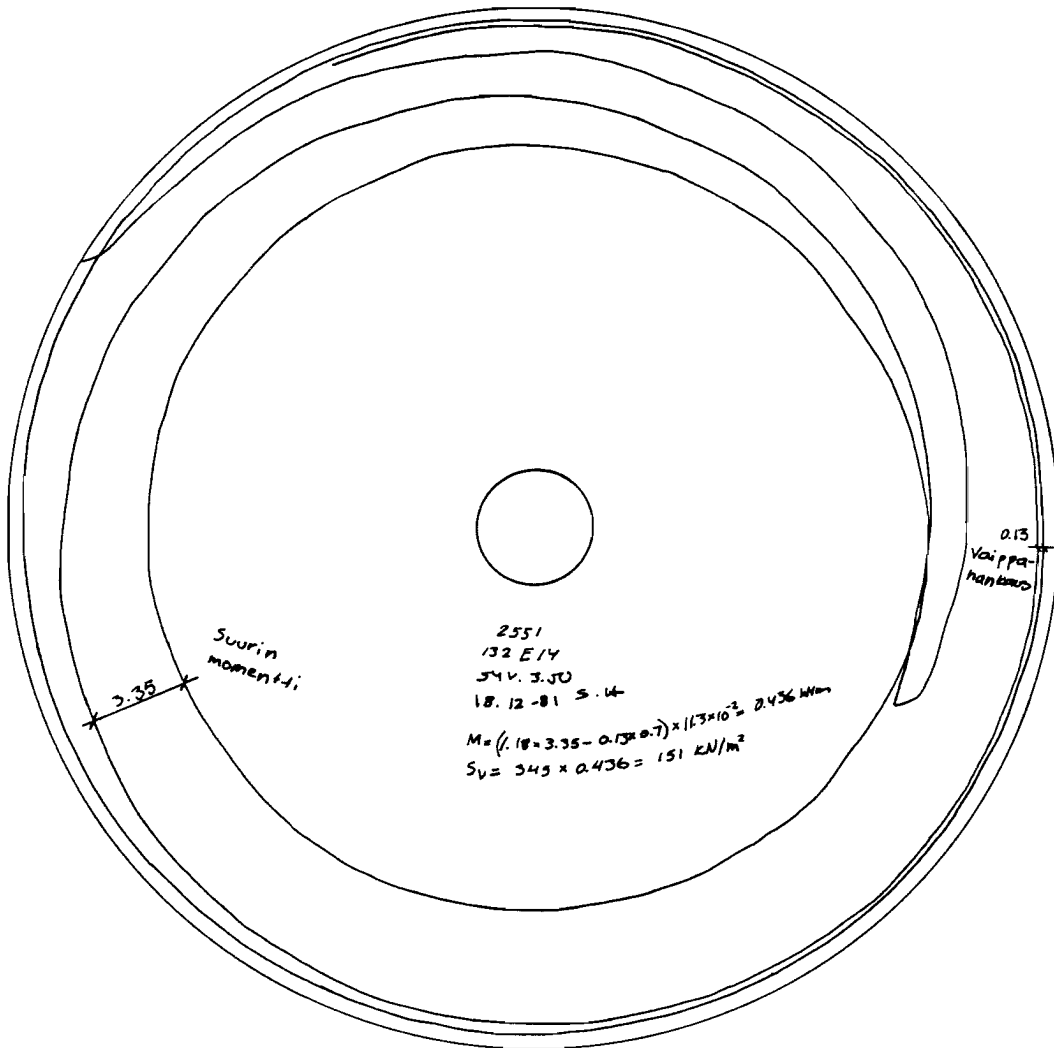
$$M = 2.9 \times 10^{-3} \times S_v \quad (5)$$

M (kNm)

S_v (kN/m²)

Jos $S_v = 250 \text{ kN/m}^2$, on siiven kiertämiseen tarvittava momentti 0.725 kNm eli noin 6 kertaa tavallisen siipikairakojeen maksimimomentti. Tarvittava lisämomentti saatiin muuttamalla Jonell & Nilsson siipikairakojeen välitystä heijarikairan vaihteiston avulla, jonka välityssuhde on 1:11.3. Tällöin oli siipikairakojeen maksimimomentti n. 1.3 kNm, joka vastaa pilarisiipikairalla noin 460 kN/m^2 leikkausvoimaa.

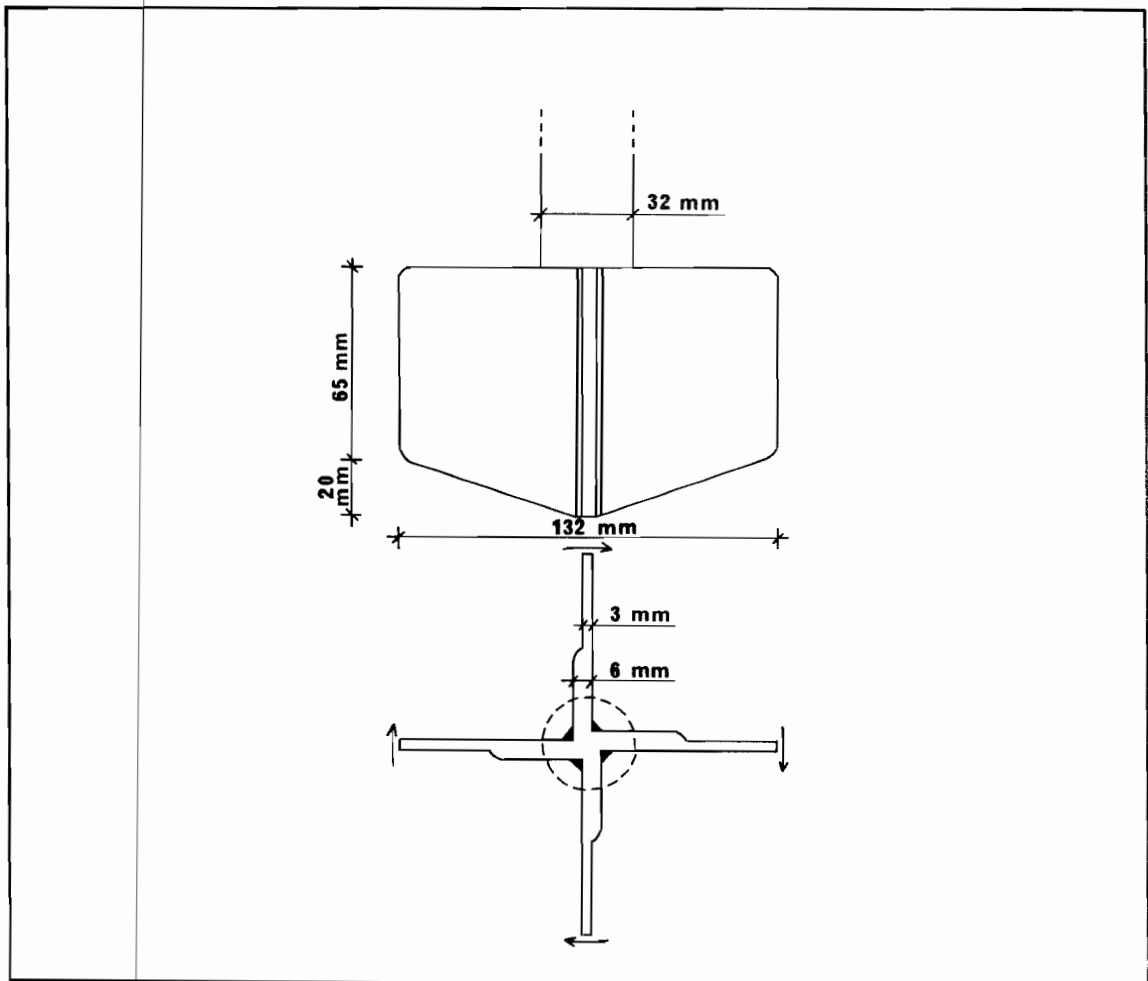
Välityksen lisääminen lisäsi myös piirturin liikettä 11.3-kertaiseksi, jolloin kuvassa 32 esitetty käyrä muuttuu kuvassa 36 esitetyn kaltaiseksi. Kuvassa esitetään leikkauslujuuden määrittäminen käyrän perusteella.



Kuva 36. Esimerkki Myllypurossa käytetyn pilarisiipikairan momenttikäyrästä sekä leikkauslujuuden määrittämisestä.

Käytetyn siiven mitat esitetään kuvassa 37. Siipeä suunniteltaessa pyrittiin mahdollisimman pieneen pinta-alasuhteeseen (12 %) pilarin häiriintymisen vähentämiseksi siipeä painettaessa. Siipi viistettiin tunkeutuvuuden parantamiseksi. Kairaustankoina käytettiin \varnothing 32 mm heijarikairan tankoja 22 mm tapeilla.

Siipikairalaite oli kytkettynä kairausmonitoimikone A-sondiin, jolla suoritettiin siiven painaminen maahan sekä nosto (kuva 38). Siipeä kierrettiin sähkömoottorilla vakionopeudella n. $0.2^{\circ}/s$. Tällöin murtokohta saavutettiin 2 - 5 m syvyydellä 3 - 6 minuutissa pilarin lujuudesta riippuen.



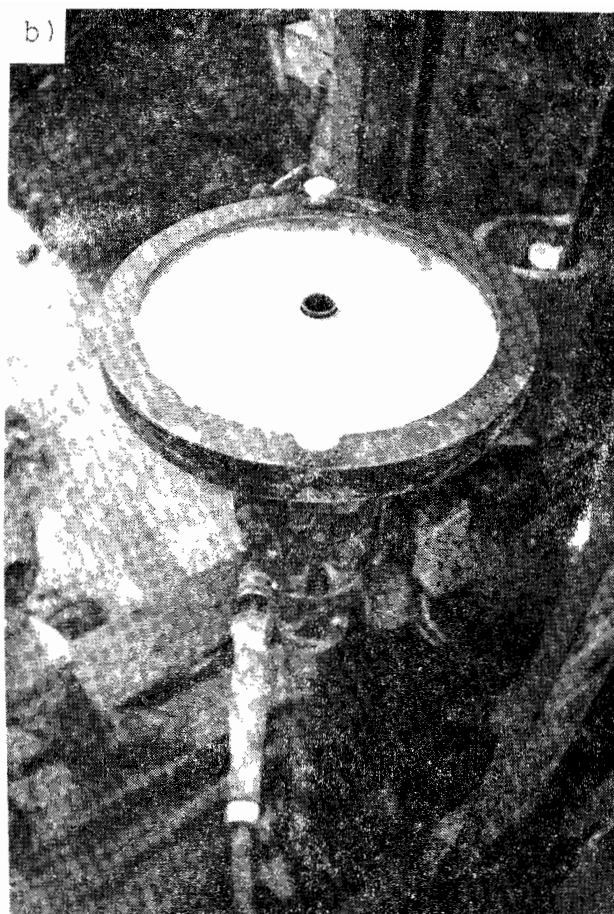
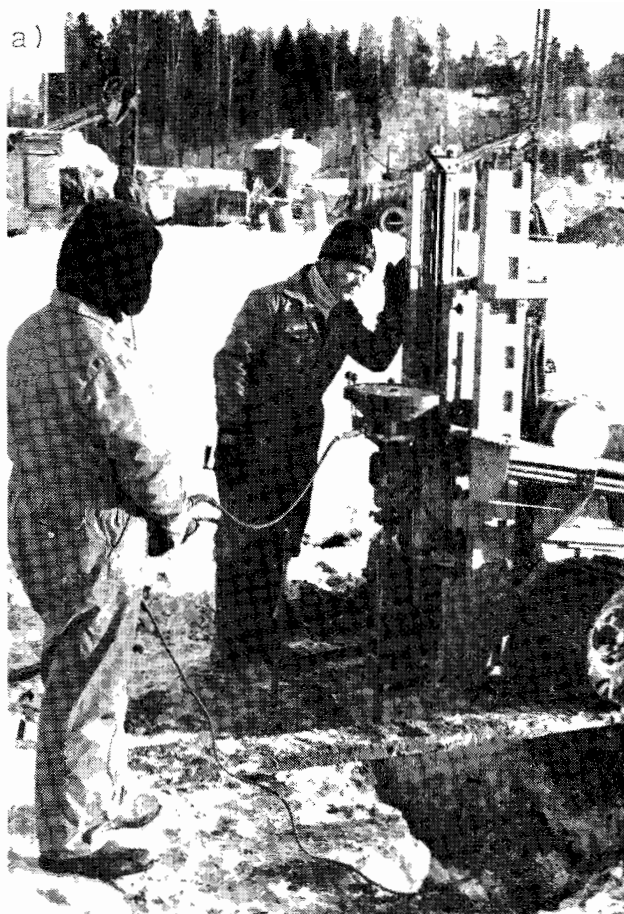
Kuva 37. Myllypurossa käytetyn pilarisiipikairan mitat.

7.32 Koetulokset

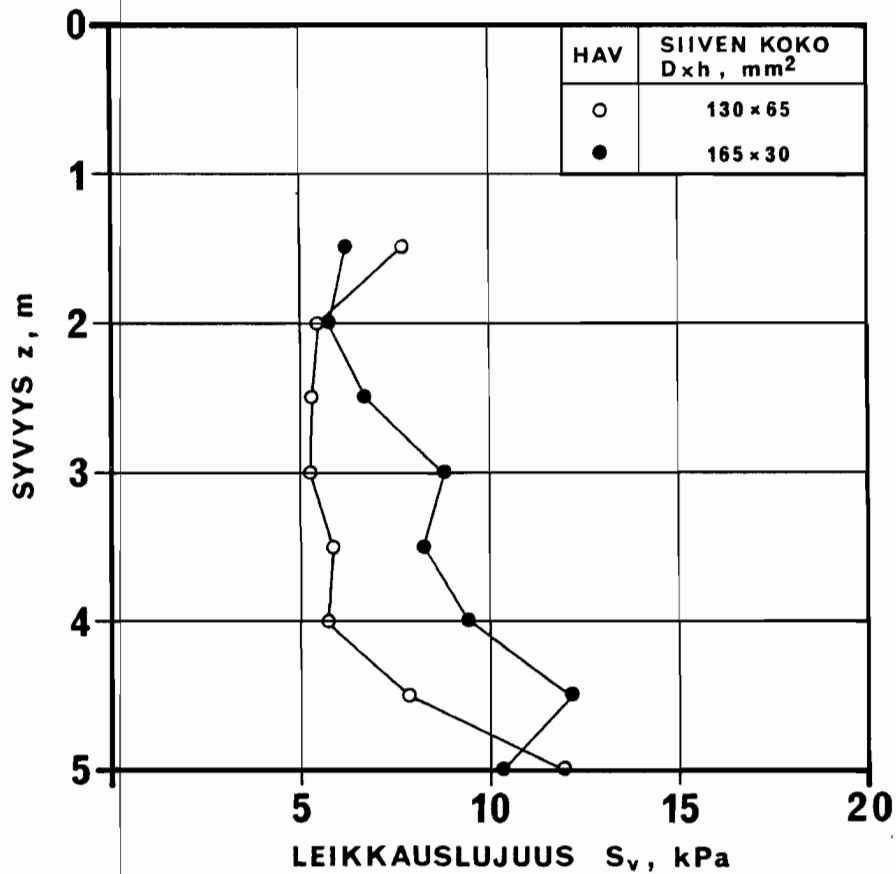
Myllypuron koekentällä tehtiin pilarisiipikairalla kairauksia 7, 14, 28, 56 ja 90 vuorokauden ikäisissä kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa rinnan puristinkairaus-ten kanssa. Tulosten hajonnan selvittämiseksi tutkittiin aina kolme pilaria kunakin ajankohtana.

Kairauksia tehtiin 0.5 m välein 1.5 - 5 m syvyydellä maanpinnasta kaikkiaan 240 kpl 30 pilarissa.

Ennen stabiloitujen pilarien koestamista verrattiin $130 \times 65 \text{ mm}^2$ ja $65 \times 130 \text{ mm}^2$ siipikairoja luonnollisessa savessa Myllypuron koealueella. Tulokset esitetään kuvassa 39. Pilarisiipikaira antoi hieman pienempiä arvoja kuin "vakiosiipi".



