

Tielaitos

980278

Tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma (TPPT)

Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT- kairauksen välinen riippuvuus



Tielaitoksen
selvityksiä

94/1995

Helsinki 1996

Geokeskus

08 TIEL

Tielaitoksen selvityksiä
94/95

Tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma

**Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden
ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus**

Tielaitos
Geokeskus

Helsinki 1996

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-175-6
TIEL 3200369
OY Edita Ab
Helsinki 1997

● Julkaisua myy:
Tielaitos, painotuotteiden myynti
Telefax 0204 44 2202

Joutsenmerkin arvoinen paperi

●
Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 44 150

Asiasanat syvästabilointi, laadunvalvonta, CPT, puristinkairaus, N_c -kerroin

TIIVISTELMÄ

Stabiloidun maan laatu todetaan yleensä puristus- tai leikkauslujuuden perusteella. CPT- eli puristinkairaus soveltuu hyvin puolilujien ja lujien syvästabiloitujen pilarien sekä massastabiloinnin laadunvalvontaan, mutta CPT-kairauksen kärkivastuksen tulkinta leikkauslujuudeksi on perustunut melko epävarmalla pohjalla olevaan kantavuuskertoimeen N_c . Tämän tutkimuksen tavoitteena oli parantaa N_c -kertoimen luotettavuutta.

Tähän saakka N_c -kerroin on määritetty vertaamalla samasta pilarointikohteesta tehtyjä CPT- ja pilarisiipikairauksia keskenään. Pilarisiipikairaus ei kuitenkaan ole luotettava leikkauslujuuden määrittäminen puolilujissa tai lujissa pilareissa, koska murtotapahtuma kovassa stabiloidussa pilarissa on aivan erilainen kuin siipikairan tulkinnan perustana oleva pehmeän saven murtumismekanismi siiven ympärillä. Tässä työssä stabiloidun massan leikkauslujuus on määritetty puristuskokeilla laboratoriossa.

Tutkimuksessa selvitettiin aluksi kirjallisuudesta CPT-kairauksen ja leikkauslujuuden välisen riippuvuuden teoreettinen perusta. Työn kokeellisessa osassa tehtiin laboratorio-olosuhteissa seitsemän lujuudeltaan erilaista (100 ... 700 kPa) homogeenista koepilaria. 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen koepilarit puristinkairattiin ja pilareista otettiin näytteitä laboratoriokokeita varten.

CPT-kairausten keskimääräisten kärkivastusten ja puristuskokeiden antamien leikkauslujuuksien perusteella määritettiin N_c -kertoimet eri massoille. Tulosten perusteella leikkauslujuusvälillä 100 ... 500 kPa N_c -kertoimena voidaan käyttää vakioarvoa 10.

N_c -kertoimen teoreettisista malleista parhaiten tämän työn tuloksiin sopi Vesicin 1975 esittämä malli. Vesicin mallilla lasketut teoreettiset N_c -arvot ovat lähellä tämän tutkimuksen tuloksista laskettuja N_c -kertoimia.

Otoskoko – seitsemän koepilaria – oli pieni, mutta tulosten luotettavuutta pyrittiin parantamaan regressioanalyysillä. Kärkivastus, leikkauslujuus ja kimmomoduuli korreloivat hyvin sideainemäärän kanssa.

Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. [The correlation between the shear strength of stabilized soil material and cone resistance.]

Key words deep stabilization, quality control, CPT, cone penetration testing, cone factor

ABSTRACT

The quality of stabilized soil material is usually determined by its compression strength or shear strength. Cone penetration testing is well suitable for controlling the quality of (semi)rigid deep stabilized columns and bulk stabilization, but the interpretation of cone resistance has been based on a fairly uncertain bearing capacity factor N_c . The objective of this study was to increase the reliability of the factor N_c .

Until now the bearing capacity factor N_c has been determined by comparing cone penetration tests and column vane shear tests carried out on the same deep stabilization site. However, the column vane shear test is not a reliable test for strong stabilized columns. The failure mechanism around the vane in a strong stabilized material is quite different from the failure pattern in soft clay on which the interpretation of vane test is based. In this study the shear strength of stabilized material is defined by compression tests.

The theoretical background of the correlation between cone resistance and shear strength was first studied from literature. In the experimental part of this study seven homogenous stabilized columns, whose shear strengths varied between 100 ... 700 kPa, were produced in laboratory conditions. After a hardening time of 28 days these columns were tested by cone penetration tests and samples were taken for laboratory tests.

The bearing capacity factor N_c was determined for each column using mean cone resistance values and mean shear strengths obtained from compression tests. The results show that the factor N_c can be taken as a constant of 10 when the shear strength of the column is between 100 and 500 kPa.

The theoretical solution that is best suitable for these results is the one by Vesic 1975. The theoretical N_c values calculated by Vesic's model are close to the values obtained in this study.

The amount of data – seven columns – is quite small, but the reliability of these results was increased by regression analysis. Cone resistance, shear strength and modulus of elasticity correlated well with the quantity of the stabilizing agent.

ALKUSANAT

Tämän TPPT- tutkimusohjelmaan kuuluvan raportin on tehnyt Jouni Laaksonen diplomityönään VTT Yhdyskuntatekniikan Tie- ja geotekniikan laboratoriossa DI HansRathmayerin ohjauksessa. Työtä on valvonut Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan professori Eero Slunga.

Tielaitos
Geokeskus

Sisältö

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT

1	JOHDANTO	11
2	SYVÄ- JA MASSASTABILOINTI	12
2.1	Syvästabiloinnin periaate ja käyttökohteet	12
2.2	Massastabiloinnin periaate	13
2.3	Laadunvalvonnan nykytilanne	14
3	CPT- ELI PURISTINKAIRAUS	16
4	CPT-KAIRAUKSEN JA SULJETUN LEIKKAUSLUJUUDEN VÄLINEN RIIPPUVUUS SAVESSA	18
4.1	Yleistä	18
4.2	Klassinen kantavuusteoria	20
4.3	Ontelon laajenemiseen perustuva teoria (Cavity expansion theory)	21
4.4	Siirtymäpolkuteoria (Strain path method)	24
4.5	Yhteenveto eri teorioista	26
5	KOKEMUKSIA CPT-KAIRAUKSESTA SYVÄSTABILOINNIN LAADUNVALVONTAMENETELMÄNÄ	27
5.1	Yleistä	27
5.2	CPT-kairauksen leikkauslujuustulkinnan nykyinen käytäntö	28
6	KOEJÄRJESTELYT	29
6.1	Kokeiden tavoite	29
6.2	Koejärjestelyt	29
6.3	Koesarja 1	32
6.3.1	Koepilaroinnissa käytettyjen massojen reseptit	32
6.3.2	Koepilarin valmistus	33
6.3.3	Rinnakkaisnäytteet	35
6.3.4	Lujittumisolosuhteet ja lämpötilat lujittumisaikana	36
6.4	Koesarja 2	37
6.4.1	Koepilaroinnissa käytettyjen massojen reseptit	37
6.4.2	Koepilarin valmistus	37
6.4.3	Lujittumisolosuhteet ja lämpötilat lujittumisaikana	38

7	TUTKIMUSTEN SUORITTAMINEN	40
7.1	Koesarja 1	40
7.1.1	CPT-kairaukset	40
7.1.2	Näytteiden otto	42
7.1.3	Kolmiakksiaalikokeet	44
7.1.4	Puristuskokeet	45
7.1.5	Brasilia-vetokokeet	46
7.1.6	Muut tutkimukset	47
7.2	Koesarja 2	47
7.2.1	CPT-kairaukset	47
7.2.2	Näytteiden otto	49
7.2.3	Kolmiakksiaalikokeet	49
7.2.4	Puristuskokeet	50
7.2.5	Sovelletut kartiokokeet	50
7.2.6	Muut tutkimukset	51
8	TUTKIMUSTEN TULOKSET	52
8.1	Lujittumisen aikaiset lämpötilat	52
8.2	CPT-kairaukset	53
8.3	Kolmiakksiaalikokeet	56
8.4	Puristuskokeet	57
8.5	Muut tutkimukset	59
8.5.1	Vesipitoisuus, tilavuuspaino yms.	59
8.5.2	Brasilia-vetokokeet	60
8.5.3	"Sovelletut kartiokokeet"	60
8.6	Yhteenveto kaikista tutkimuksista	61
9	TULOSTEN TARKASTELU	62
9.1	Sideainemäärän vaikutus eri muuttujiin	62
9.1.1	CPT-kairauksen kärkivastus	62
9.1.2	Kolmiakksiaali- ja puristuskokeet	62
9.1.3	Muut tulokset	64
9.1.4	Yhteenveto	68
9.2	N_c -kerroin	68
9.2.1	Regressioanalyysi	68
9.2.2	Tulosten vertailu luvussa 4 esitettyihin teorioihin	71
9.2.3	Tulosten vertailu kirjallisuuteen	73
10	YHTEENVETO	75
11	KIRJALLISUUSLUETTELO	77
12	LIITTEET	82

MERKINNÄT

A, B	vakioita, -
A_N	puristinkairan kärkikartion kokonaispoikkipinta-ala, mm ²
A_T	puristinkairan kärkikartion poikkipinnan nettoala, mm ²
B	anturan pienempi sivumitta, m
c_u	suljettu leikkauslujuus, kPa
D	anturan perustamissyvyys, m
E	kimmomoduuli, kPa
E_{50}	sekanttikimmomoduuli jännitystasolla 50 % murtojännityksestä, kPa
E^+ , E^-	sekanttikimmomoduuleja, kPa
F	maan ja puristinkairan kärkikartion välisen toiminnan yleisparametri, -
f_R	kitkasuhde, %
f_s	vaippavastus, kPa
G	elastisen alueen leikkausmoduuli, kPa
G_{50}	sekanttileikkausmoduuli jännitystasolla 50 % murtojännityksestä, kPa
H_p	humuspitoisuus, %
i_c , i_D , i_B	kuormitusresultantin kaltevuuden vaikutuskertoimia, -
I_r	jäykkyysindeksi, -
M	maan ja puristinkairan kärjen välinen kitkakerroin, -
N_c	kantavuuskerroin, -
N_D , N_B , N_q	kantavuuskertoimia, -
N_k	kokemusperäinen kantavuuskerroin, -
p_u	ontelon laajentamiseen vaadittava vähimmäispaine, kPa
q_c	kärkivastus, kPa
q_m	perustuksen kantokyky, kPa
q_T	korjattu kärkivastus, kPa
R	puristinkairan kärkikartion säde, mm
R^2	regressiosuoran selitysaste, -
R_p	etäisyys kartion kärjestä, mm
s_c , s_D , s_B	anturan muodon vaikutuskertoimia, -
s_k	kartioleikkauslujuus, kPa
S_t	sensiitivisyys, -
u_T	huokosvedenpaine, kPa
w	vesipitoisuus, %
w_L	juoksuraja, %
w_p	plastisuusraja, %
α_f	puristinkairan kärjen karkeuskerroin, -
α_s	puristinkairan vaipan karkeuskerroin, -
δ	siirtymä, mm
Δ	vaakasuora jännitysindeksi, -
ϕ	kitkakulma, °
ϕ'	tehokas kitkakulma, °
γ	märkätilavuuspaino, kN/m ³

γ_1'	perustamistason yläpuolisen maan tehokas tilavuuspaino, kN/m^3
γ_2'	perustamistason alapuolisen maan tehokas tilavuuspaino, kN/m^3
γ_d	kuivatilavuuspaino, kN/m^3
ν	Poisson-luku, -
θ	puristinkairan kärkikartion kärkikulman puolikas, °
ρ_s	irtotiheys luonnonkosteana, kg/m^3
σ_0	vallitseva jännitys, kPa
σ_1	suurempi pääjännitys kolmiaksaali- tai puristuskokeessa, kPa
σ_3	pienempi pääjännitys kolmiaksaalikokeessa, kPa
σ_{h0}	vaakasuora vallitseva jännitys, kPa
σ_i	isotrooppiseksi oletettu initiaalijännitys maassa, kPa
σ_{murto}	murtojännitys, kPa
$\sigma_{\text{myötö}}$	myötöjännitys, kPa
σ_{oct}	oktaedrinen jännitys, kPa
σ_{v0}	pystysuora vallitseva jännitys, kPa
σ'_{v0}	tehokas pystysuora vallitseva jännitys, kPa

Lyhenteet:

CCE	Cylindrical Cavity Expansion
CPT	Cone Penetration Test
CPT'95	Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, 1995
CPTU	Cone Penetration Testing Undrained
DCM	Deep Cement Mixing
DJM	Dry Jet Mixing
ESOPT I	Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing, 1974
ESOPT II	Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, 1982
FEM	Finite Element Method
ISOPT-1	Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing, 1988
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
PRO	Pohjarakennusohjeet
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto
SCE	Spherical Cavity Expansion
SMW	Soil Cement Diaphragm Wall

1 JOHDANTO

Tämä työ on osa Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelman (TPPT) projektin TU2 Tuotannon laatu alaprojektia TU22 Pohjarakenteet. TPPT:n tutkimussuunnitelmassa [Saarela & al. 1994] esitetyillä koodeilla ilmaistuna tämä tutkimus on osa tutkimusprojektin 332 Syvä- ja massastabilointi osaprojektia 332.60 Stabiloidun tuotteen laadun varmistus ja mittaaminen. TPPT on tielaitoksen laaja tutkimushanke, joka tähtää tienpidon taloudellisuuden parantamiseen tien rakenneteknologiaa kehittämällä.