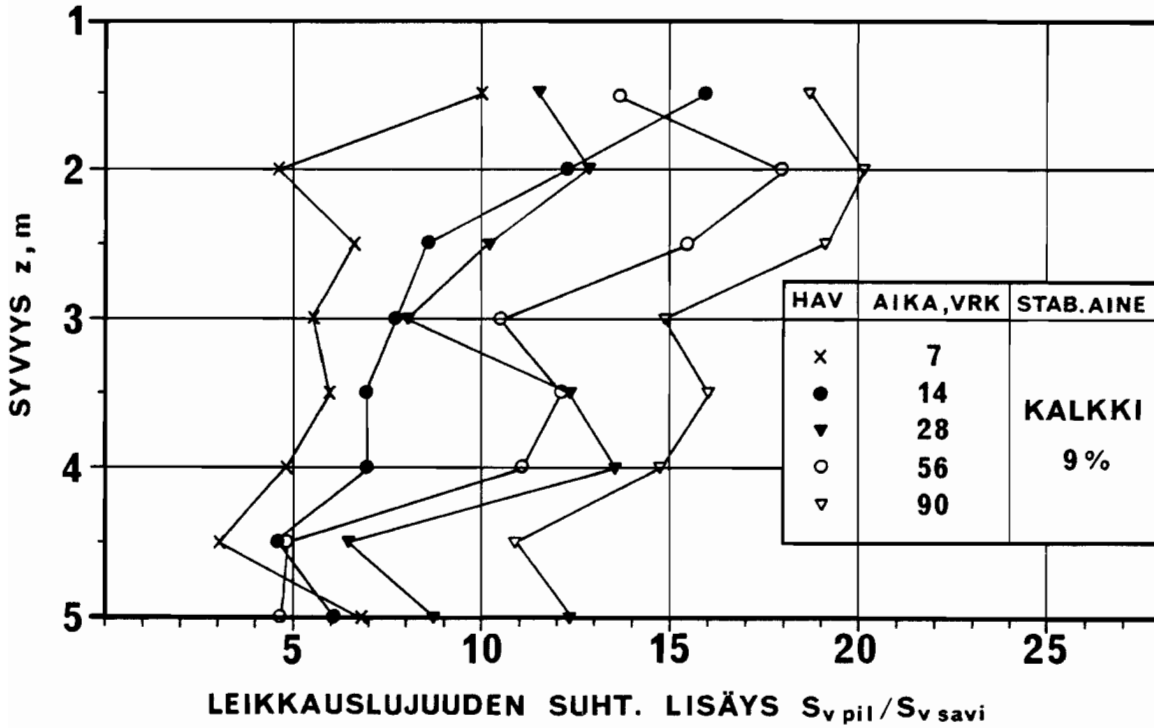
Kuva 38. Myllypuro. Syvästabiloitujen pilarien siipikairaus
a) kairaus käynnissä, b) momenttimittari, c) pilarin pää kaivetaan näkyviin.



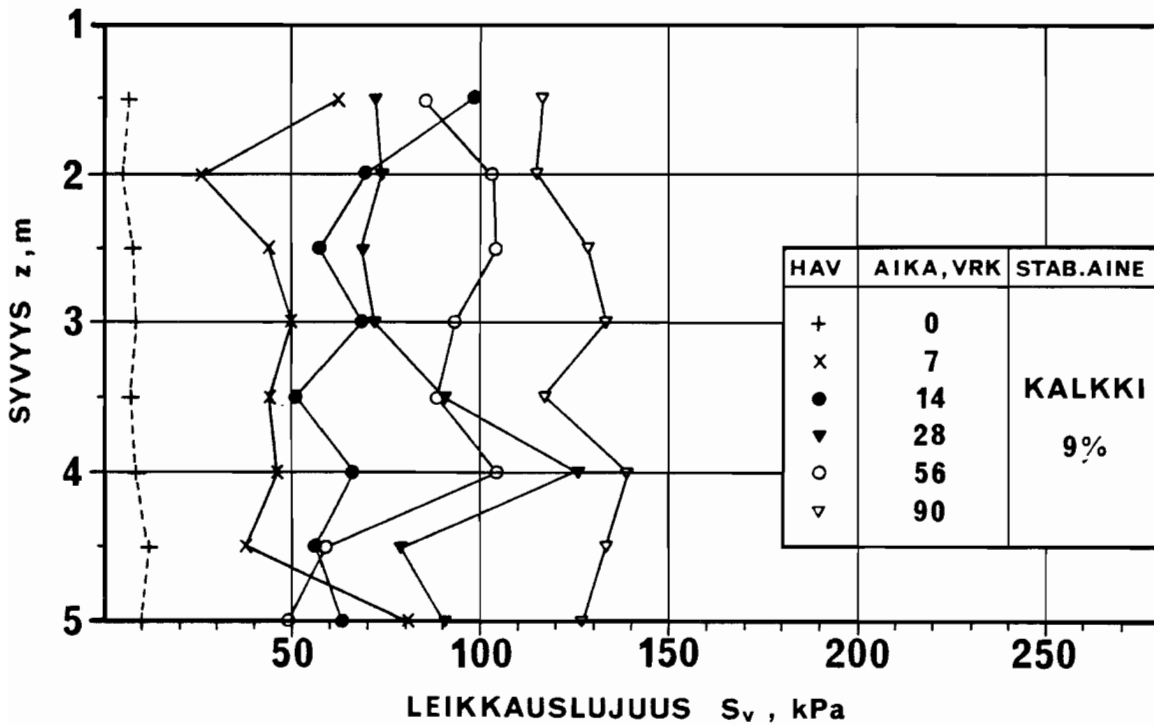
Kuva 39. Myllypuro. Siipikairausten tulokset 65 x 130 mm² ja 130 x 65 mm² siipikairalla.

Välityksistä johtuen on pilarisiipikairan momenttimittarin tarkkuus kuitenkin huono pehmeässä savessa, joten tuloksia ei voida pitää luotettavina.

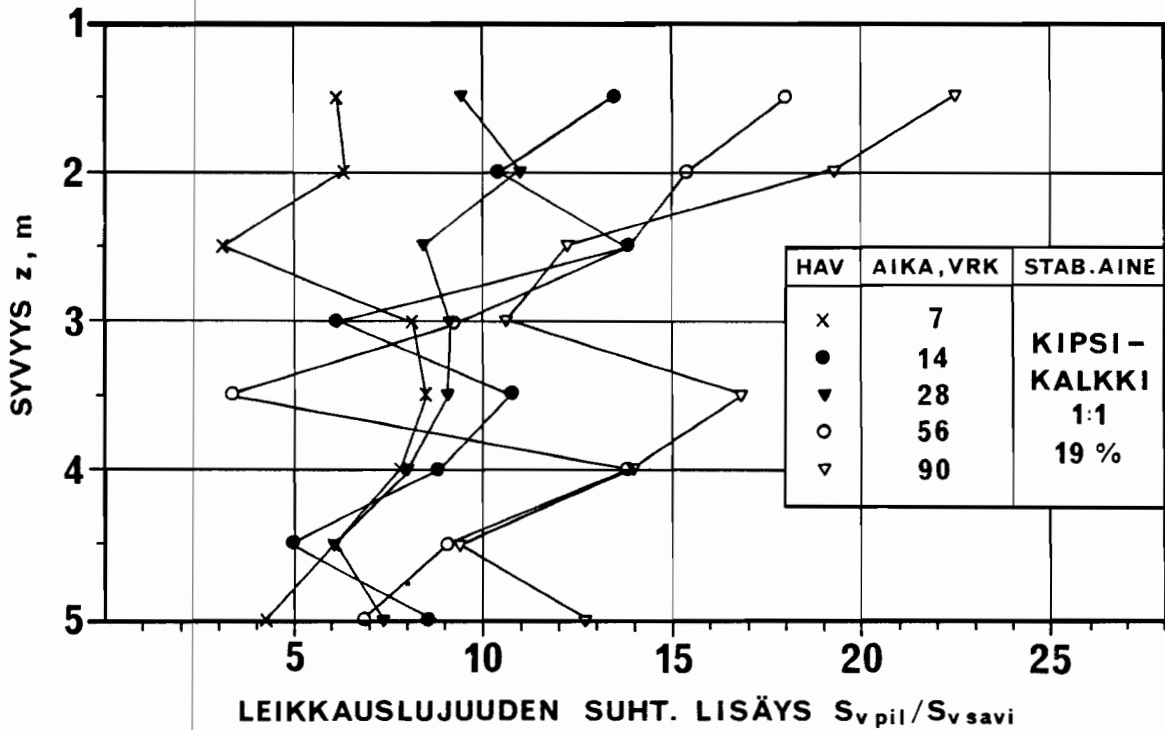
Kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa tehtyjen pilarisiipikairausten tulokset esitetään kuvissa 40 - 43. Tulosten perusteella ovat kipsikalkkistabiloidut pilarit ja kalkkistabiloidut pilarit lujittuneet yhtä hyvin. Kalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus nousi 90 vrk aikana n. 15-kertaiseksi luonnolliseen saveen verrattuna, joka vastaa n. 120 kN/m² leikkauslujuutta. Kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa leikkauslujuus nousi n. 11-kertaiseksi luonnolliseen saveen verrattuna, joka vastaa n. 90 kN/m² leikkauslujuutta. Vähiten on kummallakin stabilointiaineella lujittunut 2 - 3 m syvyydessä oleva kerros.



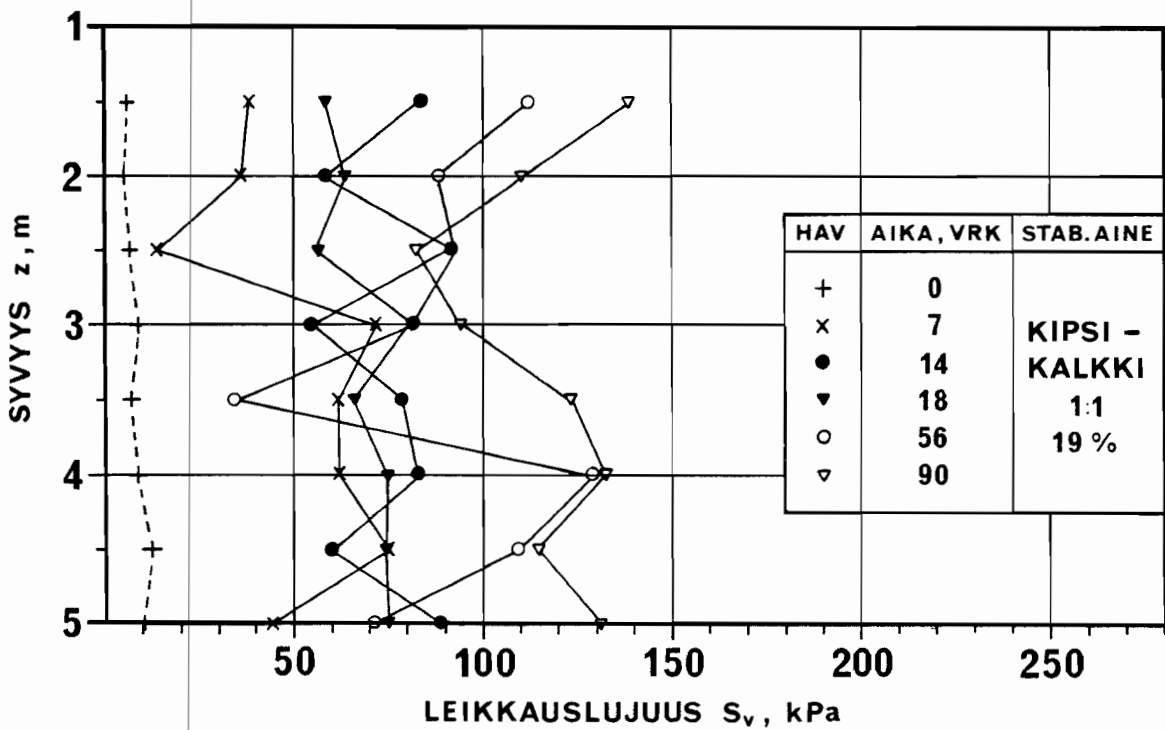
Kuva 40. Myllypuro. Kalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuden suhteellinen lisäys pilarisiipikairalla.



Kuva 41. Myllypuro. Kalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus pilarisiipikairalla.

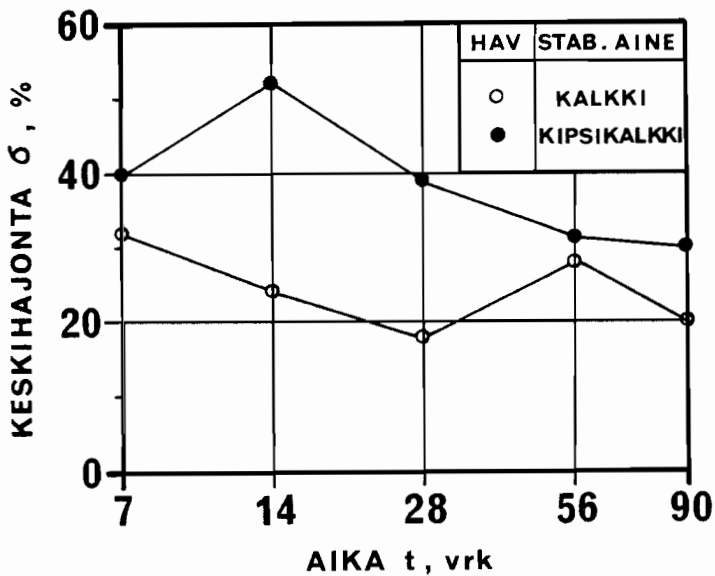


Kuva 42. Myllypuro. Kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuden suhteellinen lisäys pilarisiipikairalla.



Kuva 43. Myllypuro. Kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus pilarisiipikairalla.

Kipsikalkkistabiloitujen pilarien kairaustuloksissa oli havaittavissa suuri hajonta sekä syvyysuunnassa että eri ajankohtina suoritettujen kairausten välillä. Kuvas-
 sa 44 esitetään siipikairaustulosten keskihajonnat, jotka on määritetty aina kolmessa pilarissa suoritettujen kai-
 raustulosten pohjalta eri ajankohtina. Hajonta on selvästi
 suurempi kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa (30 - 40 %) kuin kalkkistabiloiduissa pilareissa (20 - 30 %).



Kuva 44. Myllypuro. Kalkki- ja kipsikalkkipilarien pilari-
 siipikairaustulosten n-painotteinen keskihajonta.

Tulosten perusteella ei kipsikalkkipilarien tekeminen ole täysin onnistunut. Syy on todennäköisesti syvästabilointi-
 koneen syöttöhäiriöissä tai kalkin ja hemihydraattikipsin riittämättömässä sekoituksessa.

8. LABORATORIOTUTKIMUKSET

8.1 Maalajien indeksiominaisuudet

Torpparinmäen ja Myllypuron koerakentamiskohteissa otetuista maanäytteistä määritettiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston laboratoriossa seuraavat indeksiominaisuudet:

- tilavuuspaino, γ
- vesipitoisuus, w
- humuspitoisuus, H_u

Tulokset on esitetty kuvissa 11 ja 15. Tuloksia käytettiin lähinnä maan stabiloituvuuden tutkimiseen.

8.2 Stabiloointikoekappaleiden valmistus

Torpparinmäen ja Myllypuron koerakentamiskohteiden savinäytteillä tehtiin stabiloituvuuskokeet Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa.

Koekappaleet tehtiin metallisiin näytepurkkeihin, joiden korkeus oli 170 mm ja halkaisija 50 mm. Koekappaleisiin tarvittava stabilointiainemäärä laskettiin kuivatilavuuspainon perusteella, joka saatiin tunnetun vesipitoisuuden avulla. Stabilointiaine sekoitettiin tasaisesti savimasaan, jonka jälkeen se sullottiin purkkeihin pieninä kerroksina. Kerrosten välinen pinta karhennettiin heikkousten välttämiseksi.

Koekappaleita säilytettiin veden alla kosteushuoneessa, jonka lämpötila oli $+4^{\circ}$ C. Näytepurkit oli jätetty päistään avoimiksi, jotta näytteet pääsivät kyllästymään vedellä. Säilytys vastasi siten olosuhteita maastossa pohjaveden pinnan alapuolella.

Säilytyksen aikana oli kipsikalkkinäytteissä havaittavissa selvää laajenemista, mikä johtui todennäköisesti ettringiitin muodostumisesta.

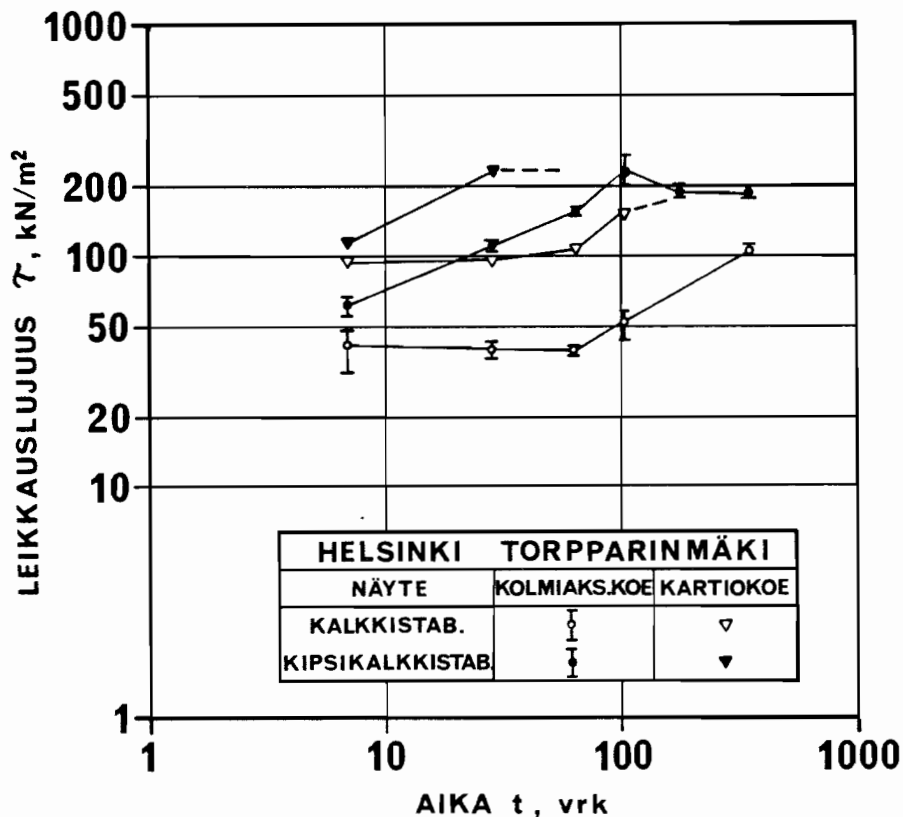
8.3 Puristuskokeet

8.3.1 Stabilointikoekappaleet

Stabilointikoekappaleiden puristuskokeet tehtiin Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion kolmiaksiaalikoelaitteella.

Torpparinmäen stabilointikoekappaleille käytettiin leikkausnopeutena 0.3 %/min mitattuna näytteen korkeudesta. Näytteen halkaisija oli 50 mm ja korkeus 100 mm. Koekappaleet oli valmistettu 1.5 - 3 m syvyydellä otetusta häiriintyneestä savesta, johon sekoitettiin 8, 12 ja 16 % dihydraattikipsikalkkia (1:1 ja 1:2). Osa stabiloitiin 8, 12 ja 16 % sammuttamattomalla kalkilla. Kujalan /13/ tekemien kokeiden mukaan lujittui 16 % dihydraattikipsikalkkiseos (1:1) parhaiten. Kalkkistabiloiduista näytteistä lujittui 16 % seos parhaiten.

Koekappaleet leikattiin 7, 28, 63, 105 ja 360 vrk ikäisinä. Sivupaineena käytettiin $\sigma_3 = 25 \text{ kN/m}^2$ koetulosten hajonnan pienentämiseksi. Kuvassa 45 esitetään 16 % kipsikalkki- ja 16 % kalkkikoekappaleiden lujittuminen ajan funktiona.



Kuva 45. Torpparinmäki, Kotitorpantie. Stabilointikoekappaleiden puristinkokeiden tulokset /13/.

Tulosten perusteella olivat dihydraattikipsikalkilla stabiloidut koekappaleet lujittuneet n. 2-kertaisiksi kalkki-stabiloituihin koekappaleisiin verrattuna 360 vrk ikäisinä. Kalkkistabiloinnissa oli lujittuminen vielä kesken. Jos otaksutaan, että koekappaleiden leikkauslujuus τ vastasi puolta pääjännitysten erotuksesta $\sigma_1 - \sigma_3$, oli kalkkikoekappaleiden leikkauslujuus n. 100 kN/m^2 ja kipsikoekappaleiden noin 200 kN/m^2 360 vrk ikäisinä.

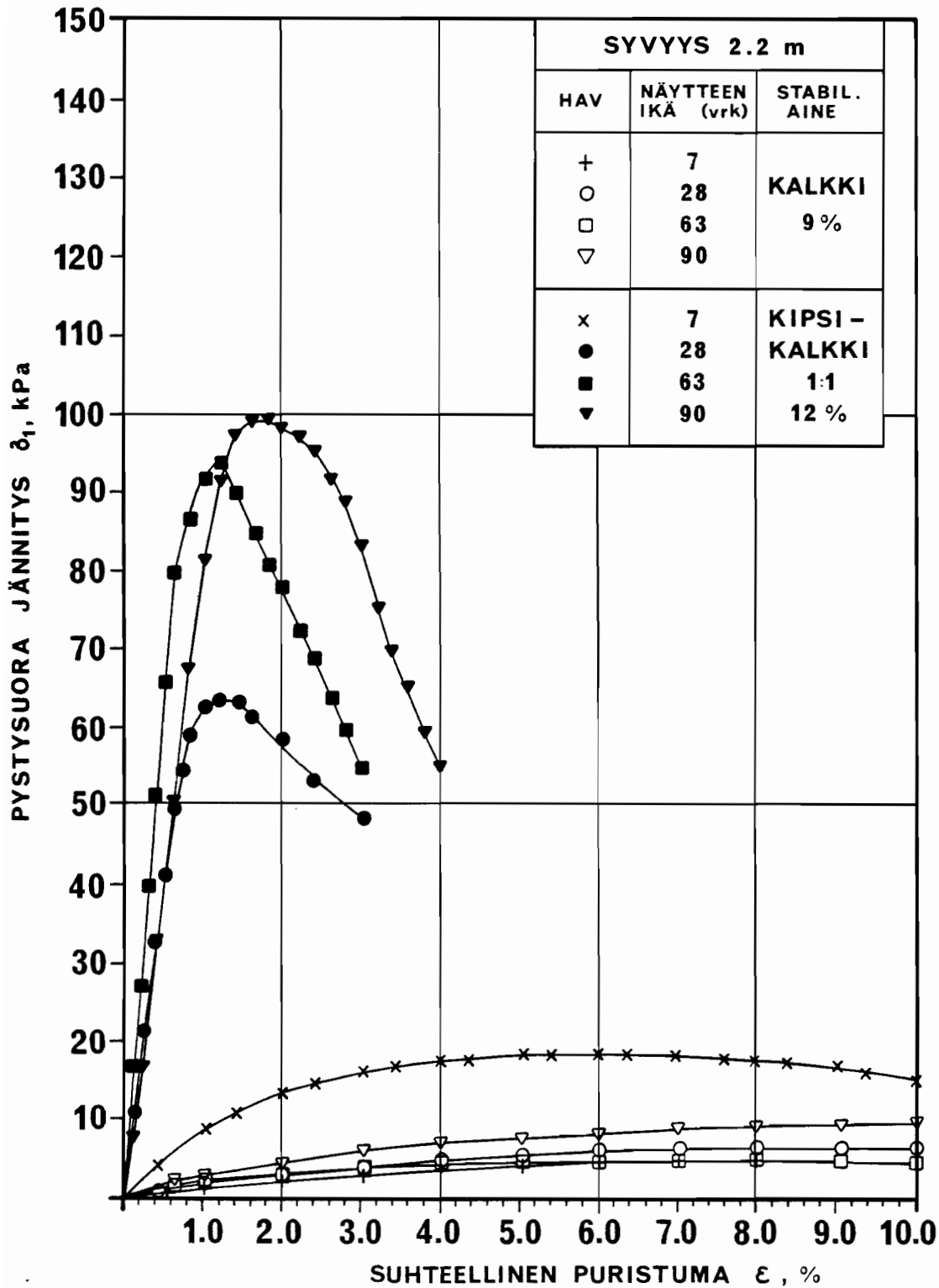
Myllypuron koerakentamiskohteiden stabilointikoekappaleilla käytettiin leikkausnopeutena 0.17 \%/min . Koekappaleet oli valmistettu edustamaan 2.2, 3 ja 4 m:n syvyyksiä maanpinnasta. Stabilointiaineena käytettiin 9 % sammuttamatonta kalkkia sekä 12 % hemihydraattikipsikalkkia. Puristuskokeet ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) tehtiin 7, 28, 63 ja 90 vrk ikäisille koekappaleille kolmiaksoalilaitteistolla. Kunakin ajankohdana tehtiin kolme eri puristuskoeetta.

Puristuskokeiden keskiarvojen mukaan piirretyt jännityspuristumakäyrät esitetään kuvissa 46, 47 ja 48.

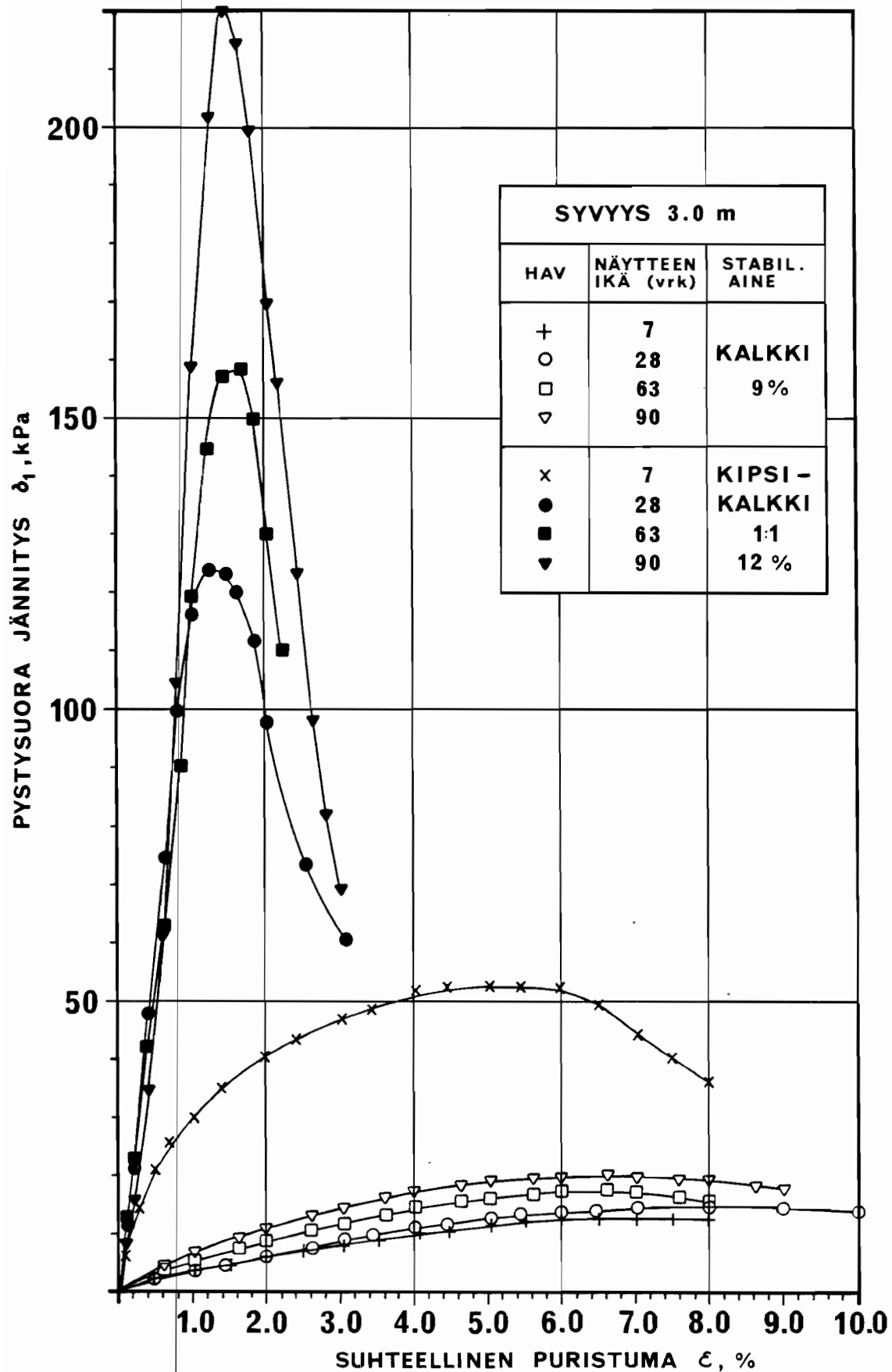
Tulosten mukaan 2.2 m syvyydeltä otetulla savella tehdyt koekappaleet ovat lujittuneet 3 kuukaudessa vähiten ja 4.0 m koekappaleet eniten, ero on noin 5-kertainen sekä kalkki-että kipsikalkkikoekappaleilla. Toisaalta kipsikalkkikoekappaleet ovat lujittuneet noin 10-kertaisiksi kalkkikoekappaleisiin nähden. Taulukossa 4 esitetään Myllypuron savesta tehtyjen stabilointikoekappaleiden puristuslujuudet 3 kk ikäisinä.

Taulukko 4. Myllypuro. Stabilointikoekappaleiden puristuslujuudet 3 kk ikäisinä.

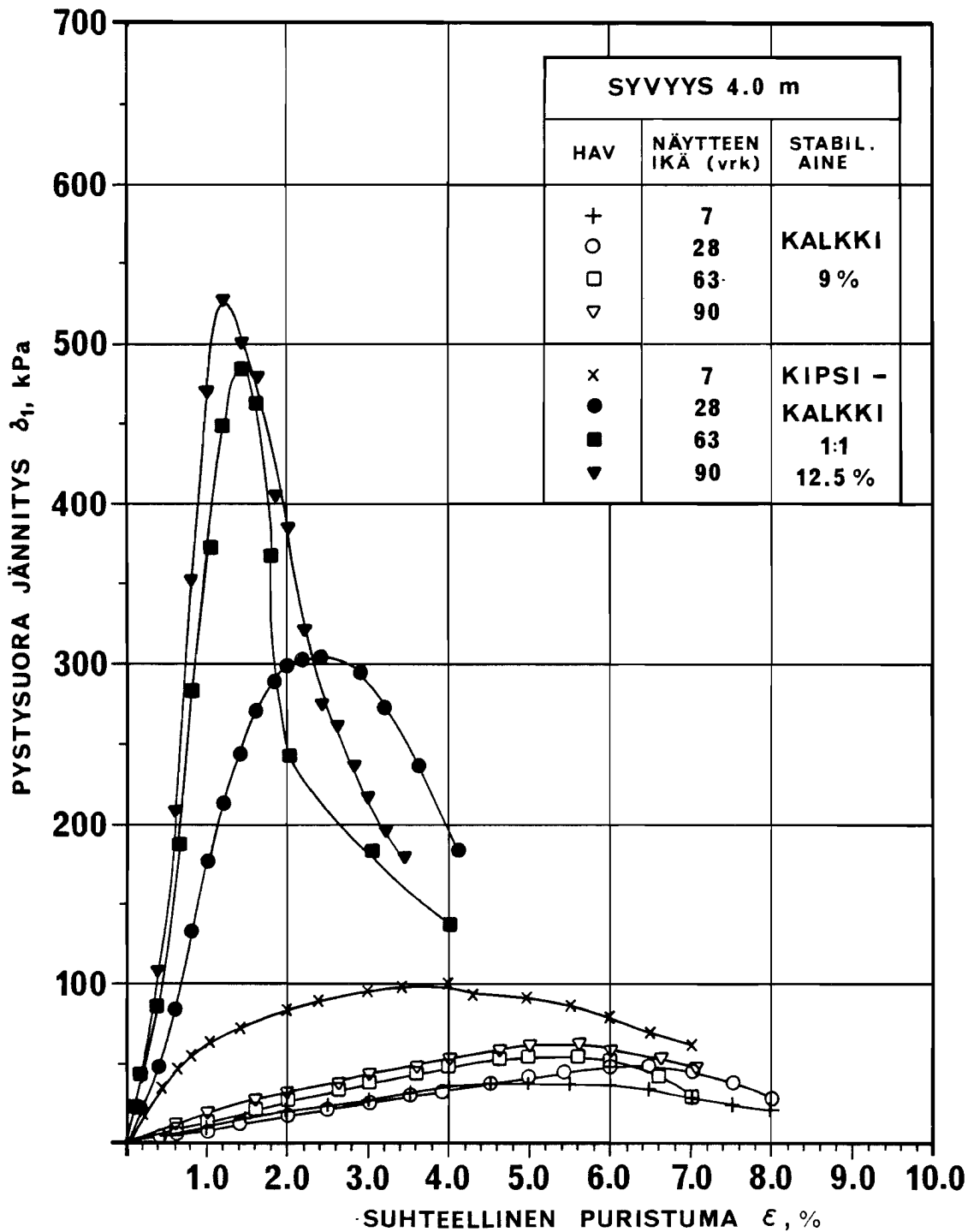
Näytesyvyys z, m	Puristuslujuudet σ_1 , kN/m^2	
	Kalkki	Kipsikalkki
2.2	10	100
3	20	220
4	62	530



Kuva 46. Myllypuro. 2.2 m syvyyttä edustavien kalkki- ja kipsikalkkikokekappaleiden puristinkokeiden tulokset eri ajankohtina.