Nykyisten stabiloinnin laadunvalvontamenetelmien tulokset eivät ole varsinkaan lujien pilarien tai lujan massastabiloinnin osalta yksikäsitteisiä ja luotettavia. Vuonna 1994 tämän saman TPPT-osaprojektin 332.60 yhteydessä tehdyssä laadunvalvonta- ja tutkimusmenetelmien kartoituksessa CPT-kairauksen todettiin soveltuvan hyvin puolilujien ja lujuuskehityksen alkuvaiheissa myös lujien pilarien tutkimiseen [Arkima & al. 1994]. CPT-kairaus – muun muassa kairauksen tulkintamenettely – vaatii kuitenkin vielä kehittämistä.

Stabiloidun pilarin laadun toteaminen perustuu yleensä leikkauslujuuteen. Tähän asti CPT- eli puristinkairauksen kärkivastus on muunnettu kokemusperäisen kantavuuskertoimen N_k avulla leikkauslujuudeksi. N_k :n selvittämiseksi on kussakin stabilointikohteessa tarvittu pilarisiipikairauksia. Pilarisiipikairaus ei kuitenkaan sovellu leikkauslujuudeltaan yli 250 kPa pilareille [Lahtinen & Parkkinen 1992]. Pilarin lujuus on siis arvioitu melko epävarmalla pohjalla olevan kertoimen perusteella, jolloin rakennuttajan ja urakoitsijan välille on saattanut syntyä erimielisyyttä lujuusvaatimuksen täytymisestä.

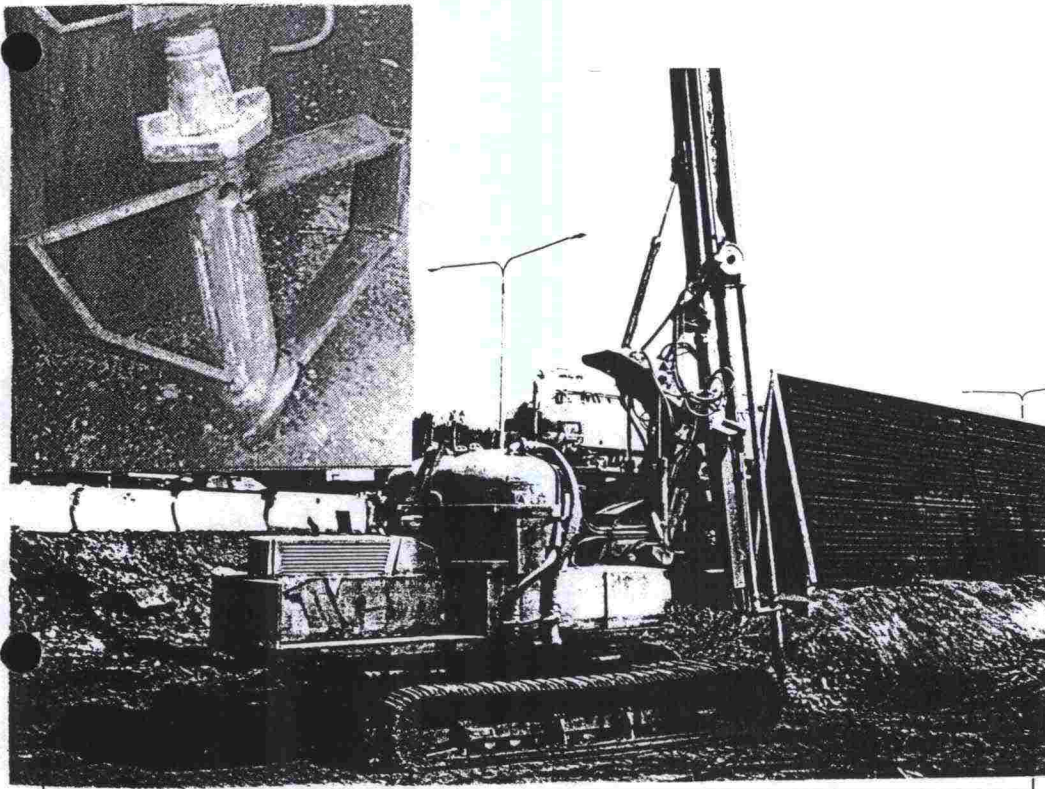
Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut varmistaa CPT-kairauksen tulkintamenettelyn luotettavuutta siten, että CPT-kairausten tulokset hyväksytään riidattomasti stabilointityön ohjaukseen ja laadun varmistukseen.

Työ koostuu kahdesta osasta. Ensinnäkin on kirjallisuustutkimuksella selvitetty CPT-kairauksen kärkivastuksen ja suljetun leikkauslujuuden välisen riippuvuuden teoreettiset perusteet. Tämän jälkeen on tutkittu teorioiden soveltuvuutta stabiloidulle materiaalille koepilarien avulla. Laboratorioolosuhteissa on valmistettu pyöreisiin tynnyreihin seitsemän lujuudeltaan erilaista koepilaria. Sideainemäärää vaihtelemalla on pyritty noin 100 ... 400 kPa leikkauslujuuksiin. 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen koepilarit on puristinkairattu ja niistä on otettu näytteet kolmiaksaali- ja puristuskokeita varten. Seuraavaksi on verrattu CPT-kairausten ja laboratoriokokeiden antamia tuloksia ja arvioitu tulosten keskinäistä riippuvuutta. Lopulta koe-
tulosten perusteella on määritetty kantavuuskertoimet ja verrattu näitä kirjallisuustutkimuksessa selvitettyihin teorioihin.

2 SYVÄ- JA MASSASTABILOINTI

2.1 Syvästabiloinnin periaate ja käyttökohteet

Syvästabilointi on pehmeiden koheesiomaakerrosten pohjanvahvistusmenetelmä, jossa sideaineella stabiloitu maa muodostaa pystysuuntaisen, ympäröivää maata lujemman pilarin. Pilarointikoneen (kuva 1) sekoituskärki painetaan tai kierretään maahan, jolloin samalla rikotaan saven luonnon-tilainen rakenne. Ylös nostettaessa kärjen syöttöaukosta puhalletaan sideainetta samalla, kun sekoituskärkeä pyöritetään tasaisella nopeudella. Sekoitussiivekkeen koosta riippuen tuloksena saadaan halkaisijaltaan 0,5 ... 0,8 m suuruisia pilareita. [Parkkinen 1991, Lahtinen & Kujala 1991]



Kuva 1. Esimerkki sekoituskärjestä ja syvästabilointilaitteistosta.

Syvästabilointi kehitettiin 1960- ja 70-lukujen taitteessa Ruotsissa ja Japanissa. Pohjoismaissa käytetään ruotsalaisten menetelmää; Suomessa menetelmää on käytetty 1970-luvun puolivälistä asti [Kujala 1990]. Aluksi syvästabilointi perustui pelkän sammuttamattoman kalkin sekoittamiseen saveen, mutta nykyisin sideaineena käytetään yleensä erilaisia sementin, kalkin ja teollisuuden sivutuotteiden seoksia.

Japanilainen menetelmä eroaa pohjoismaisesta lähinnä pilarien koossa ja sideaineen syöttötavassa. Japanissa käytetään menetelmiä DJM (Dry Jet Mixing), DCM (Deep Cement Mixing) ja SMW (Soil Cement Diaphragm Wall). Japanissa pilarin halkaisija saattaa olla jopa muutama metri.

Sideaine on yleensä sementti ja sideaine syötetään maahan joko jauheena tai vesi-sementtiseoksena. Japanilaisilla menetelmillä on mahdollista vahvistaa myös kitkamaita, toisin kuin pohjoismaisella pilaroinnilla. [Svensson 1990] Tässä työssä ei japanilaisia menetelmiä käsitellä tämän enempää.

Vaikka pohjoismaista syvästabilointimenetelmää on käytetty ja kehitetty jo lähes kolme vuosikymmentä, lopputuloksen tasalaatuisuudessa on edelleen usein parantamisen varaa. Syvästabiloidun pilarin laatua voi heikentää muun muassa riittämätön saven häirintä ennen sideaineen syöttämistä, ylimääräisen ilman puhaltaminen maahan sekoituskärjen alaviennin yhteydessä, väärä sideaineen syöttöpaine ja siivekkeen liian vähäinen sekoitus- ja tiivistystyö [Rathmayer 1989].

Pilarin lujuus riippuu luonnollisesti myös stabilointikohteen savesta ja käytettävästä sideaineesta. Kohteeseen parhaiten sopiva sideaine ja -määrä määritetään ennakkokokeilla laboratorioissa. Koepilaroinnilla voidaan vielä varmistaa syvästabiloinnin soveltuvuus kohteeseen ja valitulla sideaineella saavutettavat lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. [Parkkinen 1991]

Syvästabilointia käytetään Suomessa lähinnä teiden, katujen, putkijohtojen sekä tonttialueiden pohjan vahvistamisessa. Syvästabilointia on käytetty myös talojen perustusten alla. Kuorman oletetaan jakautuvan syvästabiloidussa rakenteessa pilareille ja ympäröivälle maalle näiden kimmoduulien ja poikkileikkausalojen suhteessa. Koska syvästabiloidut pilarit ovat luonnontilaista maata lujempia, ne parantavat maapohjan vakavuutta. Syvästabilointi myös vähentää ja nopeuttaa painumia, sillä pilarien kimmoduuli on paljon ympäröivän maan moduulia suurempi ja pilarit, joissa sideaineena on käytetty pelkkää kalkkia, johtavat vettä paremmin kuin luonnontilainen savi eli toimivat pystysalaojina. [Parkkinen 1991, Rantamäki & Tammirinne 1992]

Laajemmin syvästabilointia käsitellään muun muassa Syvästabilointiohjeissa [Lahtinen & Kujala 1991], Bromsin & Bomanin [1978] käsikirjassa *Stabilization of soil with lime columns*, RIL:n kurssikirjassa *Syvästabiloinnin suunnittelu ja toteutus* [RIL K128-1990], tielaitoksen *Syvästabiloinnin laadunvalvontaohjeissa* [Lahtinen & Parkkinen 1992], tämän pohjana olevassa Parkkisen [1991] diplomityössä, lähteessä [Carlsten 1994] sekä muutamissa Ruotsin geoteknisen instituutin raporteissa (esimerkiksi [Åhnberg & Holm 1986 sekä Åhnberg & al. 1995]).

2.2 Massastabiloinnin periaate

Massastabiloinnilla tarkoitetaan tässä pohjanvahvistustapaa, jossa pehmeän saven koko pintakerros stabiloidaan – nykyisellä kalustolla 4 ... 5 metrin syvyyteen saakka. Massastabilointiin soveltuvia laitteita ovat seulamurskain ja aktivaattori sekä aumasekoitin ja saven sekoittaja. Kaksi ensimmäistä sekoittavat sideaineen saveen paikalla, kahta jälkimmäistä käytettäessä savi on ensin kaivettava ylös sideaineen sekoitusta varten.

[Rekonen & Halkola 1994] Massastabilointi on (varsinkin Suomessa) uusi pohjanvahvistusmenetelmä ja termi on vielä hieman vakiintumaton, sillä massastabiloinnilla voidaan joskus tarkoittaa myös kaivumassojen stabilointia ennen läjitystä.

2.3 Laadunvalvonnan nykytilanne

Taulukkoon 1 on koottu tietoja tällä hetkellä käytettävistä syvästabiloinnin laadunvalvontamenetelmistä. Näitä menetelmiä voidaan soveltaa myös massastabiloinnin laadun tarkkailuun.