Kuva 47. Myllypuro. 3.0 m syvyyttä edustavien kalkki- ja kipsikalkkikoekappaleiden puristinkokeiden tulokset eri aikavälillä. Suhteellinen puristus 30



Kuva 48. Myllypuro. 4.0 m syvyyttä edustavien kalkki- ja kipsikalkkikoekappaleiden puristinkokeiden tulokset eri ajankohtina.

Kipsikoekappaleilla pystysuoran jännityksen maksimi saavutetaan yhä pienemmillä muodonmuutoksilla (5 % → 1.5 %) puristuslujuuden kasvaessa ajan mukana. Myös kalkkistabiloituja koekappaleita puristettaessa oli havaittavissa pystysuoran jännityksen maksimikohdan saavuttamiseen tarvittavan muodonmuutoksen ϵ pienentyminen ajan mukana (10 % → 5 %).

8.32 Kokonaiset pilarit

Torpparinmäen kaivantokoealueen kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduista pilareista otetut "tynnyrinäytteet" koestettiin VTT:n Katajanokan aineenkoestushallissa. Koestukset tehtiin 1-aksiaalisina puristuskokeina käyttäen puristinta, jonka puristusnopeus oli säädettävissä portaattomasti. Kokeet suoritti VTT:n betonilaboratorio VTT:n geotekniikan laboratorion sekä Helsingin geoteknisen osaston valvomana.

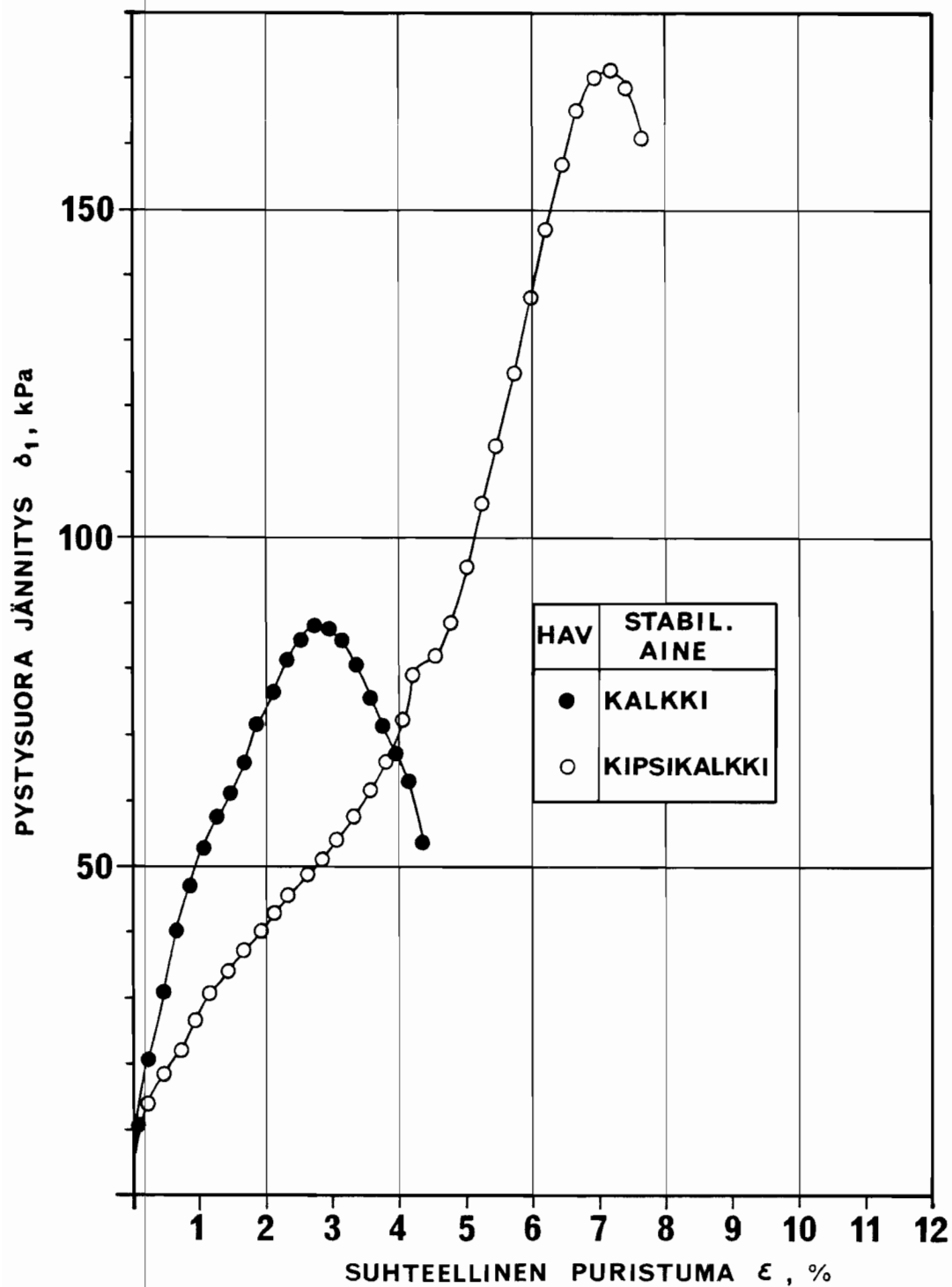
Näytteiden ikä koestettaessa oli n. 12 kk. Näytteitä oli säilytetty tynnyreissä, jotka oli peitetty muoveilla kosteuden haihtumisen estämiseksi. Puristusnopeutena käytettiin kokeessa 0.05 %/min näytteen korkeudesta, joka vaihteli 390 - 770 mm. Kuvassa 49 esitetään kuvasarja koestuksesta. Näytteet saatiin tynnyreistä polttoleikkaamalla. Koska pilarin ympärillä oli n. 50 mm savikerros, ei hitsausliekki päässyt vaikuttamaan näytteeseen.

Näytteen alapää, joka oli tasattu jo pilarin esiinkaivamisen yhteydessä, oli tynnyrin pohjalevyä vasten. Näytteen yläpää tasattiin tynnyrin poistamisen jälkeen ja päälle asetettiin jäykkä \varnothing 500 mm kuormituslevy. Näytettä kuormitettiin kunnes murtokohta oli selvästi saavutettu. Näytteitä oli kaikkiaan 9 kpl, joista 6 oli kalkkinäytteitä ja 3 kipsikalkkinäytteitä.

Kuvassa 50 esitetään esimerkit kalkki- ja kipsikalkkipilari-näytteiden puristuskokeen jännitys-muodonmuutoskuvaajista. Useissa näytteissä oli havaittavissa selviä halkeamia jo ennen koestamista, joka oli eräänä syynä koetulosten suureen hajontaan.



Kuva 49. Torpparinmäki. Kokonaisten pilarinäytteiden koes-
taminen, a) tynnyri poistetaan polttoleikkaamalla,
b) puristinkoe käynnissä, c) ensimmäinen halkeama,
d) näyte Geotekninen osasto julkaisu 30



Kuva 50. Torpparinmäki. Esimerkki kokonaisten pilarinäyt-
teiden puristuskokeiden tuloksista.

Kipsikalkkistabiloidut näytteet olivat selvästi kalkkistabiloituja näytteitä lujempia. Näytteiden korkeudet vaihtelivat suuresti, joten tulokset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia. Puristuskokeiden tulokset esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Torpparinmäki. Yhteenvedo "tynnyrinäytteiden" puristuskokeiden tuloksista n. 12 kk ikäisinä.

Näyte n:o	Stabil. aine	Näytesyv. z, m	Halkais. D, mm	Korkeus H, mm	Maksim. kuormitus σ_1 , kN/m ²	Puristuma ϵ , %
1 ¹⁾		1.5 - 2.5	350	480	83	3.3
2 ¹⁾		2.5 - 3.5	480	680	88	2.6
3	Kalkki	1.5 - 2.5	400	600	64	4.6
4	9 %	2.5 - 3.5	480	770	82	1.7
5		2.5 - 3.5	460	390	105	4.2
6 ²⁾		1.5 - 2.5	460	720	40	2.4
7 ¹⁾	Kipsi-	2.0 - 3.0	400	740	159	2.8
8 ¹⁾	kalkki	2.0 - 3.0	450	730	157	2.3
9	1:1, 12 %	2.0 - 3.0	420	660	166	4.5

1) Voima-anturi kalibroitu väärin. Likimääräiset tulokset saatu kalibroimalla anturi jälkikäteen.

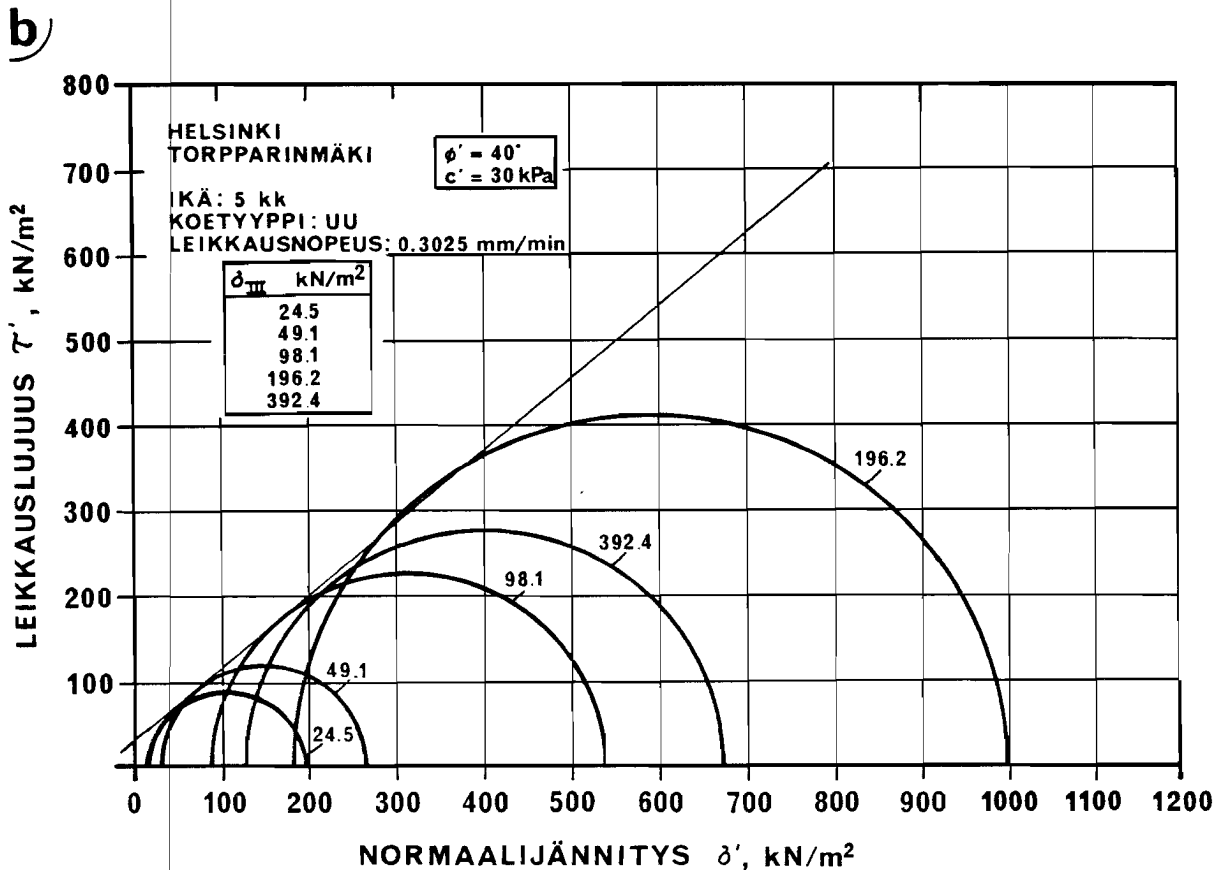
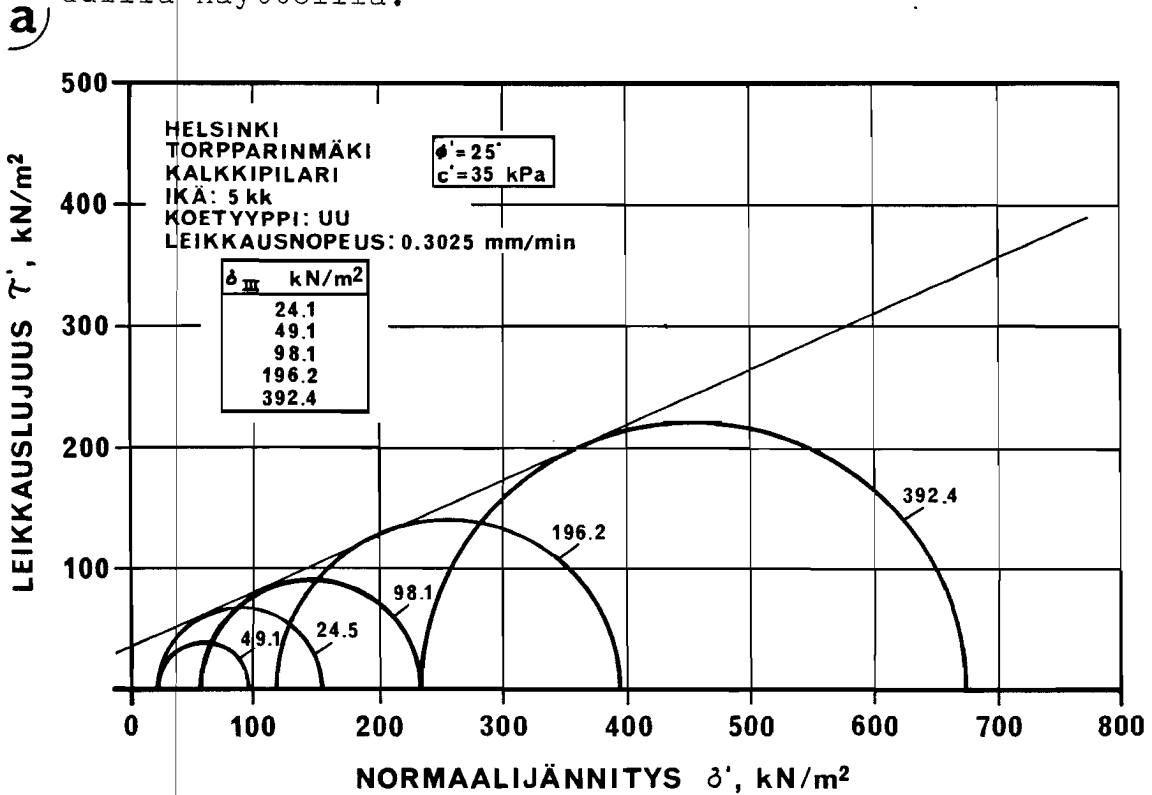
2) Näytteessä halkeamia.

8.4 Kolmiakselikokeet

Torpparinmäen kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduista pilareista otetuilla mäntäkäiranäytteillä tehtiin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa kolmiakselialikoesarjat /13/. Kokeet tehtiin ns. suljettuina kokeina (UU-koe) n. 5 kk ikäisillä näytteillä. Näytteenottosyvyys oli 2 - 3.9 m. Näytteiden halkaisija oli 50 mm ja korkeus 100 mm. Käytetyt sellipaineet olivat 25 - 600 kN/m². Leikausnopeutena käytettiin nopeutta 0.3025 %/min mitattuna näytteen alkuperäisestä korkeudesta.

Kolmiakselialikokeiden tulokset esitetään kuvassa 51 Mohrin jännitysypyröiden avulla. Tuloksista on nähtävissä näytteiden selvä häiriintyneisyys. Kipsikalkkistabiloitujen tehokas

kitkakulma $\phi' \approx 41^\circ$ on selvästi suurempi kuin kalkkistabiloitujen näytteiden tehokas kitkakulma $\phi' \approx 25^\circ$. Sitä vastoin näytteiden tehokkaissa koheesioissa ei ole selvää eroa, $c' \approx 35$ kPa kalkkistabiloiduilla näytteillä ja 40 kPa kipsikalkkistabiloiduilla näytteillä.



Kuva 51. Torpparinmäki. a) kalkkipilarinäytteillä, b) kipsikalkkipilarinäytteillä tehtyjen kolmiaksaalikokeiden tulokset /13/.

8.5 Rasialeikkauskokeet

Myllypuron koealueen stabiloiduista pilareista kohdan 4.1 mukaisesti otetuilla mäntäkairanäytteillä tehtiin rasialeikkauskoesarjat Helsingin Teknillisen korkeakoulun pohja- ja maarakennusmekaniikan laboratoriossa.

Näytteet oli otettu 2 vrk ikäisinä pilareista ja ne olivat koestushetkellä n. 100 vrk ikäisiä. Säilytys oli tapahtunut +4° C kylmähuoneessa veden alla. Kokeissa tehtiin 2, 3 ja 4 metrin syvyydeltä otetuilla kalkki- ja kipsikalkkinäytteillä yksi kutakin syvyyttä edustava leikkauskoesarja. Yksi sarja käsitti kolme rasialeikkauskoetta 25 - 120 kPa pystyjännityksillä.

Leikkauskokeet tehtiin konsolidoituina - nopeina (CU-koe) kokeina. Konsolidoitumisaika oli 18 h, leikkausnopeutena käytettiin 0.022 mm/min.

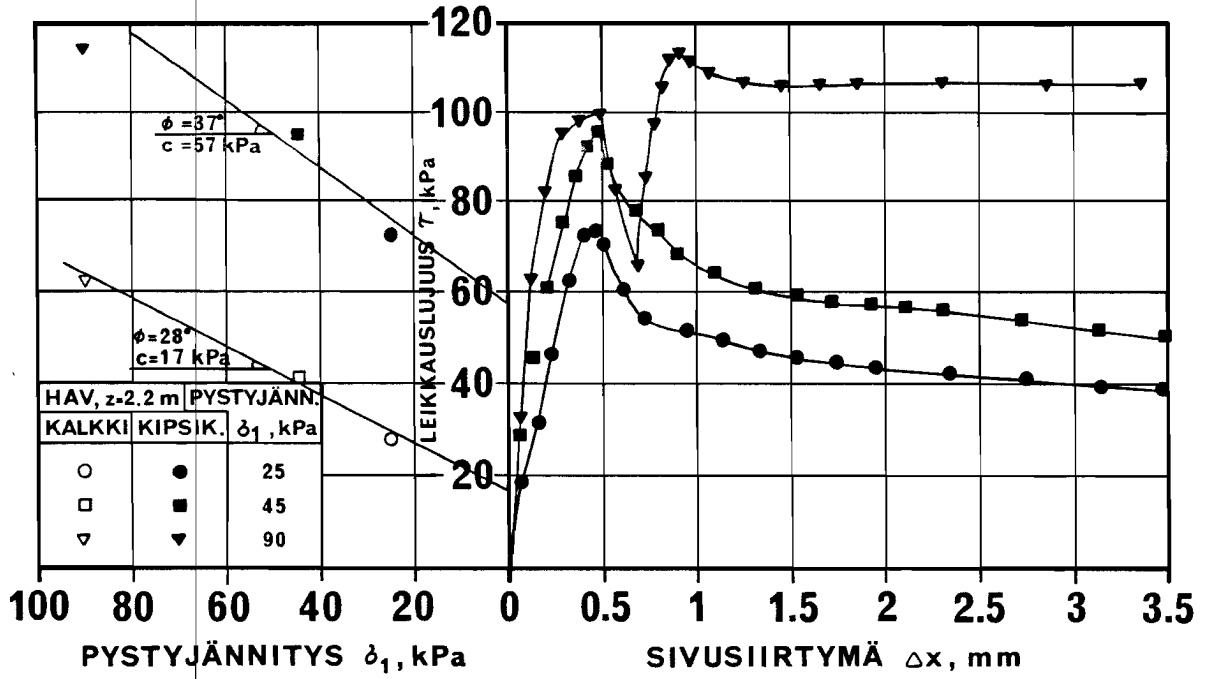
Kokeita varten oli tavalliseen 60 x 60 mm² leikkausrasiaan tehty neljä lisäkappaletta, jolloin leikattava kappale oli pyöreä Ø 50 mm, jotta näytettä (Ø 50 mm) tarvitsi työstää mahdollisimman vähän. Koestettavan näytteen korkeus oli 24 mm.

Rasialeikkauskokeiden siirtymä-pystyjännityskuvaajat esitetään kuvassa 52. Joissakin kuvaajissa esiintyvät kaksi jännityshuippua varsinkin suurilla pystyjännityksillä johtuvat koe-laitteistosta. Tuloksista on nähtävissä kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien ero; kipsikalkkipilarit käyttäytyvät kuten kimmoplastinen materiaali, kun taas kalkkipilarit käyttäytyvät plastisen materiaalin tavoin. Kokeiden tulokset on koottu taulukkoon 6.

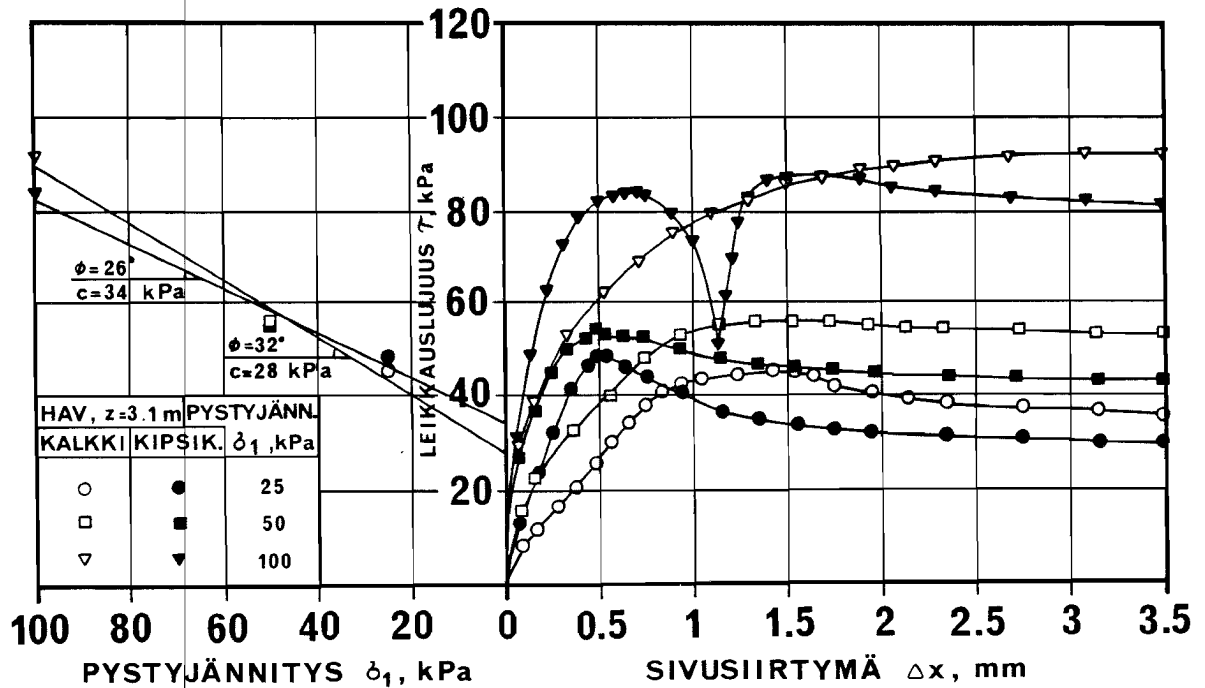
Taulukko 6. Myllypuro. Kalkki- ja kipsikalkkinäytteiden rasialeikkauskokeiden tulokset 3 kk ikäisinä.

Syvyys z, m	Koheesio c, kPa		Kitkakulma ϕ , °	
	Kalkki	Kipsikalkki	Kalkki	Kipsikalkki
2.2	17	57	28	37
3.1	28	34	32	26
3.75	32	40	28	47

a)

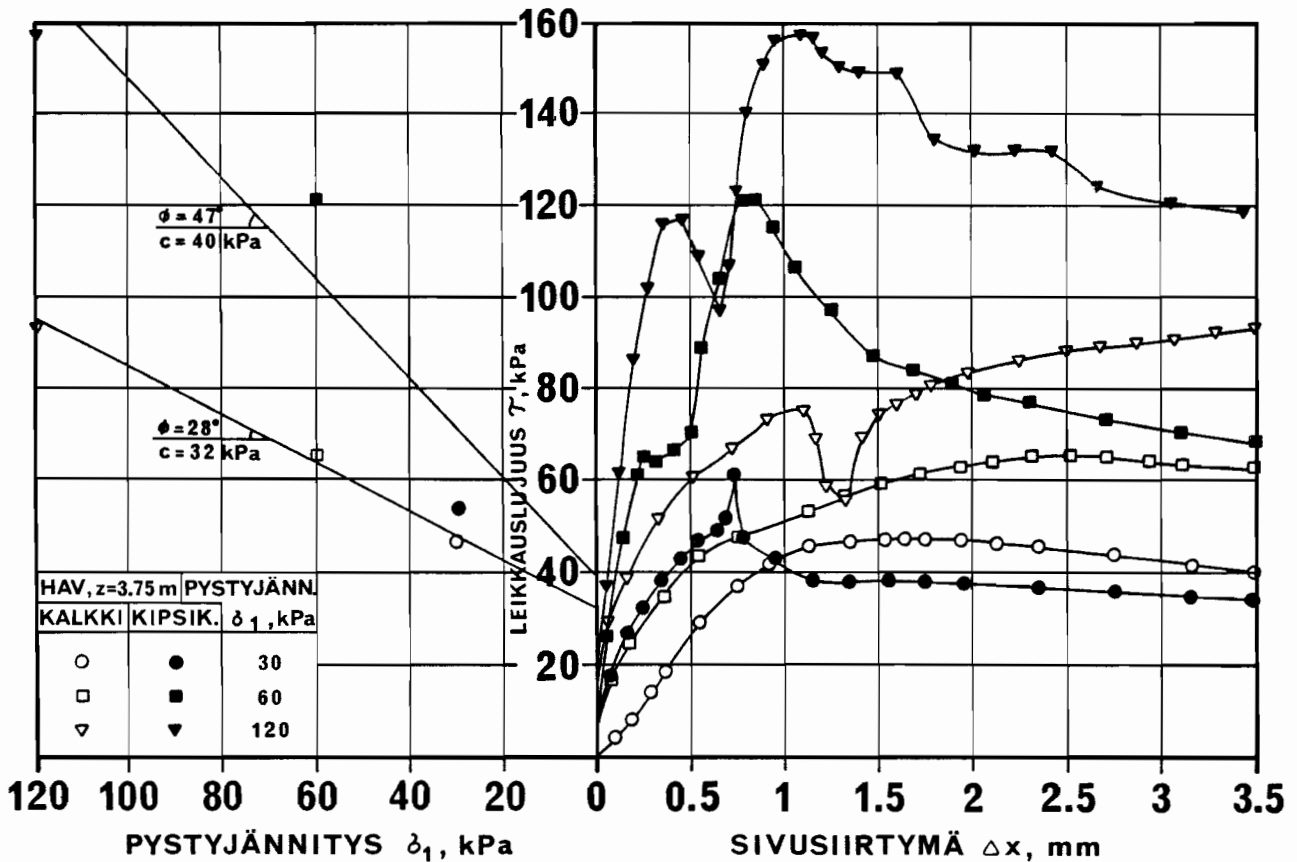


b)



Kuva 52. Ks. seuraava sivu.

c)



Kuva 52. Myllypuro. a) 2.2 m, b) 3.1 m, c) 3.75 m syvyydeltä otettujen kalkki- ja kipsikalkkipilarinäytteiden rasialeikkauskokeiden tulokset.

Kipsikalkkipilarit ovat tulosten mukaan lujittuneet kalkki-stabiloituja pilareita paremmin, paitsi syvyydellä $z = 3.1 \text{ m}$, jossa lujuuksissa ei ole eroja.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava näytteenottomenetelmästä johtuva näytteiden lujuuksien todennäköinen hajonta. Lisäksi näytteiden säilytys erosi luonnonmukaisista olosuhteista. Tuloksia voidaan pitää kuitenkin suuntaa antavina.

8.6 Kartiokokeet

Kartiokoe on kehitetty luonnontilaisia hienorakeisia maala-jeja varten, eikä siten sovellettu stabiloitujen rakenteeltaan epähomogeenisten näytteiden tutkimiseen. Koska kuitenkin mm. Broms ja Boman /4/ ovat käyttäneet kartiokoetta stabiloitujen pilarien tutkimiseen, tehtiin Torpparinmäen ja Myllypuron stabilointikoekappaleille myös kartiokokeet vertailun vuoksi.

Aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa on todettu, että kartioleikkauslujuus on noin 2-kertainen puristuskokeista saata-
vaan leikkauslujuuteen nähden /4/, /8/, /12/.

Taulukossa 7 esitetään Myllypuron ja taulukossa 8 Torpparinmäen kalkki- ja kipsikalkkinäytteiden kartiokokeiden tulokset eri ajankohtina.

Taulukko 7. Myllypuro. Stabilointikoe-kappaleilla tehtyjen kartiokokeiden tulokset.

Näyte- syvyys z, m	Leikkauslujuus τ , kPa			
	Kalkkistab.		Kipsikalkkistab.	
	7 vrk	90 vrk	7 vrk	90 vrk
2	11	21	28	143
3	26	31	79	147
4	77	106	135	303

Taulukko 8. Torpparinmäki. Stabilointikoe-kappaleilla tehtyjen kartiokokeiden tulokset.

Näyte- syvyys z, m	Leikkauslujuus τ , kPa			
	Kalkkistab.		Kipsikalkkistab.	
	7 vrk	105 vrk	7 vrk	105 vrk
1.5 - 3.0	95	150	110	480