Taulukko 1: Stabiloinnin laadunvalvontamenetelmät suuntaa antavassa järjestyksessä siten, että yleisimmin käytetyt menetelmät on esitelty ensin. Sarake P/L kertoo, soveltuuko menetelmä pehmeille vai lujille pilareille. Parametrit-sarakkeessa esitetään menetelmällä selville saatavat ominaisuudet ("homog." tarkoittaa pystysuuntaista homogeenisuutta). Sarakkeesta J/E nähdään, onko kyseessä jatkuva vai epäjatkuva mittaus. Viimeisen sarakkeen kirjaimet kuvaavat menetelmän nopeutta (N) tai hitautta (H). [Törnqvist 1995, Arkima & al. 1994, Lahtinen & Parkkinen 1992]

Menetelmä	Edut (+), haitat (-)	P/L	Parametrit	J/E	N/H
Pilarikaira	+kairausvastus leveältä pinnalta -kairan pysyminen pilarissa ongelma	P	*homog. *(c_u)	J	N
Puristinkaira	+tarkka sähköinen mittaus -kairausvastus pieneltä alalta -kairan pysyminen pilarissa ongelma	P L	*homog. * c_u	J	N
Pilarisiipikaira	+leikkauslujuuden suora mittaus -kovan stabiloidun saven murtumismekanismi erilainen kuin siipikairauksen tulkinnassa oletetaan	P	* c_u	E	H
Näytteenotto	+luotettavat lujuus- ja muodonmuutosparametrit				
a)poraamalla	-edustavuus huono	L	* c_u , E *sideain.sek.	E	H
b)ylösnostetusta pilarista	+edustavuus hyvä +stabiloinnin laatu visuaalisesti todettavissa -jatkokäsittely ongelma, kallis	P L	* c_u , E *sideaineen sekoittuminen	J/E	H
Porakonekairaus monikanavataallennuksella	-ei lujuustulkintoja olemassa	L	*homog.	J	N
Pilarin pään kaivaminen esiin	+mahdollistaa visuaalisen tarkastelun +mahdollistaa näytteenoton -tarkasteltavana vain pilarin yläosa	P L	*homog. (myös vaakasuunt.) *saven stabiloituvuus		H

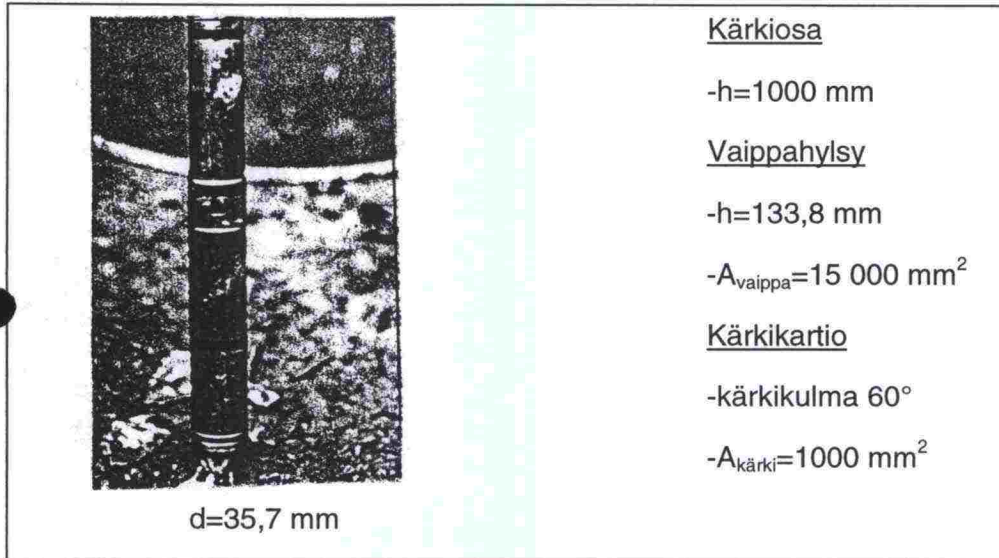
Menetelmä	Edut (+), haitat (-)	P/L	Parametrit	J/E	N/H
Ruuvilevy-kuormituskoe	+painuma- ja kantavuusparametrit	P	*E, σ_{murto} , $\sigma_{\text{myötö}}$	E	H
Koekuormitus	+ stabiloinnin todelliset painuma- ja kantavuusominaisuudet +ymmärrettävin ja suurin menetelmä -erittäin kallis	(P) L	*Murto- ja myötökuorma, kuormitus-painuma-riippuvuus, (E)		H
Dyla eli dynaaminen laadunvalvonta [Aaltonen 1994]	+ei riko stabiloitua tuotetta => voidaan mitata lujuuden kehittymistä -tulkintaongelmia -mittauslaitteiden kiinnittäminen hidasta -kokeiluasteella	L	*ehjyys *(E)	J	(N)
Käännetty pilarikaira [Vepsäläinen 1994]	+kaira pysyy pilarissa +Ruotsissa yleinen -Suomessa ei kalustoa	P L	*homog. *(c_u)	J	N
Geofysikaaliset menetelmät					
a)radiometriset luotaukset	+ei riko stabiloitua tuotetta -kokeiluasteella	P L	*homog. *sideaineen sekoitt.	J	N
b)reikämittaukset	+toistettavissa -kallis, riskialtis -kokeiluasteella	P L	*homog.	J	(N)
Pressometri	-kokeiluasteella	P L	*(c_u), E?	E	H
Leikkausaallon etenemisnopeuden mittaus	+ei riko stabiloitua tuotetta => voidaan mitata lujuuden kehittymistä -kokeiluasteella -vaatii erityisasennustekniikkaa	L	*homog. *(E)	J	(N)

Tällä hetkellä stabiloinnin laatua valvotaan lähinnä pilarikairauksilla (taulukon 1 kolme ylintä menetelmää), joita täydennetään näytetutkimuksilla.

Puristinkairauksen hyviä puolia ovat erityisesti kairauksen nopeus, jatkuva ja tarkka mittaus sekä kairauksen laaja soveltuvuusalue. Tämän tutkimuksen myötä puristinkairauksella voidaan selvittää luotettavasti pystysuuntaisen homogeenisuuden lisäksi stabiloidun tuotteen lujuus.

3 CPT- ELI PURISTINKAIRAUS

Puristinkairauksen englanninkielinen nimi – Cone Penetration Test (CPT) – kuvaa hyvin kairautapahtumaa: tutkitaan kartionmuotoisen kärkikappaleen tunkeutumista maahan. Kärkikappaletta (kuva 2) painetaan tasaisella nopeudella 20 ± 5 mm/s [ISSMFE 1989] tutkittavaan materiaaliin ja kairauslaitteisto mittaa sähköisesti kärkivastuksen q_c sekä vaippavastuksen f_s .



Kuva 2. CPT- eli puristinkairan kärki. Mitat: esimerkiksi [de Beer & al. 1989].

Puristinkairaus on nopea pohjatutkimusmenetelmä, joka soveltuu lähinnä savi-, siltti- ja hiekkamaille. Erityisen hyvin puristinkairaus soveltuu siltin ja hiekan tutkimiseen, koska häiriintymättömien näytteiden ottaminen on näistä usein hankalaa. CPT-kaira on rikkoutumisherkkä, joten sitä ei voida käyttää Suomessa monin paikoin tavattavassa kivisessä moreenimaa-perässä. Tämän takia puristinkairausta ei ole Suomessa kovin paljon käytetty, mutta ulkomailla CPT-kairaus on hyvin yleinen pohjatutkimusmenetelmä: vuodessa tehdään yhteensä yli 150 000 kairausta. [Rantamäki & al. 1992, de Beer & al. 1989]

Puristinkairauksessa kärki- ja vaippavastusta mitataan koko ajan, joten kairaus antaa pystysuunnassa jatkuvan kuvan tutkittavasta materiaalista. Kairausdiagrammin perusteella saadaan selville eri maakerrosten paksuudet. On myös esitetty kokemukspäisiä kitkasuhteeseen f_R (vaippavastuksen f_s suhde kärkivastukseen q_c , %) perustuvia nomogrammeja maalajin alustavaan arviointiin [Begemann 1965, Schmertmann 1978, Robertson 1990].

Yksi aivan ensimmäisistä CPT-kairauksen sovelluksista oli paalun kantaavuuden arviointi, mikä tuntuukin luontealta – onhan paalun kuormittamisen ja kairan maahan painamisen välillä selvä analogia. Kitkamaasta voidaan puristinkairausdiagrammin perusteella lisäksi arvioida muun muassa suhteellinen tiiviyys, kitkakulma sekä kimmo- ja kokoonpuristuvuusmoduulit. Koheesiomaassa puristinkairan avulla voidaan arvioida suljettu leikkaus-

lujuus, esikonsolidaatiojännitys sekä ylikonsolidoitumisaste. [de Ruiter 1982]

CPT-kairauksella saadaan hyvin monipuolista tietoa tutkittavasta maasta. On kuitenkin muistettava, että tulkinnat ovat kokemusperäisiä tai puolikokeellisia ja soveltuvat varmuudella vain niihin pohjaolosuhteisiin, joissa tulkintamenettely on kehitetty.

Puristinkairaukseen voidaan myös yhdistää huokospaineen mittausta, jolloin kyseessä on puristin-huokospainekairaus (CPTU). Tällöin saadaan tietoa muun muassa maan vedenläpäisevyyssominaisuuksista. Myös uusimmissa maalajitulkinnoina ja monien parametrien tulkintamalleissa hyödynnetään tietoa huokosylijipaineen suuruudesta.

Tarkemmin puristinkairausta on käsitelty muun muassa ISSMFE:n [1989] raportissa, Ruotsin geoteknisen instituutin CPT-ohjeessa [Larsson 1993], Rusasen [1994] diplomityössä ja lähteessä [Törnqvist & al. 1994]. Puristinkairausta koskevien symposiumien julkaisut kertovat kattavasti puristinkairauksen kehittymisestä [ESOPT I, ESOPT II, ISOPT-1 ja CPT'95].

4 CPT-KAIRAUKSEN JA SULJETUN LEIKKAUSLUJUUDEN VÄLINEN RIIPPUVUUS SAVESSA

4.1 Yleistä

Suljettu leikkauslujuus c_u määritetään usein kokemusperäisen kaavan (1) mukaan.

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (1) \text{ [Sandven 1990]}$$

missä q_c on kärkevasto, kPa
 σ_{v0} pystysuora vallitseva jännitys, kPa
 N_k kokemusperäinen kantavuuskerroin, -

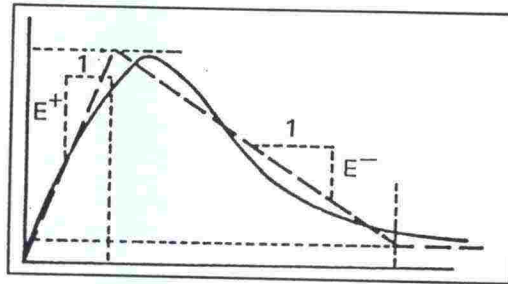
N_k -kerroin vaihtelee suuresti eri materiaaleissa. Esimerkiksi erilaisilla savilla kantavuuskerroin voi vaihdella välillä 4 - 30 [Campanella & Robertson 1988]. Schmertmann [1975] on esittänyt syitä suureen vaihteluun taulukon (2) muodossa. Campanella & Robertson [1988] mainitsevat N_k :n riippuvan lisäksi muun muassa tutkittavan materiaalin sensitiivisyydestä, jännityshistoriasta, jännitystasosta ja makrorakenteesta.

Ruotsin geotekninen instituutti esittää CPT-kairausta koskevassa ohjeessaan N_k -kertoimen riippuvan saven juoksurajasta kokemusperäisen kaavan (2) mukaisesti.

$$N_k = 13.4 + 6.65w_L \quad (2) \text{ [Larsson 1993]}$$

Taulukko 2. Kantavuuskertoimeen N_k vaikuttavia tekijöitä [Schmertmann 1975].
 G = leikkausmoduuli, K_0' = maan tehokas lepopaine kerroin, OCR = ylikonsolidoitumisaste, E^+ ja E^- selviävät kuvasta 3.

Muuttuja	Arvioitu vaik. N_k :hon	Muutoksen suunta	Lähde
c_u :n vertailuarvon määrittäminen menetelmä	$\Delta = -2...-3$	Paremmat näytteet, luotettavampi siipikairaus, jne.	Ks. kaava (1)
Jäykkyyksiindeksi $I_r = G/c_u$	$\Delta = +3$	Jäykkyys kasvaa	[Vesic 1972]
E^+/E^- -suhde	$\Delta = +3$	Suhde kasvaa	[Ladanyi 1967]
Tehokas kitkakulma ($\tan\phi'$)	$\Delta = +2...+3$	ϕ' kasvaa	[Janbu 1974]
K_0' tai OCR	$\Delta = +3$	K_0' tai OCR kasvaa	[Janbu 1974]
CPT-kairan kärjen muoto	$\Delta = -1.5$	Poikkileikk. pieneneminen kärkikartion yläpuolella	[Schmertmann 1972]
Kairausnopeus	$\Delta = +1.2$	Kairausnopeus kasvaa	
Kairaustapa	$\Delta = -1.2$	Jatkuva kairaus verrattuna portaittaiseen kairaukseen	



Kuva 3. Moduulien E^+ ja E^- määrittelmä [Ladanyi 1967].

Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen on yksi vanhimmista puristin-kairauksen sovellutuksista [Robertson & Campanella 1983], mutta yleisesti hyväksyttyä teoreettista ratkaisua ei kuitenkaan ole pystytty kehittämään. Ratkaisun löytäminen on vaikeaa, koska maan käyttäytyminen puristin-kairan kärjen ympärillä on hyvin monimutkaista. Maan murtumismalli on kovin erilainen kuin missään muussa suljettua leikkauslujuutta mittaavassa koemenetelmässä: Maa on jatkuvassa murtotilassa, maan jännitystila kärjen lähellä on anisotrooppinen ja muuttuu koko ajan, ja muodonmuutosnopeus on puristinkairauksessa paljon suurempi kuin esimerkiksi kolmi-akσιαalikokeessa tai siipikairauksessa. [Kurup & al. 1994 ja Jamiolkowski & al. 1982]

Tässä luvussa esitellään yleisimmin käytössä olevat teoriat: klassinen kantavuusteoria, ontelon laajenemiseen perustuva teoria (cavity expansion theory) ja siirtymäpolkumenetelmä (strain path method). Kaikki nämä teoriat perustuvat kaavaan (3), joka on hyvin saman tapainen kuin kokemus-peräinen kaava (1).

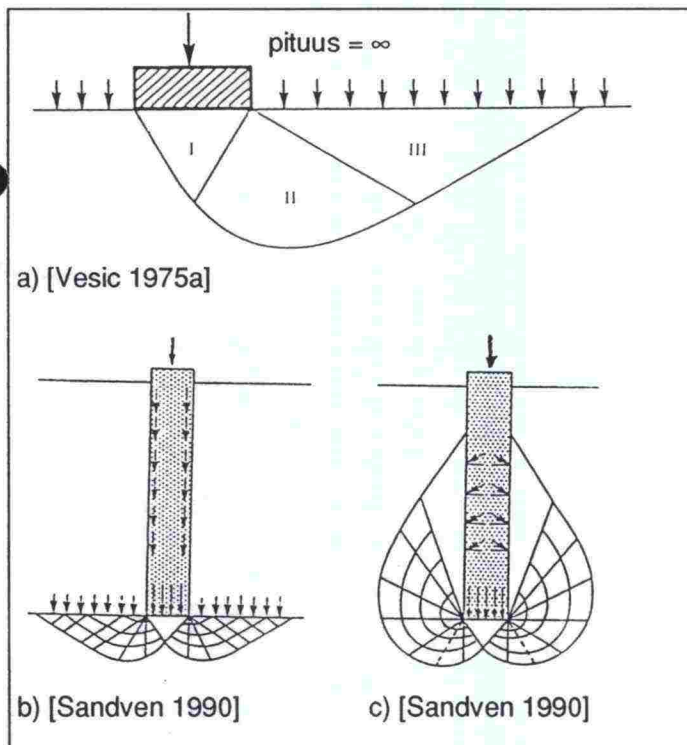
$$c_u = \frac{q_T - \sigma_0}{N_c} \quad (3) \text{ [Sandven 1990]}$$

missä	q_T on	korjattu kärkivastus, kPa
	$q_T =$	$q_c - u_T(1 - A_N/A_T)$
	A_N	kartion kokonaispoikkipinta-ala, mm^2
	A_T	kartion poikkipinnan nettoala, mm^2
	u_T	huokosvedenpaine, kPa
	σ_0	vallitseva jännitys, kPa
	N_c	teoreettinen kantavuuskerroin, -

Kullakin teorialla on oma perusideansa maan murtumisesta puristinkairan kärjen ympärillä. Murtokriteerin perusteella on sitten johdettu kaava N_c :lle. Teoriat eroavat toisistaan myös σ_0 -termin suhteen: käytössä on kolme erilaista tulkintaa vallitsevasta jännityksestä. Usein vallitseva jännitys tulkitaan pystyjännitykseksi ($\sigma_0 = \sigma_{v0}$), mutta on esitetty myös, että vaakasuoralla jännityksellä on pystysuoraa jännitystä suurempi vaikutus kärkivastukseen ($\sigma_0 = \sigma_{h0}$) [Teh 1987]. Kolmas esitetty tulkinta vallitsevalle jännitykselle on oktaedrinen jännitys maassa ($\sigma_0 = \sigma_{oct} = 1/3(\sigma_{v0} + 2\sigma_{h0})$).

4.2 Klassinen kantavuusteoria

Voidaan ajatella, että puristinkairan tunkeutuminen maahan vastaa ympyränmuotoisen perustuksen kuormittamista. Kuvassa 4 on esitetty kolme tunnettua maan murtumismallia perustuksen alla. Ensimmäisen murtumismallin esitti Prandtl vuonna 1921. Prandtlin teorian pohjalta kehitti Terzaghi (1943) kantavuusyhtälönsä ja edelleen Terzaghin teoriaan perustuen Meyerhof (1961, 1963) esitti oman kaavansa, joka on suunnilleen sama kuin Pohjarakennusohjeista [PRO-1988] tuttu kantavuuskaava (4).



Kuva 4. a) Prandtlin 1921, b) Terzaghin 1943 ja c) Meyerhofin 1961 esittämät murtumismallit perustuksen alla.

Perustusta kuormitettaessa Rankinen aktiivinen vyöhyke (kuva 4 a I) työnny alaspäin ja työntää Prandtlin vyöhykettä (II) ja Rankinen passiivista vyöhykettä (III) sivuun. Sivuttaisliike saa aikaan liukupinnat, joihin kehittyy leikkausjännityksiä. Kantavuuskaavat on johdettu liukupinnalla vaikuttavien voimien tasapainoehdoista ja tuloksia on korjattu osittain kokeellisilla kertoimilla. [Putaaala 1990]

$$q_m = cN_c s_c i_c + \gamma_1' DN_D s_D i_D + \frac{1}{2} \gamma_2' BN_B s_B i_B \quad (4) \text{ [PRO-1988]}$$

missä	q_m on	perustuksen kantokyky, kPa
	c	koheesio, kPa
	B	anturan pienempi sivumitta, m
	D	anturan perustamissyvyys, m
	γ_1'	perustamistason yläpuolisen maan tehokas

	tilavuuspaino, kN/m^3
γ_2'	perustamistason alapuolisen maan tehokas tilavuuspaino, kN/m^3
N_c, N_D, N_B	kantavuuskertoimia, -
S_c, S_D, S_B	anturan muodon vaikutuskertoimia, -
i_c, i_D, i_B	kuormitusresultantin kaltevuuden vaikutuskertoimia, -

Koheesiomaassa ($\phi = 0$) kaava (4) yksinkertaistuu muotoon

$$q_m = cN_c s_c i_c + \gamma_1' D s_D i_D \quad (5)$$

Koska puristinkairauksessa ei synny vaakakuormia, kertoimet i_c ja i_D ovat suuruudeltaan yksi. Ympyränmuotoisen perustuksen muotokerrointen s_c ja s_D arvo on myös yksi. Näin ollen kaava (5) voidaan kirjoittaa muotoon

$$c = \frac{q_m - \gamma_1' D}{N_c} = \frac{q_m - \sigma_{v0}'}{N_c} \quad (6)$$

Näin on johdettu puristinkairauksen tulkinnessa käytetty kaava (3).

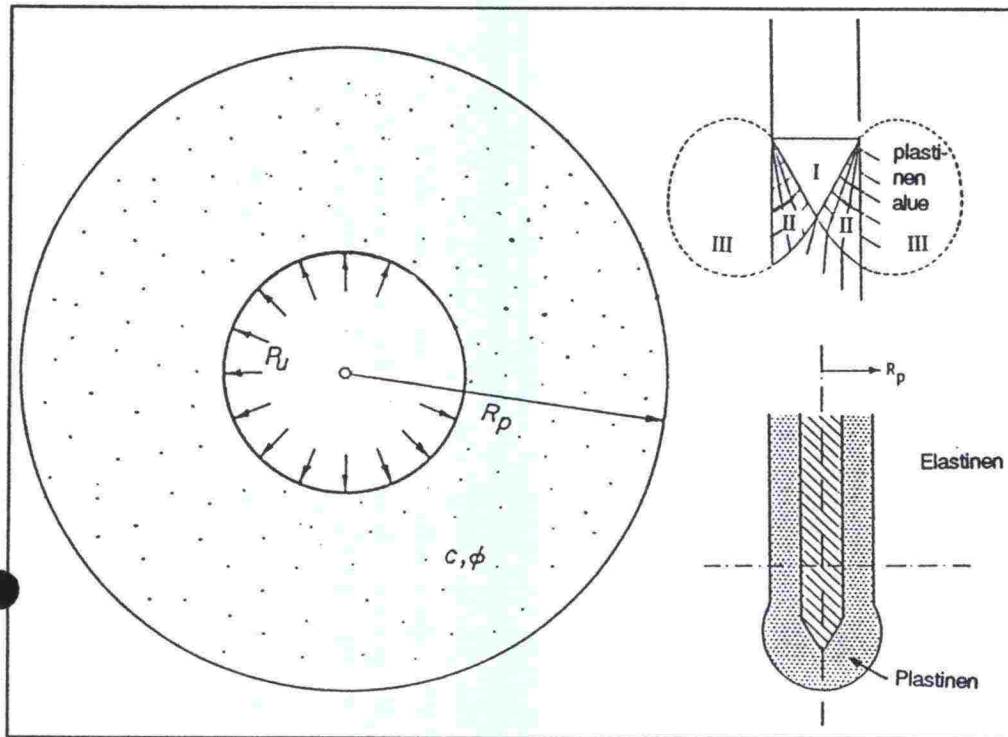
Klassisen kantavuusteorian soveltuvuutta puristinkairauksen mallintamiseen heikentävät sen monet yksinkertaistukset. Kantavuusteoria on alun perin kehitetty vain matalille, pitkänomaisille perustuksille ja liukupintoja käsitellään tasotapauksina. Kantavuuskaavan (4) taustalla olevissa murtumismalleissa maa on oletettu jäykäksi, kokoonpuristumattomaksi aineeksi eikä klassisen kantavuusteorian mukainen lähestymistapa huomioi puristinkairauksen jatkuvaa maahan työntymistä ja sen aiheuttamia suuria muodonmuutoksia. Kantavuuskertoimen N_c arvo riippuu suuresti oletetun liukupinnan muodosta. Toisaalta kantavuusteoria ovat suhteellisen helposti ymmärrettävissä ja niiden avulla johdettu kaava (6) on sopivan yksinkertainen. [Sandven 1990]

4.3 Ontelon laajenemiseen perustuva teoria (Cavity expansion theory)

Cavity expansion -mallin kehittivät Bishop & al. [1945] tutkiessaan metallien kovuuden testauksessa käytettävän tunkeutumiskokeen teoriaa. Tunkeutumiskokeessa kitkattomaan metalliin painetaan kartiopäinen sylinteri eli analogia koheesiomaahan painettavaan puristinkairaahan on selkeä. Vuonna 1972 Vesic sovelsi Bishopin & al. teoriaa maamekaniikkaan.

Vesic [1972, 1975b]

Puristinkairaustapahtuman ajatellaan vastaavan 0-säteisen ontelon laajenemista CPT-kairan kärkikappaleen suuruiseksi onteloksi äärettömässä elasto-plastisessa väliaineessa [Sandven 1990]. Vesicin cavity expansion -teorian murtumismallia havainnollistaa kuva 5.



Kuva 5. Ontelon laajeneminen [Vesic 1972 ja Sandven 1990].