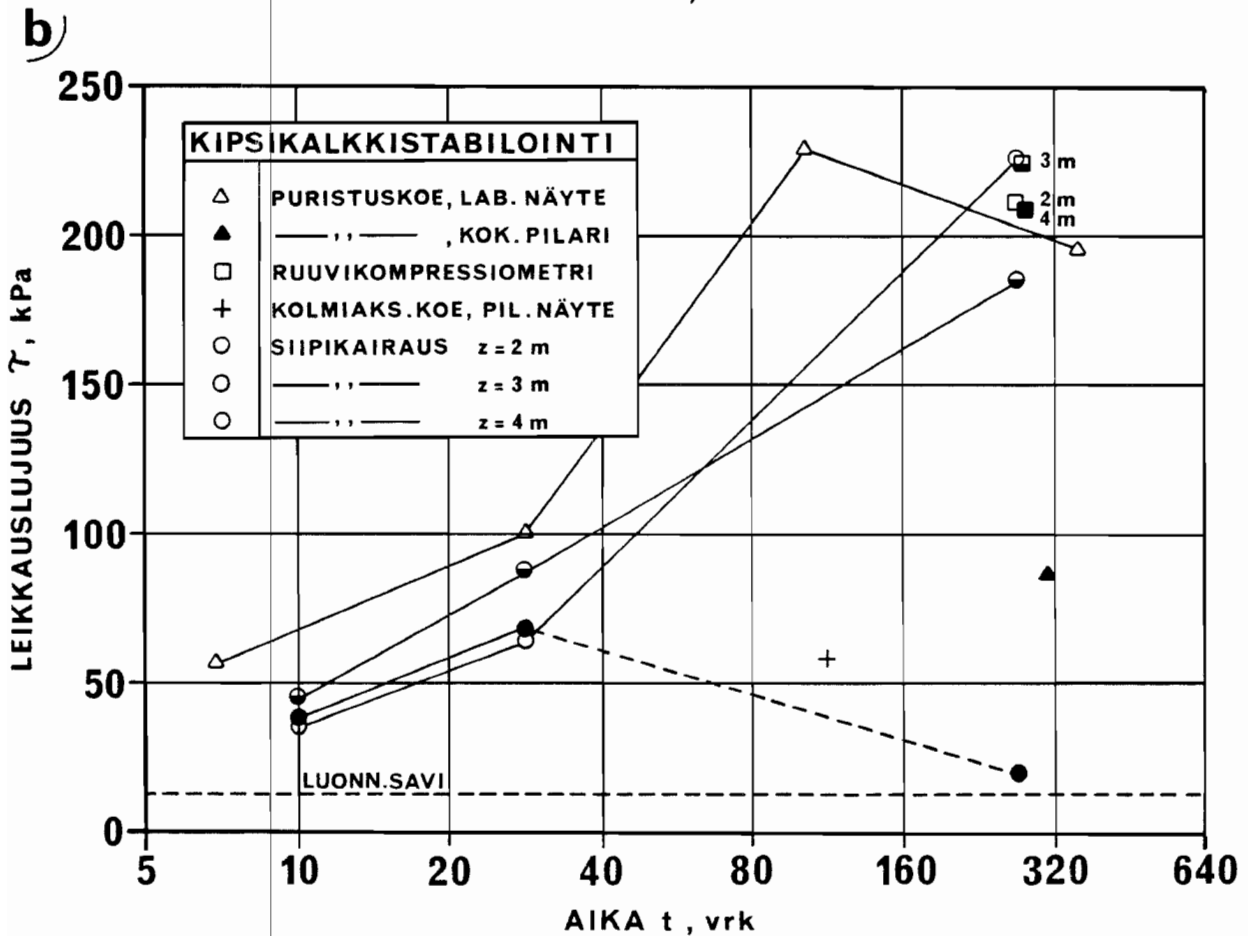
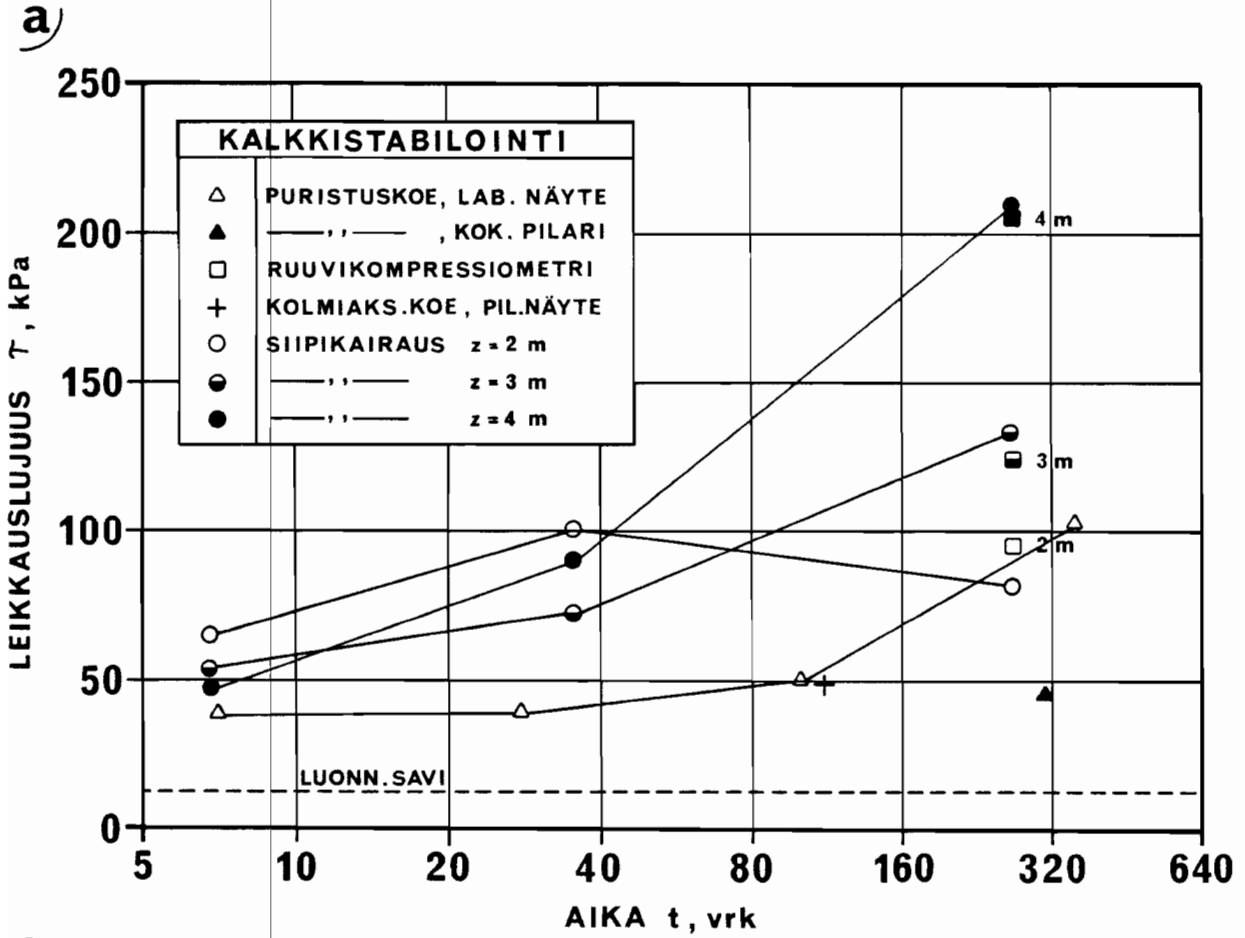
9. IN-SITU- JA LABORATORIOTULOSTEN VERTAILU
9.1 Torpparinmäen koerakentamiskohde

Torpparinmäen koerakentamiskohteen kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuksien kehittyminen in-situ- ja laboratoriotulosten mukaan on esitetty kuvassa 53.

Kipsikalkkistabiloidut pilarit lujittuivat keskimäärin 1.5-kertaisesti kalkkistabiloituja pilareita paremmin sekä kenttäettä laboratoriotulosten perusteella. Kun syvyys on suurempi kuin 4 m, eivät tulokset ole vertailukelpoisia. Laboratoriossa kalkkistabiloitujen koekappaleiden puristuskokeilla määritetty leikkauslujuus on pienempi kuin kalkkistabiloitujen pilarien siipikairaleikkauslujuus. Lisäksi siipikairaukset on tehty pilarin keskiosassa, joka on yleensä lujittunut vähemmän kuin reunaosat varsinkin pienissä syvyyksissä.

Kipsikalkilla stabiloitujen koekappaleiden puristuskokeilla määritetty leikkauslujuus on puolestaan kipsikalkkipilarien siipikairaleikkauslujuutta suurempi. Lujittumisnopeus on stabilointikoekappaleilla samaa suuruusluokkaa siipikairauksien kanssa, tosin leikkauslujuus puristuskokeiden mukaan pienenee 105 vrk jälkeen. Tulos johtunee koekappaleiden laadun hajonnasta. Kujalan mukaan /13/ on myös mahdollista, että kipsikalkkistabiloitujen pilarien lujuuskehitys on pysähtynyt noin vuoden kuluttua stabiloinnista.

Ruuvikompressiometrikokeiden tuloksista kohdan 6.23 mukaan määritetyt leikkauslujuudet ovat sekä kalkki- että kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa yhtä suuret siipikairaleikkauslujuuksiin verrattuna. Ainoastaan 4 m syvyydellä eroavat kipsikalkkipilarien siipikairausleikkauslujuus (20 kPa) ja ruuvikompressiometrileikkauslujuus (209 kPa) merkittävästi. Ero johtuu todennäköisesti häiriöistä dihydraattikipsikalkin syötössä pilarien tekovaiheessa.



Kuva 53. Torpparinmäki. a) kalkkistabiloitujen pilarien, b) kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus eri menetelmillä määritettynä.

Stabiloiduista pilareista otetuilla mäntäkairanäytteillä tehdyt kolmiaksiaalikoheet sekä kokonaisilla pilarinäytteillä tehdyt 1-aksiaaliset puristuskokeet antavat keskenään saman suuruiset leikkauslujuudet. Kalkkistabiloitujen näytteiden leikkauslujuus (n. 50 kPa) on n. 50 % siipikairaleikkauslujuuksista.

Kipsikalkkistabiloitujen näytteiden leikkauslujuus kolmiaksiaalikoheen perusteella (n. 60 kPa) ja kokonaisten pilarien puristuskokeen perusteella (n. 80 kPa) on vain 25 - 30 % siipikairaleikkauslujuudesta.

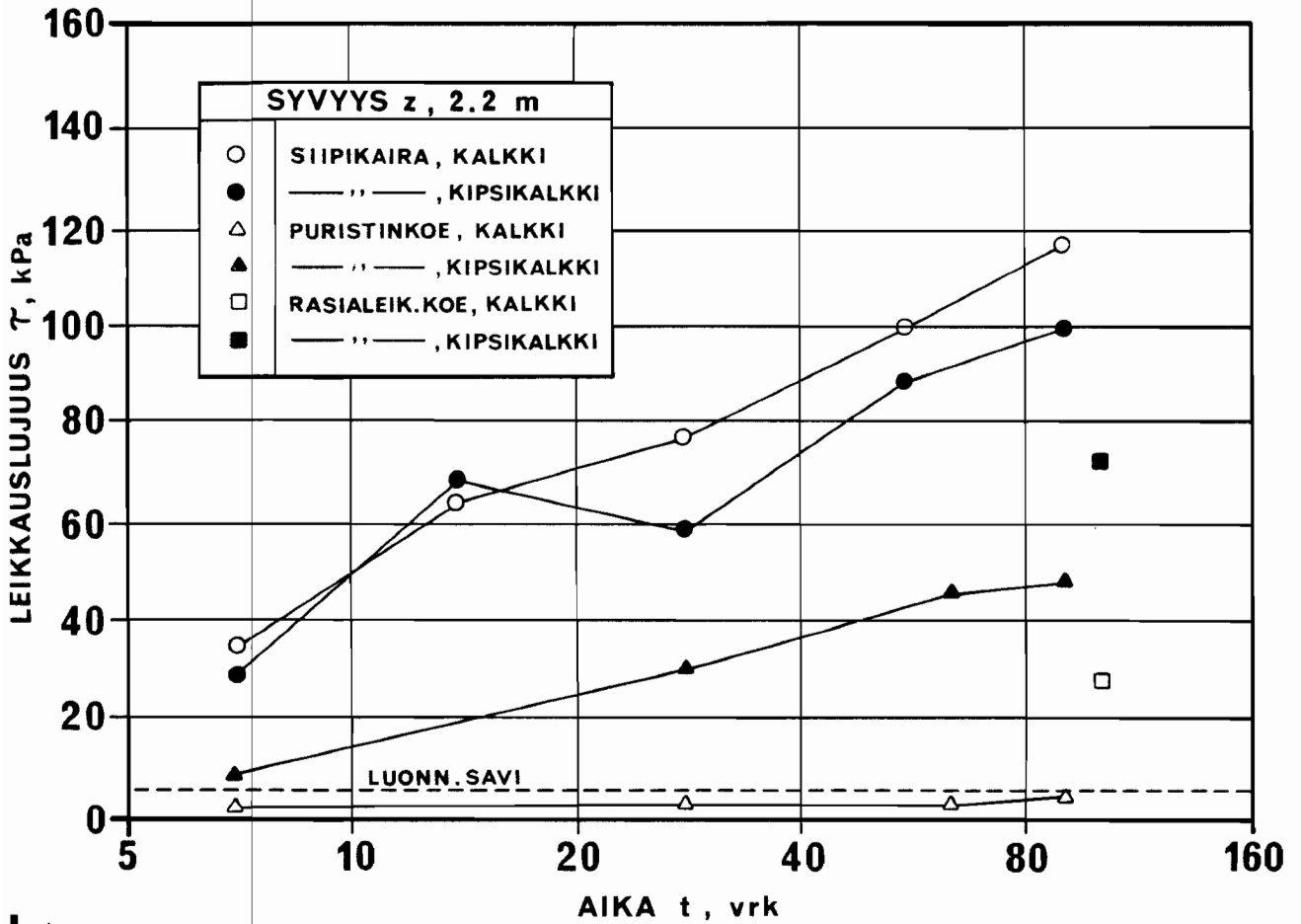
Ainakin osittain mäntäkaira- ja pilarinäytteiden leikkauslujuuksien pienuus johtui näytteiden rikkoutumisesta näytteenoton yhteydessä. Häiriintyminen lisääntyi myös kuljetuksissa ja laboratoriokäsittelyssä.

9.2 Myllypuron koerakentamiskohde

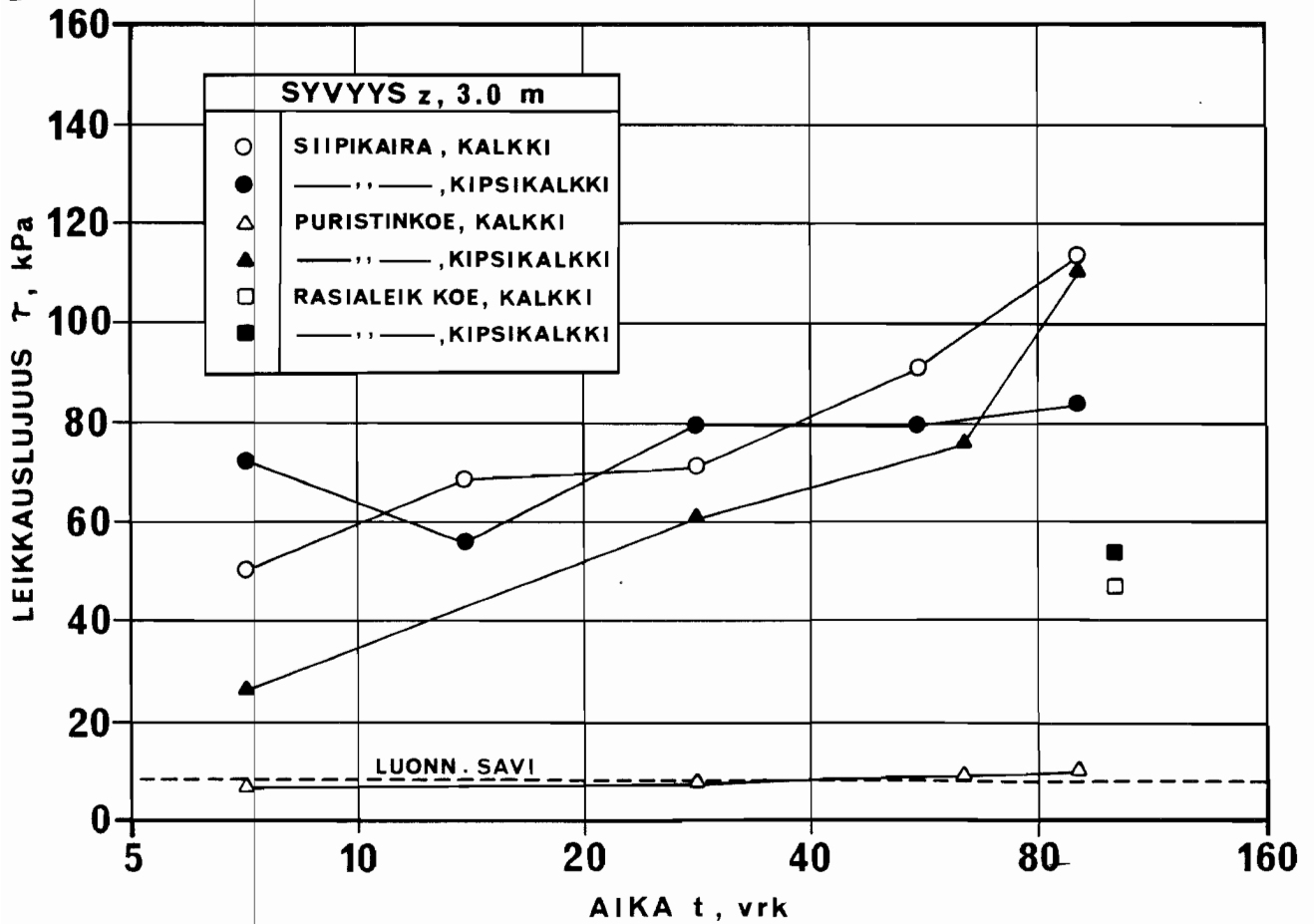
Myllypuron koerakentamiskohteen kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuksien kehittyminen in-situ- ja laboratoriotulosten mukaan esitetään kuvassa 54.

Kenttäkokeiden ja laboratoriossa stabiloitujen koekappaleiden puristuskokeiden tulokset ovat keskenään täysin ristiriitaiset. Stabilointikoekappaleilla tehtyjen puristuskokeiden perusteella on kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus n. 10-kertainen kalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuteen verrattuna kaikissa syvyyksissä. Kentällä tehtyjen siipikairaustulosten perusteella sekä kohdassa 5.33 esitettyjen pilari- kairaustulosten perusteella ei kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuksissa sitä vastoin ole havaittavissa merkittäviä eroja. Pilareista otetuilla mäntäkairanäytteillä tehtyjen rasialeikkauskokeiden perusteella on kipsikalkkipilarien leikkauslujuus 1.1 - 2.5 -kertainen kalkkipilarien leikkauslujuuteen verrattuna. Rasialeikkauskokeita tehtiin kuitenkin niin vähän, että näytteiden epähomogeenisuus vaikutti koetuloksiin.