Väliaine oletetaan täysin plastisoituneeksi säteellä R_p kartion kärjestä – pallomaisen laajenemisen teoriassa pallon muotoinen alue ja sylinterimäisen laajenemisen teoriassa sylinterin muotoinen alue. Vesicin [1972] teorian mukaan kartion kantavuus voidaan arvioida pallomaisen (tai sylinterimäisessä laajenemisessa sylinterimäisen) ontelon laajentamiseen vaadittavan vähimmäispaineen p_u avulla. Puristinkairan kärki työntää kuvan 5 mukaisesti leikkautumisvyöhykettä II plastisoituneelle vyöhykkeelle III [Sandven 1990]. Vesic esittää paineelle p_u kaavan (7)

$$p_u = c_u N_c + \sigma_i N_q \quad (7) \text{ [Vesic 1972]}$$

missä σ_i isotroopiseksi oletettu initiaalijännitys maassa, kPa
 N_c, N_q "cavity expansion -tekijöitä" eli kantavuuskertoimia, -

Koheesiomaassa $N_q = 1$ eli

$$c_u = \frac{p_u - \sigma_i}{N_c} \quad (8)$$

Vesic on esittänyt kantavuuskertoimelle N_c seuraavat kaavat:

$$N_c = \frac{4}{3} (\ln I_r + 1) \text{ (pallomainen laajeneminen)} \quad (9) \text{ [Vesic 1972]}$$

$$N_c = \ln I_r + 1 \text{ (sylinterimäinen laajeneminen)} \quad (10) \text{ [Vesic 1972]}$$

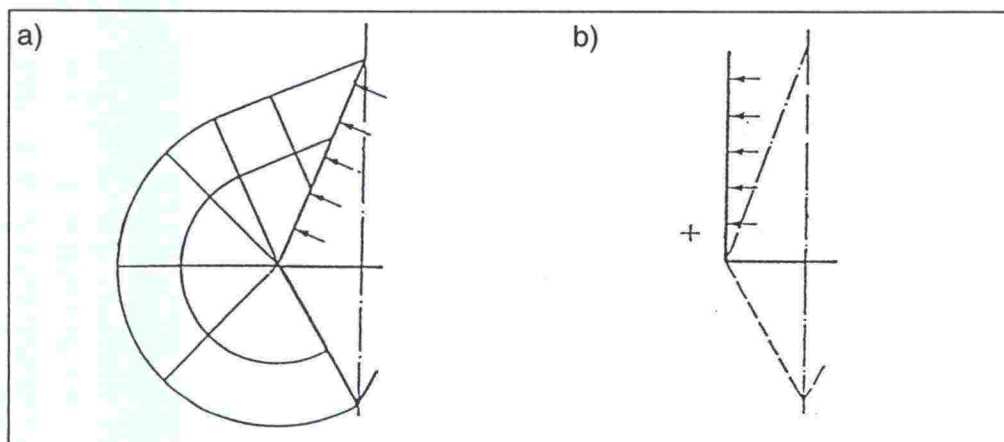
$$N_c = \frac{4}{3} (1 + \ln I_r) + 2,57 \text{ (pallomainen laajeneminen)} \quad (11) \text{ [Vesic 1975b]}$$

missä $I_r = G/c_u$ on jäykkyyssindeksi, -
 G elastisen alueen leikkausmoduuli, MPa

Cavity expansion -teoria kehitettiin alun perin syvien perustusten kanta-
vuuden arvioimiseen. Niinpä teoria ei tässä alkuperäisessä muodossaan ota
huomioon CPT-kairauksen jatkuvaa tunkeutumista syvemmälle maahan
[Sandven 1990].

Baligh [1975]

Baligh [1975] tarkasteli jatkuvaa tunkeutumista tasapainotilanteena (steady
state situation): havainnoitsijan ajatellaan liikkuvan kairan kärjen mukana,
jolloin maan jännitys- ja muodonmuutoskentät pysyvät ajan muuttuessa
vakioina [Jamiolkowski & al. 1982]. *Kuvan 6* mukaisesti Baligh jakoi kairan
maahan painamisen kahteen osaan: Toisaalta yksin kärkikartion painami-
seen (*kuva 6 a*) ja toisaalta sylinterimäisen ontelon laajentamiseen (*kuva 6*
b).



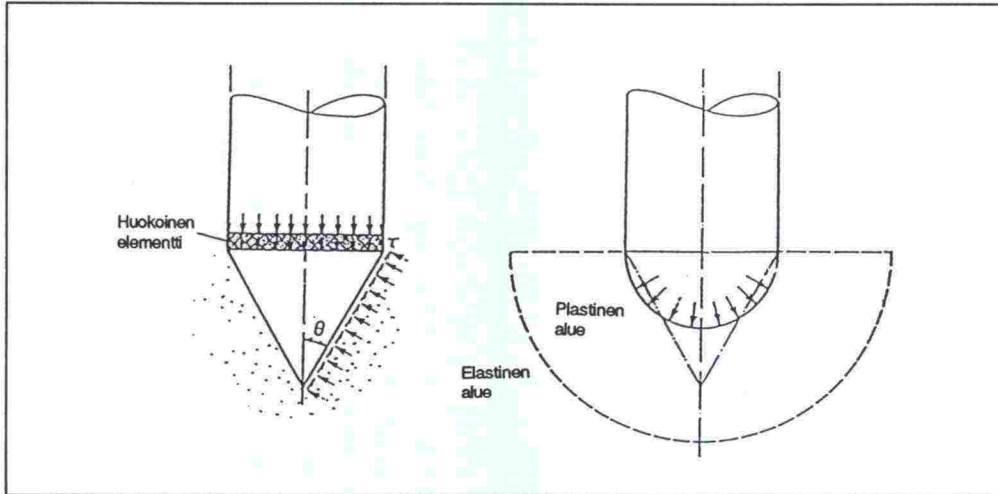
*Kuva 6. Balighin [1975] otaksuma murtumismalli paalun tai puristinkairan kärjen
alla.*

Kartiota ympäröivä maa oletetaan isotrooppiseksi, painottomaksi, jäykäksi
ja täysin plastiseksi materiaaliksi. Sylinterin puolestaan oletetaan laajene-
van elasto-plastisessa, anisotrooppisessa väliaineessa. Näillä oletuksilla
Baligh päätyy kärkikulmaltaan 60° kartiolle kaavaan (12)

$$N_c = (1 + \ln I_r) + 11 \quad (12) \text{ [Baligh 1975]}$$

Konrad & Law [1987]

Konrad & Law [1987] esittivät teorian, jossa puristin-huokospainekairan
maahan tunkeutumisen oletetaan aiheuttavan *kuvan 7 b* mukaisesti pallo-
maisen ontelon laajenemisen.



Kuva 7. Konradin & Law'n [1987] esittämä malli puristin-huokospainekairan maahan tunkeutumiselle.

Konrad & Law olettavat, että plastinen vyöhyke on jäykkäplastista kokoonpuristumatonta materiaalia ja elastinen vyöhyke kimmoteorian mukaista lineaarista elastista materiaalia. Lisäksi maan oletetaan olevan homogeenista, isotrooppista ja painotonta. Näillä otaksuilla Konrad & Law päätyvät kaavaan (13)

$$c_u = \frac{q_T - (1 + F)\sigma_i + F\alpha u_T}{\frac{4}{3}(1 + F)(\ln I_r + 1)} \quad (13) \text{ [Konrad & Law 1987]}$$

missä	σ_i on	isotrooppinen jännitys maassa, kPa
	$F =$	$M \cdot \tan\phi' \cdot \cot\theta =$ maan ja CPT-kairan kärkikartion välisen toiminnan yleisparametri, -
	M	1,0 tavalliselle karkealle pinnalle ja 0,5 - 0,75 sileälle teräspinnalle; maan ja kärjen välinen kitkakerroin, -
	ϕ'	maan tehokas kitkakulma, °
	θ	kartion kärkikulman puolikas (yleensä 30°), °

4.4 Siirtymäpolkuteoria (Strain path method)

Houlsby & Wroth [1989] esittävät, että varsinainen läpimurto puristin-kairauksen tulkinnessa oli Balighin [1985, 1986] kehittämä strain path method eli siirtymäpolkumenetelmä. Baligh [1986] kritisoi cavity expansion -teorioita, koska ne eivät huomioi puristinkairan jatkuvaa maahan tunkeutumista eivätkä ne mallinna maa-alkioiden muodonmuutospolkuja oikein.

Siirtymäpolkumenetelmän juuret juontavat vuoteen 1963. Ladanyi [1963] havaitsi, että laajentunutta onteloa ympäröivä muodonmuutoskenttä ei riipu maan ominaisuuksista, vaikka jännityskenttä riippuukin. Tämän pohjalta Baligh & Levadoux [1980] tutkivat muodonmuutoskenttää ei-viskoosin nestemäisen väliaineen virratessa jatkuvasti puristinkairan ympärillä. Integroinnin ja FEM-analyysien (finite element method) avulla he saivat

selville myös jännitysten jakautuman puristinkairan ympärillä. Lopulta Baligh [1985] esitteli siirtymäpolkuteorian, jonka avulla voidaan määrittää mielivaltaisen muotoisen tunkeutuvan esineen aiheuttamat jännitykset ja siirtymät väliaineessa.

Houlsby & Teh [1988] sovelsivat siirtymäpolkumenetelmää kantavuuskertoimen N_c määrittämiseen. Houlsby & Teh käänivät tavanomaisen lähestymistavan puristinkairaukseen ylösalaisin: he tarkastelivat tilannetta, jossa puristinkaira pysyy paikallaan ja maa virtaa tasaisesti sen vieritse. He laskivat aluksi siirtymäpolkumenetelmän avulla tunkeutumisen aiheuttaman muodonmuutos- ja jännityskentän. Laskelmia tarkistettiin FEM-analyysillä, jolloin alkuperäinen kaava N_c :lle hieman tarkentui. Mallissa kantavuuskertoimen riippuu, paitsi maan jäykkyysindeksistä I_r , myös puristinkairan kärjen ja vaipan karkeuskertoimista sekä vaakasuorasta jännitysindeksistä. Lopullinen kaava N_c -kertoimelle on (14)

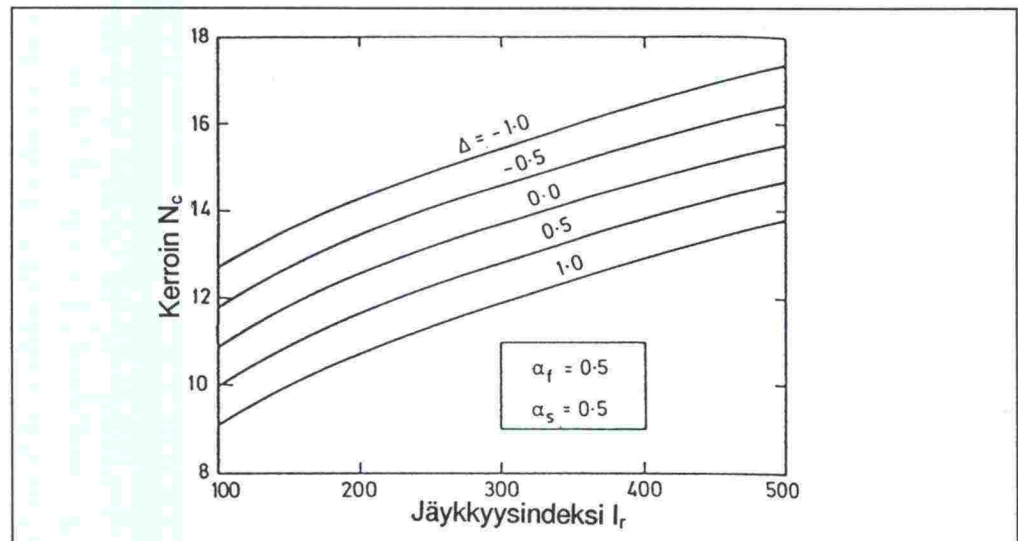
$$N_c = \frac{4}{3}(1 + \ln I_r)(1.25 + \frac{I_r}{2000}) + 2.4\alpha_f - 0.2\alpha_s - 1.8\Delta \quad (14) \text{ [Houlsby \& Teh 1988]}$$

missä α_f on kärjen karkeuskertoimen (0 ... 1,0), -

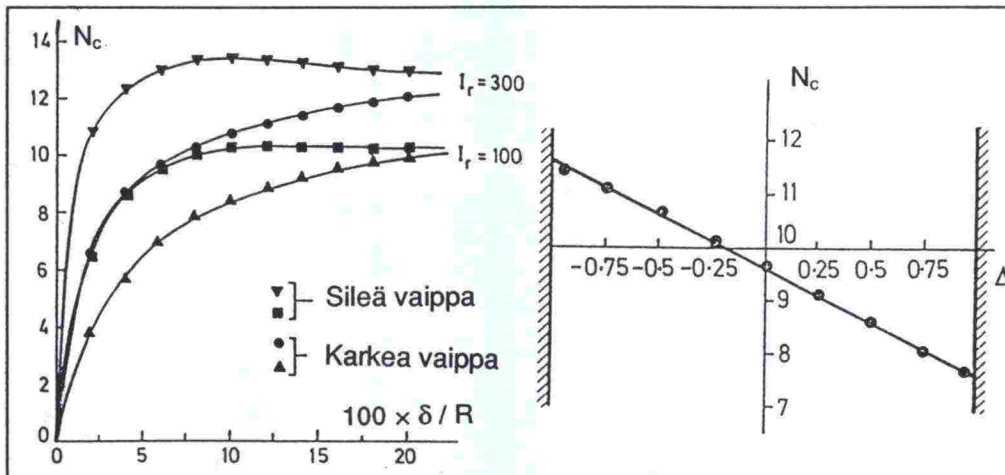
α_s vaipan karkeuskertoimen (0 ... 1,0), -

$\Delta = \frac{(\sigma_{v0} - \sigma_{h0})}{2} c_u =$ vaakasuora jäykkyysindeksi (-1,0 ... 1,0), -

Kuvat 8 ja 9 havainnollistavat edellä mainittujen parametrien vaikutusta N_c -kertoimeen.



Kuva 8. Jäykkyysindeksin I_r vaikutus N_c -kertoimeen [Houlsby & Wroth 1989].



Kuva 9. a) Vaipan karkeuden ja b) vaakasuoran jännitysindexin Δ vaikutus N_c -kertoimeen [Houlsby & Teh 1988].

4.5 Yhteenveto eri teorioista

Taulukkoon 3 on koottu edellä esitetyt teoriat puristinkairauksen ja suljetun leikkauslujuuden väliselle riippuvuudelle.

Taulukko 3. Yhteenveto saven suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen kehitetyistä analyyttisistä malleista. SCE = Spherical Cavity Expansion eli pallomaisen ontelon laajeneminen, CCE = Cylindrical Cavity Expansion eli sylinterimäisen ontelon laajeneminen. Suljettu leikkauslujuus lasketaan kaikissa teorioissa

$$\text{kaavasta (3)} \quad c_u = \frac{q_T - \sigma_0}{N_c}$$

Malli	N_c	σ_0	Lähde
Kantavuusteoriat		σ_{v0}	Terzaghi 1943 Meyerhof 1961, 1963
SCE	$\frac{4}{3}(1 + \ln I_r)$	σ_{v0}	[Vesic 1972]
CCE	$(1 + \ln I_r)$	σ_{v0}	[Vesic 1972]
SCE + energian säil. periaate	$\frac{4}{3}(1 + \ln I_r) + 2.57$	σ_{oct}	[Vesic 1975b]
CCE + energian säil. periaate	$(1 + \ln I_r) + 11$	σ_{h0}	[Baligh 1975]
SCE	$\frac{4}{3}(1 + F)(\ln I_r + 1)$	$(1+F)\sigma_i$	[Konrad & Law 1987]
Strain Path Method + FEM (Siirtymäpolkumenetelmä + FEM)	$\frac{4}{3}(1 + \ln I_r)(1.25 + \frac{I_r}{2000}) + 2.4\alpha_f - 0.2\alpha_s - 1.8\Delta$	σ_{v0}	[Baligh 1985 ja Houlsby & Teh 1988]

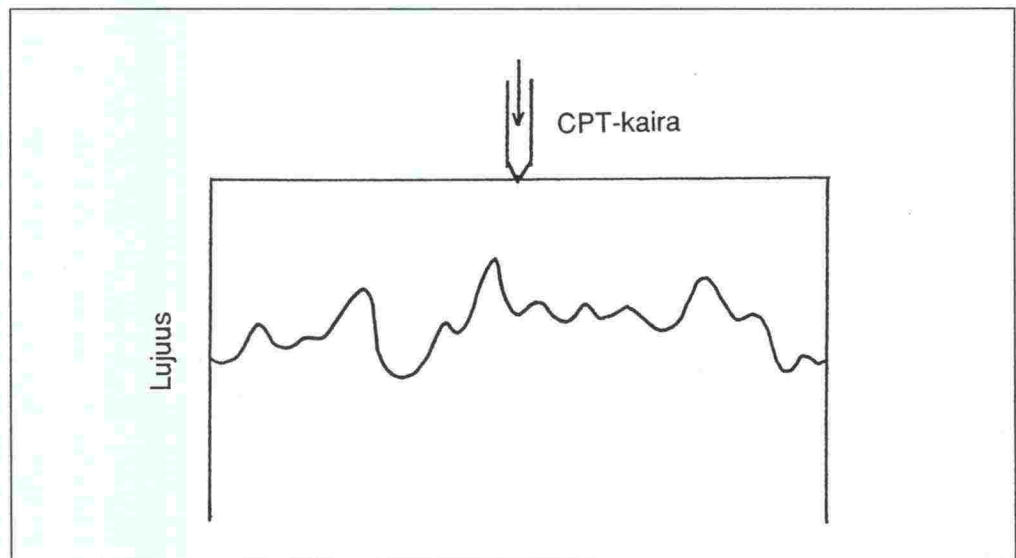
Kaikki edellä esitetyt teoriat on kehitetty saven suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen. Niinpä on epävarmaa, soveltuvatko ne suoraan myös stabiloidulle materiaalille.

5 KOKEMUKSIA CPT-KAIRAUKSESTA STABILOINNIN LAADUNVALVONTAMENETELMÄNÄ

5.1 Yleistä

Syvästabiloinnin laadunvalvontaohjeessa [Lahtinen & Parkkinen 1992] esitetään pehmeiden ja lujien pilarien rajaksi leikkauslujuuden arvoa $c_u = 200$ kPa. Laadunvalvontamenetelmäksi suositellaan pilarikairausta pehmeille ja puristinkairausta lujille pilareille. Ruotsalaisen kalkki- ja kalkkimenttipilaroinnin käsikirjan mukaan raja on $c_u = 150$ kPa [Carlsten 1994]. Puristinkairaus soveltuu pilarikairaa pienemmän kärkensä ansiosta lujienkin pilarien laadunvalvontaan. Samalla puristuskapasiteetilla CPT-kairaa voidaan painaa paljon lujempaan pilariin kuin pilarikairaa.

Kuten luvussa 2 mainittiin, syvästabiloinnin laadussa on vielä paljon kehitettävää. Lujuusvaihtelua on niin pysty- kuin vaakasuunnassakin. Pystysuunteisen vaihtelun selvittämiseen puristinkairaus soveltuu hyvin. Sen sijaan sideaineen mahdollinen epätasainen jakautuminen pilarin poikkileikkauksessa ei tule ilmi CPT-kairauksilla (kuva 10).



Kuva 10. Lujuusvaihtelu pilarin poikkileikkauksessa.

Kuvasta 10 nähdään, että siihen asti kunnes stabiloitu massa on täysin homogeenista, puristinkairauksissa on aina epävarmuutta – ei voida tietää, edustaako puristinkairausdiagrammi lujuusvaihtelun ylä- tai alarajaa vai jotain siltä väliltä.

CPT-kairaus on yksi harvoista lujille pilareille soveltuvista menetelmistä, joilla havaitaan pilarin ohuetkin heikkousvyöhykkeet. Puristinkairauksen hyviä puolia ovat myös sen halpuus ja nopeus. Moneen muuhun menetelmään nähden halpoja CPT-kairauksia voidaan syvästabilointikohteessa tehdä niin paljon, että ainakin muutama kairaus antaa jatkuvan, edustavan kuvan koko pilarin pituudelta. [Arkima & al. 1994]

Puristinkairauksen käyttö stabiloinnin laadunvalvonnassa ei toki ole ongelmattonta. Pitkissä pilareissa CPT-kairan pieni kärki usein tunkeutuu ulos pilarista. Ulos työntyminen voi johtua siitä, että pilarointikoneen masto ei aina ole aivan pystysuorassa, joten pilarit saattavat olla hivenen kaltevia. Toinen syy ulos työntymiseen on kairatankojen taipuminen. Samat ongelmat koskevat tietenkin myös pilari- ja pilarisiipikairausta. Kairan kärjen tunkeutumista ulos pilarista voidaan ehkäistä käyttämällä tavallista jäykempiä tankoja tai ohjainta. [Arkima & al. 1994]

Edellä mainittuihin hankaluuksiin ei tässä työssä enempää puututa. CPT-kairauksen (ja pilarikairauksenkin) ongelma on myös tulkinta: puristamalla tapahtuvassa kairauksessa ei mitata suoraan leikkauslujuutta, vaan kairausvastus muunnetaan kokemukseräisellä kaavalla leikkauslujuudeksi. Tässä työssä keskitytään tämän ongelman tarkasteluun ja pyritään luomaan luotettava tulkintamenettely.

Nopeana ja jatkuvaa tietoa tuottavana kairauksena puristinkairaus soveltuu hyvin myös massastabiloinnin laadunvalvontaan.

5.2 CPT-kairauksen leikkauslujuustulkinnan nykyinen käytäntö

Puristinkairaus ei mittaa suoraan leikkauslujuutta vaan leikkauslujuus c_u määritetään puristinkairauksen kärkivastuksesta kaavan (15) avulla.

$$c_u = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{N_k} \quad (15) \text{ [Lahtinen & Parkkinen 1992]}$$

missä q_c on kärkivastus, kPa
 σ'_{v0} tehokas pystysuora vallitseva jännitys, kPa
 N_k kokemukseräinen kantavuuskerroin, -

Kantavuuskerroin N_k määritetään yleensä vertaamalla samasta syvästabilointikohteesta tehtyjä puristinkairauksia ja pilarisiipikairauksia. Aina ei pilarisiipikairauksia edes tehdä, vaan käytetään suunnittelijan kokemuksiin perustuvaa kantavuuskerrointa.

Lujissa pilareissa ei pilarisiipikairaa voida käyttää tarvittavan suuren vääntökapasiteetin takia. Tällöin voidaan yrittää porata lujasta pilarista näyte ja selvittää sen leikkauslujuus laboratoriossa, mutta ehjän näytteen saaminen on hankalaa ja laboratorion kokeet tulevat kalliiksi ja vievät aikaa. Lisäksi tulokset ovat vääristyneitä, sillä pilarista voidaan saada ehjiä näytteitä vain hyvin lujittuneista kohdista. Käytännössä lujissa pilareissa käytettävä kantavuuskerroin siis arvioidaan kokemuksen pohjalta, mikä voi johtaa erimielisyyksiin esimerkiksi urakoitsijan ja rakennuttajan välillä!

6 KOEJÄRJESTELYT

6.1 Kokeiden tavoite

Kokeiden tavoitteena oli valmistaa homogeenisia, lujuudeltaan erilaisia koepilareita ja tutkia näiden lujuutta sekä puristinkairauksin että laboratorioskokein. CPT-kairauksen kärkivastusta ja laboratorioskokeilla määritettyjä leikkauslujuuksia vertaamalla pyrittiin saamaan erilaisten lujien pilarien kantavuuskertoimet selville.

6.2 Koejärjestelyt

Koepilarit valmistettiin tynnyreihin (kuva 11). Tynnyrit vuorattiin 3 mm paksulla solumuovilla reunavaikutusten vähentämiseksi kairattaessa. Samalla solumuovi myös lämpöä eristävänä materiaalina vähensi lujittumisreaktioissa syntyvän lämmön karkaamista.



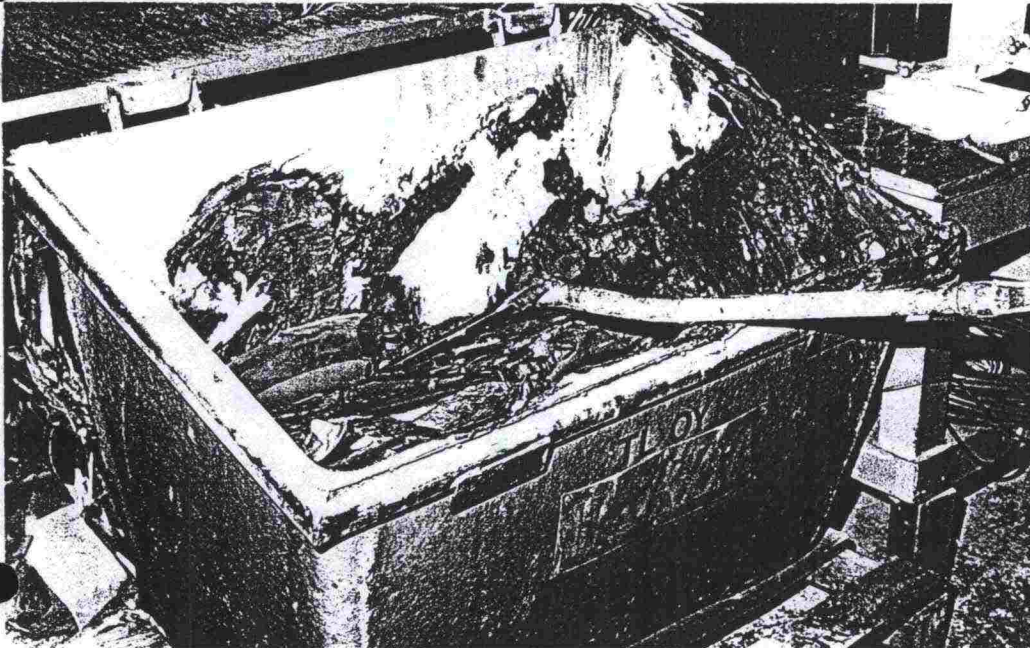
Kuva 11. Koepilaroinnissa käytetyn tynnyrin sisähalkaisija oli 0,57 m ja korkeus 0,86 m. Etualalla puujuntta, jolla massa tiivistettiin.

Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin neljä pilaria (koesarja 1). Sideainepitoisuutta vaihtelemalla pyrittiin siihen, että lujimman pilarin leikkauslujuus

olisi yli 400 kPa ja muiden tätä pienemmät. Varauduttiin myös lisäpilareiden valmistamiseen, mikäli ensimmäisen pilarisarjan tutkimustulokset vaatisivat täydentämistä. Lisää tietoa kaivattiinkin: ensimmäisen koesarjan koestamisen jälkeen tehtiin kolme lisäpilaria (koesarja 2).

Savi

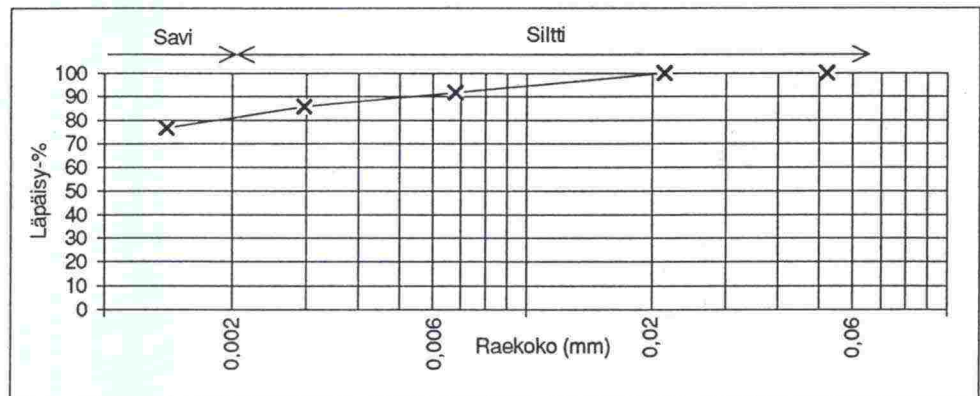
Massojen valmistuksessa käytetty savi haettiin Pukinmäestä, Kehä I:n ylittävän rautatiesillan alla tehtävästä leikkauksesta. Kyseisessä kohdassa savikerrostuma ei ole kovin paksu; siltti tulee vastaan jo noin puolentoista metrin syvyydessä. Savi kuljetettiin noin puolen kuutiometrin suuruisissa lasikuituisissa hiekkalaatikoissa (kuva 12) ja säilytyksen ajaksi laatikot peitettiin muovilla. Saven ominaisuudet (taulukko 4 ja kuva 13) määritettiin laboratoriossa.



Kuva 12. Kokeissa käytetty savi.

Taulukko 4. Pukinmäen rautatiesillan alta noin 0,5 - 1 m syvyydeltä kaivetusta savesta laboratoriossa määritetyt ominaisuudet.

Vesipitoisuus	w	81 %
Märkätilavuuspaino	γ	15,7 kN/m ³
Kuivatilavuuspaino	γ_d	8,7 kN/m ³
Kartioleikkauslujuus	S_k	8,6 kPa
Sensitiivisyys	S_t	8,0
Humuspitoisuus (polttokoe)	H_p	1,0 %
Irtotiheys luonnonkosteana	ρ_s	2700 kg/m ³



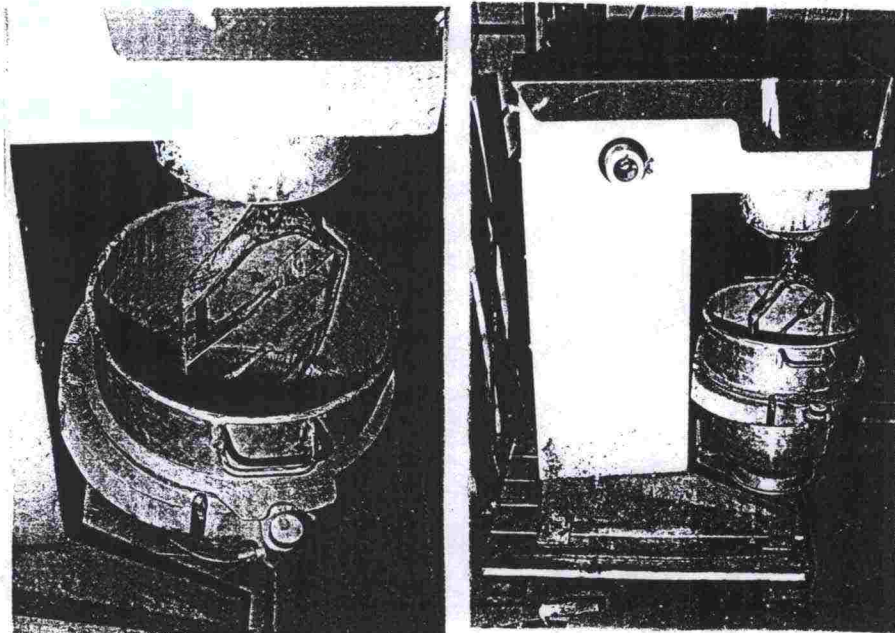
Kuva 13. Areometrikokeella määritetty saven rakeisuuskäyrä.

Sideaine

Sideaineena käytettiin Lohja Oy:n antamaa seosta Lohja Mix.

Sekoituskalusto

Massa sekoitettiin Metos-Karhu-merkkisellä pakkosekoittajalla (kuva 14), jonka sekoituskulhon tilavuus oli 30 litraa. Vispilä pyöri akselinsa ympäri noin 52 kierrosta minuutissa ja vispilän akseli puolestaan kiersi kulhon noin 26 kertaa minuutissa.



Kuva 14. Sekoituskalusto.

Tiivistäminen

Massan tiivistämiseen käytettiin puujunttaa, jonka pohjan pinta-ala oli 75 mm × 175 mm (kuva 11).

Näytelieriöt

Kokeissa käytetyt näytelieriöt olivat tavallisia lasikuidusta valmistettuja lieriöitä (d = 50 mm ja h = 170 mm). Näytelieriöiden sisäpintaan levitettiin vasseliinia näytteiden irrottamisen helpottamiseksi.

Lämpötilan mittaaminen

Lämpötilan mittaamiseen käytettiin kupari-konstantaani-termopareja ja Fluke Hydra -merkkistä mittalaitetta.

6.3 Koesarja 1

6.3.1 Koepilaroinnissa käytettyjen massojen reseptit

Toteutetuissa syvästabilointikohteissa käytettyjen sideainemäärien ja havaittujen lujuuksien perusteella arvioitiin sopivaksi suurimmaksi sideainepitoisuudeksi noin 250 kg/m³. Tätä vielä pyöristettiin hieman ylöspäin, jolloin saatiin lujimman pilarin sideainemääräksi 50 kg/tynnyri (264 kg/m³). Jotta kuukauden kuluttua olisi varmasti käytettävissä lujuuksiltaan selvästi erilaisia pilareita, seuraavien tynnyrien sideainemääriä pienennettiin huomattavasti: 40, 30 ja 15 kg/tynnyri.

Käytettäviä reseptejä mietittäessä hyödynnettiin myös VTT:n Rakennusmateriaalilaboratorion ja Tie- ja geotekniikan laboratorion yhteisen stabilointiprojektin loppuraporttia [Kukko & Ruohomäki 1995].

Saveen lisättiin vettä sekoittamisen helpottamiseksi. Kun saveen luonnollinen vesipitoisuus oli noin 81,5 %, vettä lisättiin siten, että vesipitoisuus nousi sataan prosenttiin. Kokeilemalla päädyttiin siihen, että vajaan 20 litran annos oli sopivan suuruinen kerralla sekoitettavaksi. Käytetyt reseptit on esitetty taulukossa 5. Tästä lähtien koepilareihin viitataan tynnyriin laitetun sideainemäärän mukaan: koepilari 50 tarkoittaa sitä pilaria, jossa on 50 kg sideainetta / tynnyri.

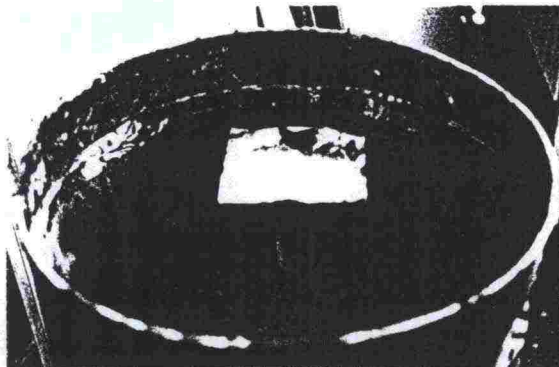
Taulukko 5. Koesarjassa 1 käytettyjen massojen reseptit. Sideainepitoisuus tarkoittaa sideaineen massan suhdetta kuivan saven massaan.

<u>Koepilari 50</u>		<u>Koepilari 30</u>	
Sideainetta	264 kg/m ³	Sideainetta	158 kg/m ³
Sideainepitoisuus	44 %	Sideainepitoisuus	24 %
Vesi-sideaine-suhde	2,3	Vesi-sideaine-suhde	4,2
<u>Koepilari 40</u>		<u>Koepilari 15</u>	
Sideainetta	211 kg/m ³	Sideainetta	80 kg/m ³
Sideainepitoisuus	33 %	Sideainepitoisuus	11 %
Vesi-sideaine-suhde	3,0	Vesi-sideaine-suhde	10,5

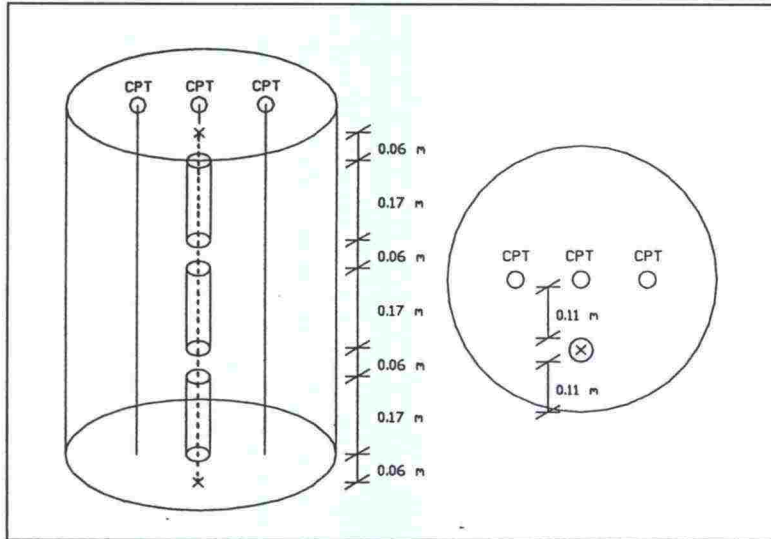
6.3.2 Koepilarin valmistus

Tässä kappaleessa suluissa olevat isot kirjaimet viittaavat liitteen 1 vastaaviin kuviin. Massa tehtiin noin 18 litran annoksissa. Yhden annoksen valmistaminen alkoi veden ja saven punnituksilla (A). Veden lämpötila oli 20 ± 4 °C. Reseptin mukainen määrä kumpaakin kaadettiin sekoituskulhoon (B) ja kulho sekä vispilä kiinnitettiin sekoituskoneeseen. Puolen minuutin sekoituksella saven ja veden seoksesta tehtiin tasalaatuinen (C). Edelleen sekoittaen kulhoon lisättiin ennalta punnittu määrä sideainetta (D). Tätä seosta sekoitettiin minuutti, jonka jälkeen kone pysäytettiin ja puutikulla työnnettiin vispilän päälle jäänyt sideaine seokseen. Tämän jälkeen sekoitettiin vielä minuutti, jonka jälkeen massa oli valmista (E). Kulho ja vispilä tyhjennettiin tynnyriin (F, G, H ja I) ja massa tiivistettiin puujuntalla (J ja K). Tiivistäminen tapahtui suunnilleen seitsemän sentin kerroksissa ja kukin kerros tiivistettiin noin 70 lyönnillä. Tynnyri täytettiin 0,74 - 0,75 m korkeuteen, joten yhden koepilarin tilavuus oli noin 190 litraa. Yhteen tynnyriin mahtui vajaat 11 annosta.

Kun massa oli tynnyrissä kohonnut tietylle tasolle, tiivistettyyn massaun painettiin hitaasti näytelieriö (kuva 15). Kuhunkin tynnyriin asennettiin – poikkileikkauksessa samalle kohdalle – kolme lieriötä syvyysuunnassa tasaisin välimatkoin (kuva 16). Asentamalla massan sisään näytelieriötä pyrittiin helpottamaan näytteiden saamista lujittuneista koepilareista.