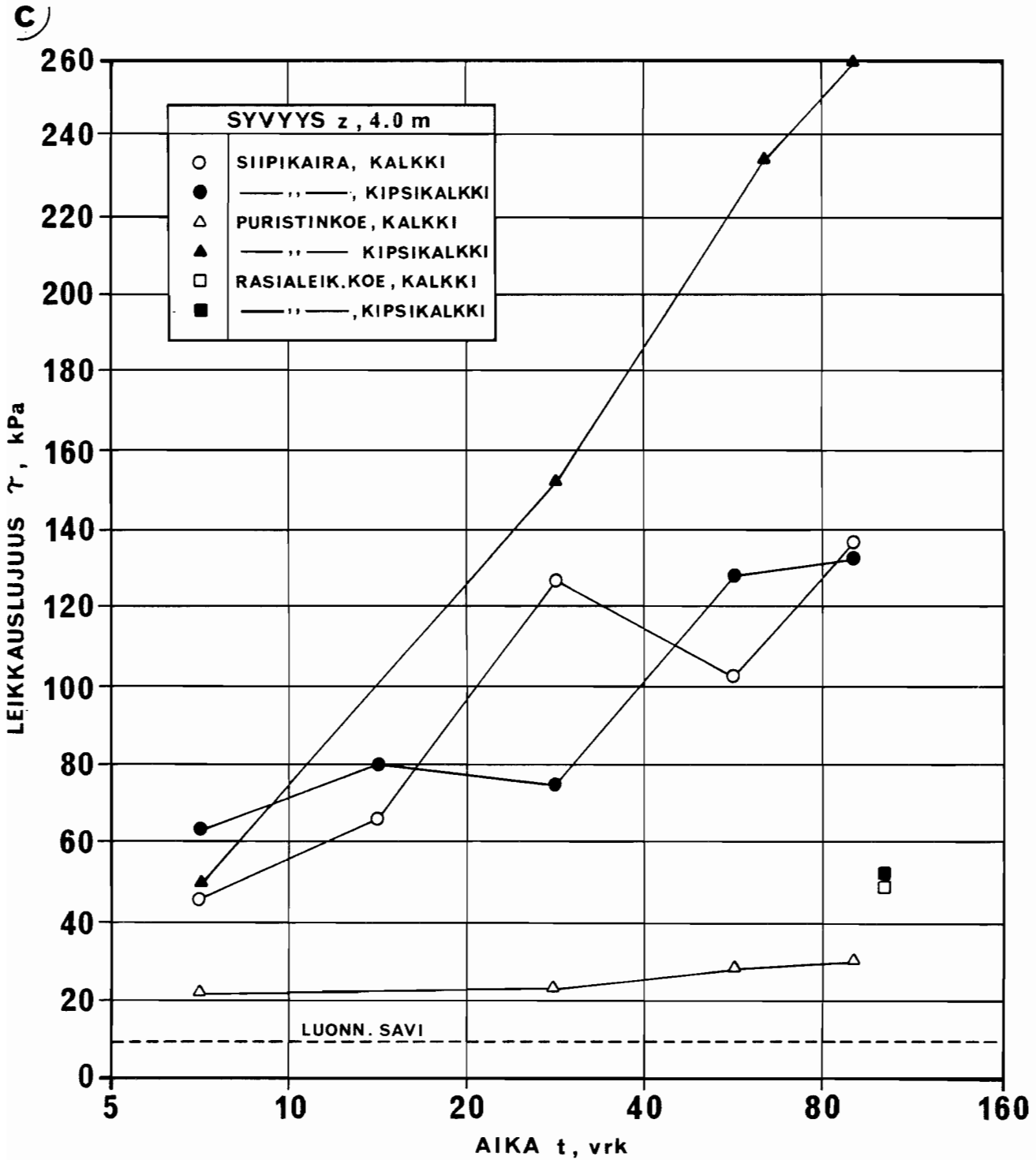
a)



b)



Kuva 54. Ks. seuraava sivu.



Kuva 54. Myllypuron koealue. Kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuus eri menetelmillä määritettynä, a) 2.2 m, b) 3.0 m, c) 4.0 m syvyydessä.

Myös stabiloitujen pilarien leikkauslujuus eri syvyyksissä poikkeaa koekappaleiden puristuskokeiden tuloksien mukaan täysin muiden menetelmien tuloksiin verrattuna. Puristuskokeiden perusteella on vähiten lujittunut 2 m syvyydellä oleva kerros ja parhaiten 4 m syvyydellä oleva kerros. Kalkkistabiloitujen koekappaleiden leikkauslujuus muuttuu 90 vrk ikäisenä 2 - 4 m syvyydessä 5 - 28 kPa. Kipsikalkkistabiloitujen koekappaleiden leikkauslujuus muuttuu 2 - 4 m syvyydessä 50 - 250 kPa.

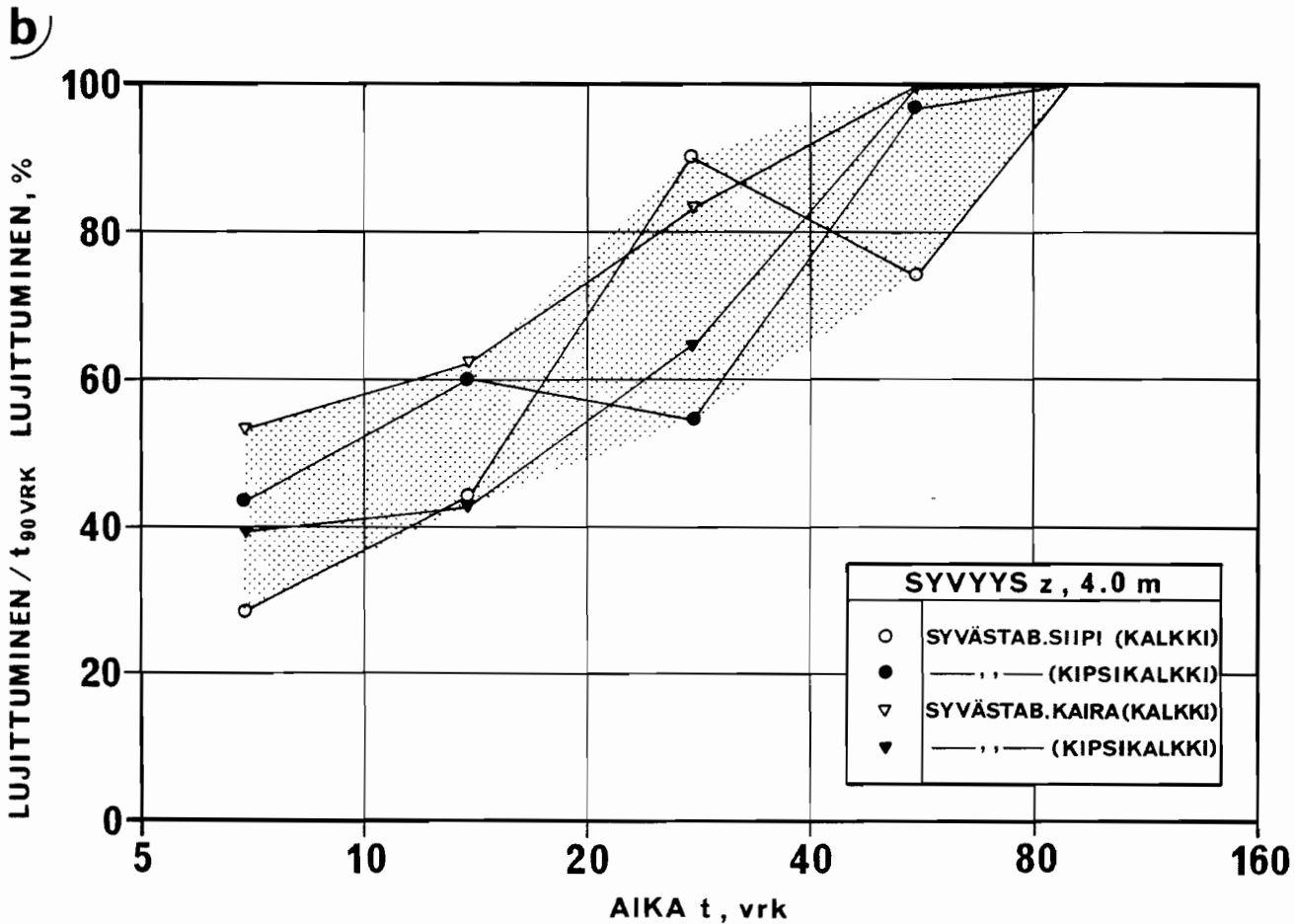
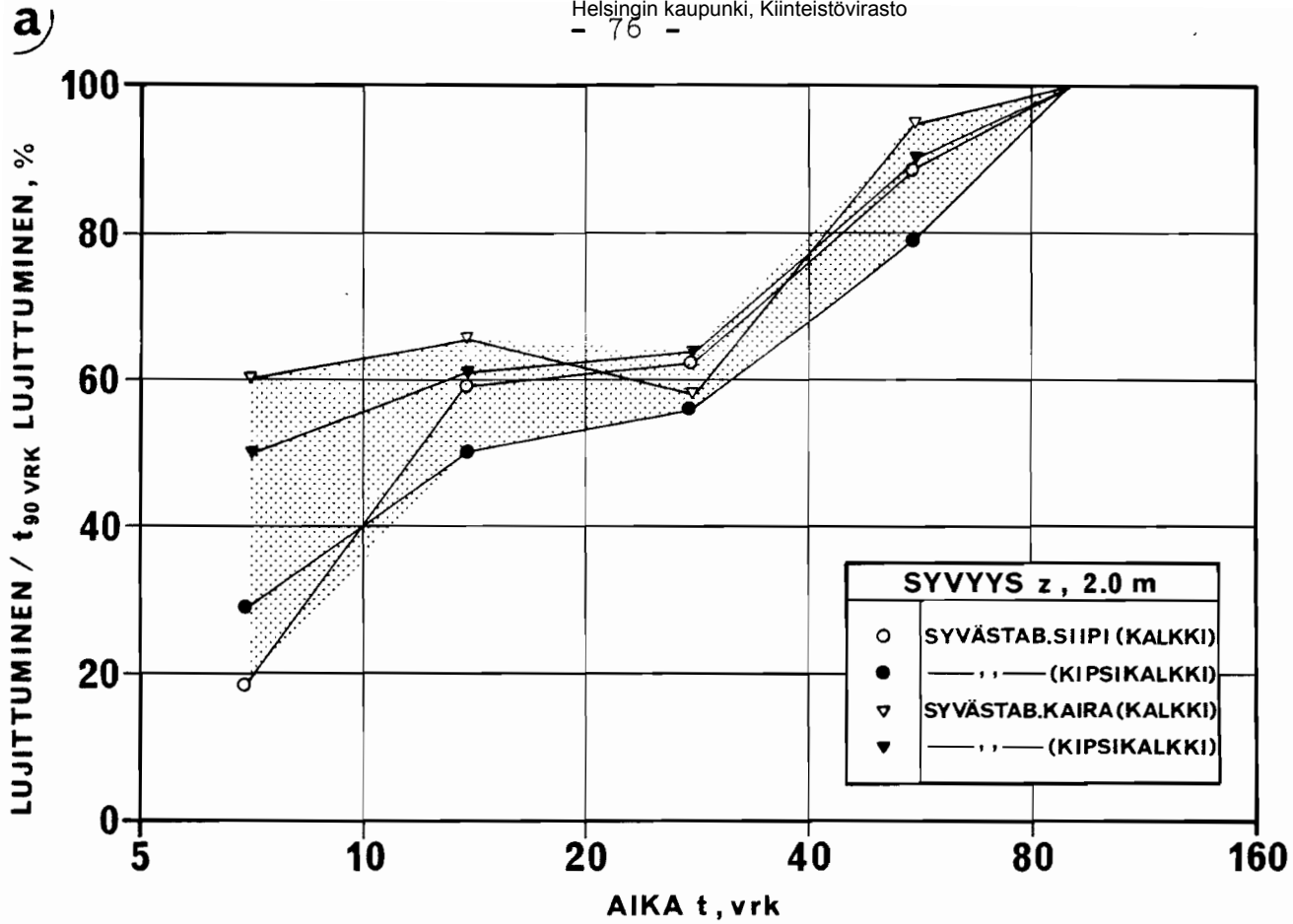
Pilarisiipi- ja puristinkairausten sekä rasialeikkauskokeiden perusteella 2 - 4 m syvyydessä kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien leikkauslujuuksissa ei ole merkittäviä eroja.

Koska leikkauslujuuden määrittäminen on laskennallisesti epätarkkaa pilarikairan tuloksien perusteella, on leikkauslujuus määritetty kokeellisesti siipikairaustuloksiin vertailemalla. Menetelmät eroavat periaatteeltaan toisistaan, eivätkä esim. pilarin suhteelliset lujittumiskertoimet luonnolliseen saveen nähden ole siten keskenään vertailukelpoisia.

Kuvassa 55 on vertailtu pilarisiipikairan ja pilarikairan tuloksia kalkki- ja kipsikalkkistabiloiduissa pilareissa esittämällä tulokset suhteellinen lujuuden muutos - aikakoordinaatistossa. Tällöin hetkellä $t = 0$ vrk on lujuuden muutos kummallakin menetelmällä 0 %, ja hetkellä $t = 90$ vrk 100 %. Kuvaajista on havaittavissa menetelmistä ja stabilointiaineista aiheutuvat erot lujittumiskehityksessä.

Pilarikairaustulosten perusteella lujittui kalkkistabilointi Myllypurossa suhteellisesti nopeammin kuin kipsikalkkistabilointi. Siipikairaustulosten perusteella ei eri stabilointiaineiden lujittumiskehityksessä ole havaittavissa selvää eroa.

Varsinkin 2 m syvyydessä ovat pilarit lujittuneet pilarikairaustulosten perusteella aluksi nopeammin kuin siipikairaustulosten perusteella. Ero johtuu siitä, että siipikairan siipi on pilarin heikossa keskustassa, joka lujittuu aluksi muita osia hitaammin. Pilarikaira ottaa huomioon myös pilarin reunaosien lujuuden ja antaa sen vuoksi luotettavamman kuvan syvästabiloitujen pilarien laadusta ja lujuudenkehityksestä siipikairaun verrattuna.



Kuva 55. Myllypuron koealue: Kalkki- ja kipsikalkkistabiloitujen pilarien lujuudenlisäys suhteessa 90 vrk ikäisten pilarien saavutettuun lujuuden lisäykseen pilari-siipikairalla ja pilarikairalla määritettynä a) 2 m, b) 4 m syvyydessä.

Ruotsissa suoritettujen tutkimusten mukaan on stabiloitujen pilarien leikkauslujuus 9 - 10 % pilarikairan kokonaiskairausvastuksesta kairan kärkipinta-alaa kohden (kPa). Tulos on saatu vertaamalla kairautuloksia pressiometri- ja ruuvi-kompressiometrituloksiin /10/. Myllypuron koealueen tulosten perusteella on stabiloitujen pilarien siipikairaleikkauslujuus 6 - 8 % pilarikairan kokonaiskairausvastuksesta kairan kärkipinta-alaa kohden.

9.3 Yhteenveto tuloksista

Myllypuron ja Torpparinmäen koerakentamiskohteissa poikkeavat savikerroksen indeksiominaisuudet selvästi toisistaan. Aikaisempien selvitysten pohjalta /4/, /14/ kalkkia stabilointiaineena käytettäessä olisi Myllypuron savi selvästi heikommin stabiloituvaa suuren vesipitoisuuden vuoksi (> 100 %) verrattuna Torpparinmäen saveen, jonka vesipitoisuus on < 80 %. Kuitenkin vain stabilointikoekappaleilla tehdyt puristinkokeet antavat selvästi tämän suuntaisen tuloksen. Kipsikalkkistabiloidut koekappaleet lujittuivat huomattavasti paremmin laboratoriossa kuin kipsikalkkipilarit maastossa. Kalkkistabiloidut koekappaleet lujittuivat puolestaan heikommin laboratoriossa kuin kalkkistabiloidut pilarit maastossa. Yhteenveto Torpparinmäen ja Myllypuron tuloksista esitetään taulukoissa 9 ja 10.

Taulukko 9. Torpparinmäki. 270 vrk ikäisten kalkki- ja kipsikalkkipilarien leikkauslujuus kenttä- ja laboratoriotutkimusten perusteella.

Sy- vyys z, m	Leikkauslujuus τ , kPa								
	Luonn. savi	Siipikaira		Ruuvikomp.		Kolmiaks.koe		Stab.koe	
		Kalkki	Kipsik.	Kalkki	Kipsik.	Kalkki	Kipsik.	Kalkki	Kipsik.
2	12	82	230	96	212				
3	10	135	168	125	228	50	60	90	205
4	12	212	20	208	210				

Taulukko 10. Myllypuro. 90 vrk ikäisten kalkki- ja kipsi-kalkkipilarien leikkauslujuus kenttä- ja laboratoriotutkimusten perusteella.

Sy- vyys z, m	Leikkauslujuus τ , kPa						
	Luonn. savi	Syvästab. siipik.		Rasialeikk.koe		Stab.koe	
		Kalkki	Kipsik.	Kalkki	Kipsik.	Kalkki	Kipsik.
2	6	118	110	30	74	5	49
3	8	133	92	45	47	9	112
4	9	138	133	47	60	28	160

Torpparinmäen ja Myllypuron tulosten perusteella on laboratoriossa tehtyjen stabilointikokeiden luotettavuus asetettava kyseenalaiseksi. Ruotsissa ovat Holm, Bredenberg ja Boman /10/ myös havainneet laboratoriossa tehtyjen stabilointikokeiden antavan pienempiä leikkauslujuuksia verrattuna pressiometrituloksiin in-situ. Kalkkistabiloitujen pilarien in-situ leikkauslujuus oli Ruotsin koekentillä 0.8 - 2.9 -kertainen stabilointikoekappaleiden leikkauslujuuteen verrattuna, keskimääräinen arvo kaikilla koekentillä oli 1.6. Myllypuron koekentällä kalkkistabiloitujen pilarien siipikairaleikkauslujuus oli keskimäärin 12.5-kertainen stabilointikokeiden tuloksiin verrattuna, Torpparinmäessä vastaava luku oli 2.4. Ilmeisesti laboratorio-olosuhteissa, joissa stabilointikoekappaleet lujittuivat, etenkin sivupaineen puuttuminen vaikuttaa lujutta heikentävästi kalkkistabiloiduilla koekappaleilla.

Kipsikalkilla aikaisemmin tehdyissä stabilointikokeissa /8/, /13/ on ollut havaittavissa kipsikalkkikoekappaleiden selvä turpoaminen ettringiitin muodostumisen yhteydessä. Koska koekappaleet ovat jäykissä purkeissa, eivätkä pääse laajenemaan, muodostuu näytteeseen sisäinen jännitys, joka vaikuttaa lujutta lisäävästi. Täten olisi selitettävissä kipsikalkkistabilointikoekappaleilla saavutetut selvästi muita menetelmiä suuremmat lujuudet.

Myllypuron syvyysuuntaisten lujittumiserojen syitä laboratoriossa tehtyjen stabilointikokeiden tulosten pohjalta ei onnistuttu selvittämään tämän työn yhteydessä. Tuntuu kuitenkin epätodennäköiseltä, että Myllypuron koekentän 2 ja 4 m syvyudessa olevien kerrosten stabiloituvuusero olisi 5-kertainen luonnollisen saven vesipitoisuuserosta huolimatta. In-situ tulosten mukaan kyseinen stabiloituvuusero on 1 - 1.2 -kertainen.

Myllypuron sekä Torpparinmäen koerakentamiskohteiden stabiloitujen pilarien leikkauslujuus kehittyi nopeammin kuin aikaisemmissa laboratoriotutkimuksissa on havaittu. Bomanin mukaan /12/ saavuttaa kalkkistabilointi stabilointikokeiden mukaan kuukaudessa 45 % $t = 90$ vrk lujuudesta, Myllypurossa ja Torpparinmäessä saavutti kalkkistabilointi kenttätutkimusten mukaan kuukaudessa 65 % $t = 90$ vrk lujuudesta.

Siipikairauksissa ja rasialeikkauksikokeissa tapahtuu murtuminen ns. pakkoleikkauksena tiettyä murtopintaa pitkin, kun kolmiaksiaali- ja puristuskokeilla saadut leikkauslujuudet vastaavat pilarin sisäisten heikkousvyöhykkeiden leikkauslujuutta. Pilarin sisäisillä heikkousvyöhykkeillä tarkoitetaan stabiloitaessa muodostuvien maa-aggregaattien välisiä vyöhykkeitä sekä stabilointitekniikasta johtuvia kerroksellisia heikkouspintoja (ks. kuva 6). Siten kolmiaksiaali- ja puristuskokeet vastaavat paremmin tilannetta maastossa. Siipikairalla saadaan mahdollisesti todellista suurempi leikkauslujuus, johon vaikuttaa lisäksi siiven kiertämisnopeus. Siipikairaukset tehdään kuitenkin pilarin vähemmän lujittuneessa keskiosassa, joka toisaalta vaikuttaa tuloksiin kompensoivasti.

Myllypuron koalueella käytetty pilarikaira osoittautui soveliaaksi stabiloitujen pilarien laadun ja lujuuden seurantaan. Lisäksi menetelmä on nopea ja siten edullinen käyttää.

Kipsikalkkipilareita kuormitettaessa saavutetaan murtokuorma selvästi pienemmillä muodonmuutoksilla verrattuna kalkkistabiloituihin pilareihin. Siten on kipsikalkkistabiloinnilla

mahdollista pienentää stabilointikentän painumia enemmän kuin kalkkistabiloinnilla. Kuitenkin kipsikalkin käyttö stabilointiaineena on vasta kehittelyasteella, mm. pitkäaikaislujuuksista ei vielä ole riittävästi tietoa.

Koetulosten perusteella on ilmeistä, että jatkotutkimuksia on tehtävä sekä kentällä että laboratoriossa. Käytännön kannalta tärkeintä olisi kehittää laboratorioon luotettava stabilointikoemenetelmä saven stabiloituvuuden selvittämiseksi ennen rakennushanketta.

Kenttäkokeita olisi tehtävä erilaisissa pohjaolosuhteissa eri stabilointiaineilla. Esimerkiksi savessa, jossa on suuri vesi- ja humuspitoisuus, ei vielä ole luotettavaa tietoa kalkin ja kipsikalkin soveltuvuudesta stabilointiin.

10. SUOSITUS SYVÄSTABILOINNIN TUTKIMUSMENETELMISTÄ

10.1 Stabilointikokeet

10.11 Koekappaleiden valmistus ja säilytys

Stabilointiaine sekoitetaan savinäytteeseen erikoissekoittimella, jolloin vältetään ilmakuplat, joita helposti syntyy, jos koekappaleet tehdään kerroksittain.

Koekappaleet on säilytettävä mahdollisimman luonnonmukaisissa olosuhteissa veden alla $+4^{\circ}$ C lämpötilassa siten, että ne saavat riittävästi vettä stabiloitumisreaktioihin. Kipsikalkkikoekappaleiden laajenemista ei saa estää, jotta sisäisiä jännityksiä ei muodostuisi. Tämä on mahdollista esim. tekemällä koekappale purkkiin, joka koostuu kahdesta liikkuvasta puoliskosta.

Mahdollisuuksien mukaan pitää koekappaleiden lujittua luonnonolosuhteita vastaavassa paineessa, joka saadaan aikaan vedenpaineen avulla tai kuormittamalla jokainen koekappale erikseen.

10.12 Koestus

Stabilointikoekappaleiden koestukseen soveltuu parhaiten kolmiaksiaalikoelaitteet. Koekappaleet koestetaan häiriintymisen välttämiseksi siinä muodossa, jossa ne ovat säilytyspurkissa, vain päät tasataan.

Kokeet on tehtävä mahdollisimman luonnonolosuhteita vastaavasti riittävän pienellä leikkausnopeudella. Näytteiden kuivuminen kokeiden aikana on estettävä.

10.2 Laadunvalvonta

10.21 Kairaukset pilarikairalla

Stabiloitujen pilarien laadunvalvontaan käytetään piirturilla varustettua pilarikairauslaitteistoa tai tehdään kairaukset

kohdassa 5.3 esitetyllä tavalla. Tarvittava maksimipuristusvoima on n. 100 kN, ja puristusnopeuden tulisi olla vakio, n. 20 mm/s.

Kairaustyössä usein eniten aikaa vievä tutkittavien pilarien etsiminen vältetään merkitsemällä tutkittavat pilarit hyvin heti stabilointityön jälkeen. Talvella voidaan pilarit suojata routaeristeillä routaantumisen estämiseksi.

Jos tutkittavan pilarin päällä on esikuormituspenker, on tämä huomioitava jo penkereen tekovaiheessa siten, että penkereeseen jätetään pystyyn \varnothing 500 mm muovi- tai betoni-putki tutkittavan pilarin kohdalle, jolloin kairaukset voidaan tehdä myöhemmin penkereen päältä käsin. Kairaustankojen taipuman vuoksi on suurin pengerkorkeus 1.5 - 2 m tarvittavasta puristusvoimasta riippuen.

Kussakin kohteessa riippuu tarvittavien kairausten määrä kohteen suuruudesta sekä mahdollisista vaurioista, mikäli stabilointi jostain syystä epäonnistuu. Kairauksia tulee tehdä vähintään 1 - 3 pilarissa 1000 tehtyä pilaria kohden kohteesta riippuen 1 - 3 kk ikäisinä, kuitenkin pienissä kohteissa tulisi tutkia vähintään 3 pilaria.

10.22 Näytteiden otto ja koestus

Stabiloiduista pilareista otettujen näytteiden rikkoontuminen voidaan välttää ottamalla näytteet 1 - 2 vrk stabilointityön jälkeen ja antamalla niiden lujittua näytepurkeissa kohdan 10.11 mukaisesti. Eräs mahdollisuus on työntää näytesylinteri tutkittavaan pilariin heti stabilointityön jälkeen ja jättää näytepurkit pilariin, josta ne sopivan ajan kuluttua nostetaan koestettaviksi.

Jos pilarien laadussa on kairauksissa todettu olevan epätavallisen suuri hajonta, otetaan tärkeissä kohteissa kokonaisia pilarinäytteitä hajonnan syyn selvittämiseksi. Näytteet otetaan ruotsalaisella, kohdassa 4.2 esitetyllä laitteistolla, jota ei kuitenkaan toistaiseksi ole käytettävissä Suomessa, tai kohdassa 4.3 esitetyllä tavalla.

Pilarinäytteiden koestamiseen soveltuu parhaiten kolmiaksiaalilaitteisto. Koska stabiloidut pilarit ovat epähomogeenisia, on tutkittavien sarjojen oltava riittävän suuria luotettavien tulosten saamiseksi.

Kokonaisten pilarien laatu selvitetään halkaisemalla näyte silmämääräistä tarkastelua varten. Lujuuden arvioimiseen käytetään esim. laboratoriosiipikairaa.

10.3 Suunnitteluparametrien määrittäminen

10.31 Myötökuorma

Myötökuorma määritetään luotettavimmin ruuvikompressiometrikokeiden tai levykuormituskokeiden avulla luvussa 6 esitetyillä tavoilla. Mikäli mainittuja menetelmiä ei ole käytettävissä, voidaan pilarin myötökuorma arvioida karkeasti yhtälön (6) mukaan.

$$q_r = 2 \times s_v \quad (6)$$

q_r = pilarin myötökuorma

s_v = siipikairaleikkauslujuus

10.32 Leikkauslujuus

Pilarien leikkauslujuuden arvioimiseen käytetään kohdassa 7.3 esitettyä pilarisiipikairaa. Pilarien tekotavasta johtuvan epähomogeenisuuden vuoksi on siipikairaleikkauslujuus todennäköisesti jonkin verran stabiloitujen pilarien leikkauslujuutta suurempi. Ennen tärkeimpiä selvityksiä on suunnittelussa tämän vuoksi suositeltavaa käyttää leikkauslujuutena korkeintaan puolta siipikairaleikkauslujuudesta.

Stabiloitujen pilarien leikkauslujuus voidaan määrittää karkeasti myös pilarikairan avulla, tällöin on tulokset kuitenkin kalibroitava esim. siipikairaustulosten kanssa.

Stabiloitujen pilarien tehokas koheesio ja kitkakulma määritetään pilarinäytteistä kolmiaksiaalikoelaitteistolla. Näytteiden epähomogeenisuudesta johtuen on kokeita tehtävä riittävästi.

10.33 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuusparametrit määritetään pilarinäytteillä tehdyillä ödömetrikokeilla, jolloin painumat määritetään Janbun /11/ mukaan yhtälöstä (7).

$$\epsilon_1 = \frac{1}{m \cdot a} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_v} \right)^a + C_1 \quad (7)$$

ϵ_1 = suhteellinen kokoonpuristuma

σ_1 = pystysuora kuormitus

m = moduliluku

σ_v = vertailujännitys (100 kPa)

a = jännityseksponentti

C_1 = integroimisvakio

Kokoonpuristuvuusparametrit voidaan määrittää myös ruuvi-kompressiometrillä yhtälöiden (8), (9), (10) avulla /11/.

$$s = \frac{S}{m} \cdot \frac{\sigma'_n}{\sigma_v} \cdot B \quad (8)$$

$$\sigma'_n = \sigma' - \sigma'_0 \quad (9)$$

$$S = \frac{\sigma_v}{a \cdot \sigma_n} \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^a - \left(\frac{\sigma'_i}{\sigma_v} \right)^a \right] d \left(\frac{z}{B} \right) \quad (10)$$

σ'_n = tehokas nettojännitys

σ' = ruuvin aiheuttama jännitys maapohjaan

σ'_0 = tehokas esijännitys maassa

S = ruuvin painuma

z = kuormitussyvyys

B = ruuvin halkaisija

m = moduliluku

a = jännityseksponentti

σ_v = vertailujännitys

Kalkkistabiloiduille pilareille käytetään jännityseksponentille arvoa $a = 0.5$ ja kipsikalkkistabiloiduille pilareille arvoa $a = 1.0$.

Ruuvikompressiometrillä painumia määritettäessä on jokaisen kuormitusportaan kesto oltava niin pitkä, että kuormitusruuvin painuminen pysähtyy.

Konsolidaatiokertoimet määritetään Janbun ja Sennesetin /11/ mukaan ödömetrikokeella tai ruuvikompressiometrillä, jolla saadaan ns. radiaalinen konsolidaatiokerroin.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Assarsson, Broms, Granholm, Paus, Deep Stabilization of soft cohesive soils, Skellefteå 1974.
2. Bengtsson, Lundberg, Kalkpelarmetoden, MPA byggteknisk information, meddelande No 2, 1978.
3. Boman, Broms, Paus, Söderling, Kalkpelarmetoden, uppföljning i kv Myren, Huddinge, Byggforskningen rapport R 138, 1979.
4. Broms, Boman, Stabilization of soil with lime columns, design handbook, second edition, Royal Institute of technology, Stockholm 1978.
5. Broms, Boman, Ingelsson, Investigation of lime columns at Smistavägen, Huddinge, Sweden, Royal Institute of technology, Stockholm 1978.
6. Broms, Bredenberg, Paus, Wikström, Grundläggning av småhus på kalkpelare, KTH, delrapport 1, 1978.
7. Cadling, Odenstad, The Vane borer, Royal Swedish geotechnical institute, proceeding No 2, Stockholm 1950.
8. Hautala, Kalkkipilarimenetelmän käyttö ratapenkereen vahvistamisessa humuspitoisessa maassa. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto, diplomityö 1981.
9. Helenelund, In situ measurements of the compressibility and the shearing resistance of soils.
10. Holm, Bredenberg, Broms, Lime Columns as foundation for light structures, proceeding 10th int.conf. SMFE, Stockholm 1981.
11. Janbu, Senneset, Field compressiometer - principles and application, Proc. 8th Int. conf. on SMFE, Moscow 1973.

12. Kalkpelarmetoden i praktisk tillämpning, endag seminarium 27 november 1979, KTH institution för jord- och bergmekanik, Stockholm 1979.
13. Kujala, lisensiaattityö (julkaisematon), Oulun yliopisto.
14. Leminen, Rathmayer, Heikosti kantavan maapohjan syvästabilointi kalkkipilareilla, Rakennustaito 20, 1978.
15. Leminen, Rathmayer, Heikosti kantavan hienorakeisen maapohjan perustaminen pystyojituksen ja syvästabiloinnin avulla. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 39, Espoo 1979.
16. Nieminen, Lentotuhkan ja kipsin käyttömahdollisuudesta ja vaikutuksesta maalajien lujuusominaisuuksiin. Filosofian lisensiaattitutkielma. Turun yliopisto 1977.
17. Terashi, Tanaka, Ground improved by deep mixing method. Proc. 10th Int. Conf. on SMFE, Stockholm 1981.
18. Torstensson, The "BAT lime column probe" for in-situ testing of quality of lime columns. Linden-Almak AB, Skellefteå 1980.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvin ruhjeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselvitys. 1982. 30,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-