Kuva 15. Näytelieriön ($d = 50$ mm, $h = 170$ mm) painaminen massaun.



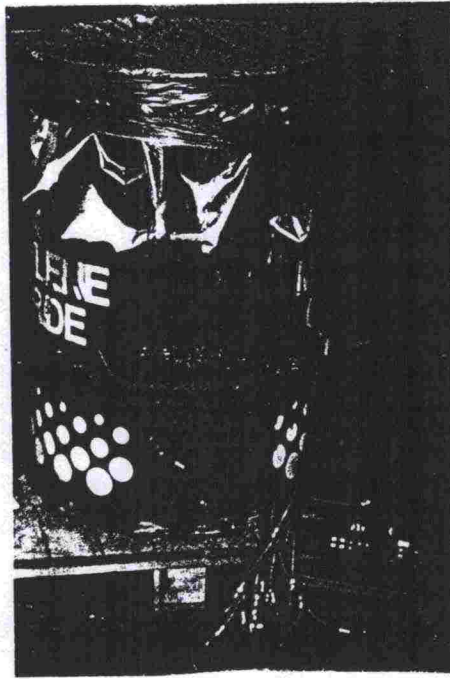
Kuva 16. Näytelieriöiden sijainti tynnyrissä (koesarja 1).

Tuoreesta, lujittumattomasta massasta vietiin näyte laboratorioon tilavuuspainon, vesipitoisuuden, juoksu- ja kieritysrajan sekä kartioleikkauslujuuden määrittystä varten.

Lujittumisvaiheen aikaista lämpötilan muuttumista haluttiin tarkkailla, joten massaa valmistettaessa tynnyrin sisälle asennettiin termopari (kuva 17). Termopari sijoitettiin $0,40 \pm 0,01$ m syvyydelle noin 0,15 m etäisyydelle tynnyrin reunasta. Kuvassa 18 on lämpötilojen rekisteröinti käynnissä: mittalaitte tallensi puolen tunnin välein kunkin termoparin lämpötilan.



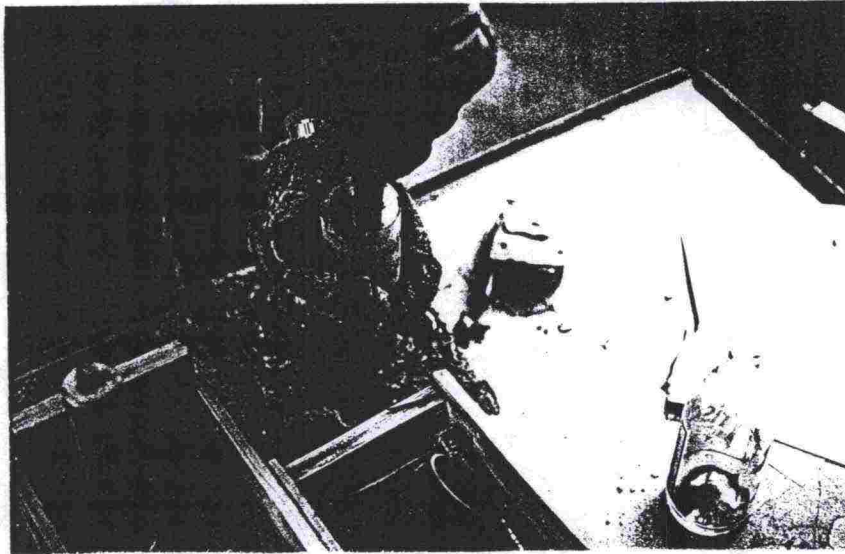
Kuva 17. Termoparin asentaminen.



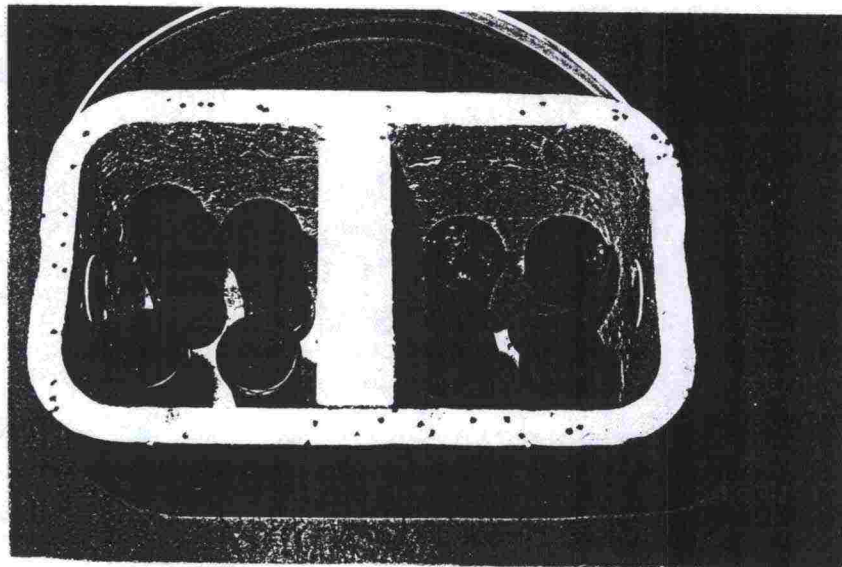
Kuva 18. Lämpötilojen mittaaminen.

6.3.3 Rinnakkaisnäytteet

Kun tynnyri oli tiivistetty massaa täyteen, viimeisestä annoksesta yli jääneestä massasta valmistettiin neljä rinnakkaisnäytettä. Massa työnnettiin sisäpuolelta rasvattuun näytelieriöön ja tiivistettiin mahdollisimman hyvin näytteen ulostyöntäjällä (*kuva 19*). Näytelieriöt numeroitiin ja asetettiin lujittumaan kannelliseen styrox-laatikkoon, johon oli tehty väliseinä *kuvan 20* mukaisesti.



Kuva 19. Rinnakkaisnäytteen valmistaminen.



Kuva 20. Rinnakkaisnäytteiden säilyttäminen.

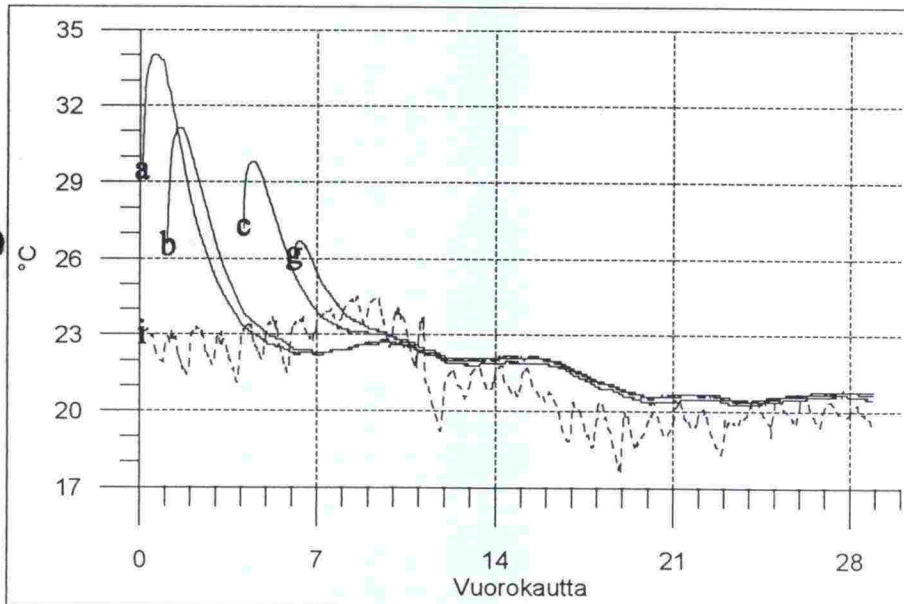
6.3.4 Lujittumisolosuhteet ja lämpötilat lujittumisaikana

Kun tynnyri saatiin massaa täyteen, se peitettiin kaksinkertaisella muovilla (kuva 21).



Kuva 21. Koepilarien säilyttäminen.

Kuvassa 22 on esitetty lämpötilan kehittyminen kussakin tynnyrissä ajan myötä.



Kuva 22. Lämpötilan kehittyminen pilarien sisällä sekä huoneilman lämpötila lujittumisaikana. Vaaka-akselin nollakohta on koesarjan ensimmäisen pilarin valuajankohta. Käyrien symbolit: a = pilari 50, b = pilari 40, c = pilari 30, g = pilari 15 ja i = huoneilma.

Kaikki neljä käyrää ovat hyvin saman muotoisia: pilarin sisältä mitattu lämpötila saavutti maksiminsa noin puolen vuorokauden kuluttua pilarin valmistuksesta, jonka jälkeen lämpötila pilarissa melko nopeasti lähestyi ympäröivän huoneilman lämpötilaa – pysyen kuitenkin hieman sen yläpuolella. Huoneilman keskimääräinen lämpötila lujittumisaikana oli 21,2 °C.

6.4 Koesarja 2

6.4.1 Koepilaroinnissa käytettyjen massojen reseptit

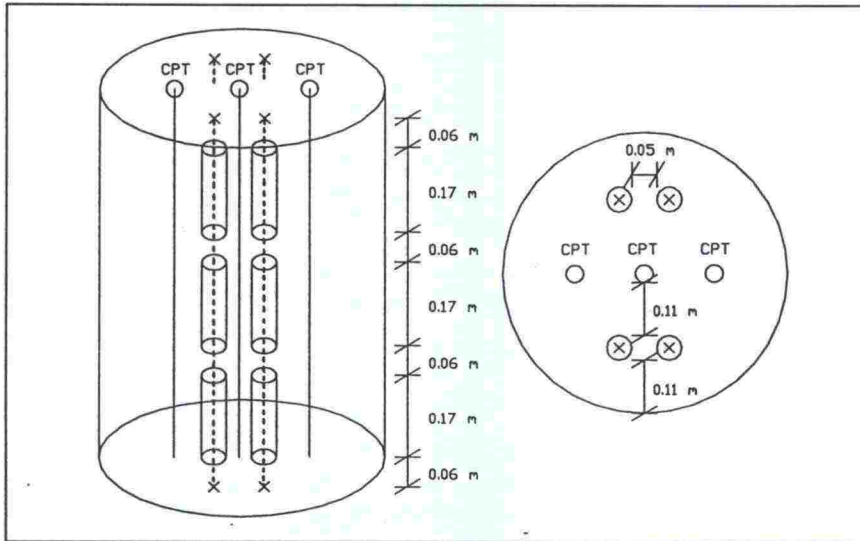
Ensimmäisessä koesarjassa pilarien sideainemäärät olivat 50, 40, 30 ja 15 kg / tynnyri. Toisella koesarjalla täydennettiin ensimmäistä siten, että uudet sideainemäärät olivat 30, 25 ja 20 kg / tynnyri. Koesarjan 1 perusteella osattiin arvioida, että näillä sideainepitoisuuksilla saavutettaisiin tavoiteltuja puolilujien pilarien lujuuksia (leikkauslujuudet noin 180 ... 350 kPa). Valitsemalla sideainemäärät näin saatiin yksi täsmälleen samalla reseptillä valmistettu pilari koesarjojen keskinäistä vertailua varten ja kaksi pilaria, joiden lujuustasot olivat erilaiset kuin ensimmäisessä koesarjassa. Käytetyt reseptit on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Koesarjassa 2 käytettyjen massojen reseptit. Sideainepitoisuus tarkoittaa sideaineen massan suhdetta kuivan saven massaan.

<u>Koepilari 30</u>		<u>Koepilari 20</u>	
Sideainetta	158 kg/m ³	Sideainetta	106 kg/m ³
Sideainepitoisuus	24 %	Sideainepitoisuus	15 %
Vesi-sideaine-suhde	4,2	Vesi-sideaine-suhde	6,5
<u>Koepilari 25</u>			
Sideainetta	132 kg/m ³		
Sideainepitoisuus	20 %		
Vesi-sideaine-suhde	5,1		

6.4.2 Koepilarin valmistus

Koepilarit valmistettiin aivan samalla tavalla kuin ensimmäisenkin koesarjan pilarit. Ainoa ero oli siinä, että nyt jokaiseen koepilariin asetettiin kolmen sijasta 12 näytelieriötä – kolmelle eri syvyystasolle neljä lieriötä kullekin (kuva 23). Ensimmäisen koesarjan yhteydessä havaittiin, että pilarista otetut näytteet olivat paljon parempikuntoisia kuin rinnakkaisnäytteet. Niinpä toisessa sarjassa päätettiin laittaa enemmän näytelieriöitä tynnyriin ja jättää rinnakkaisnäytteet kokonaan tekemättä.

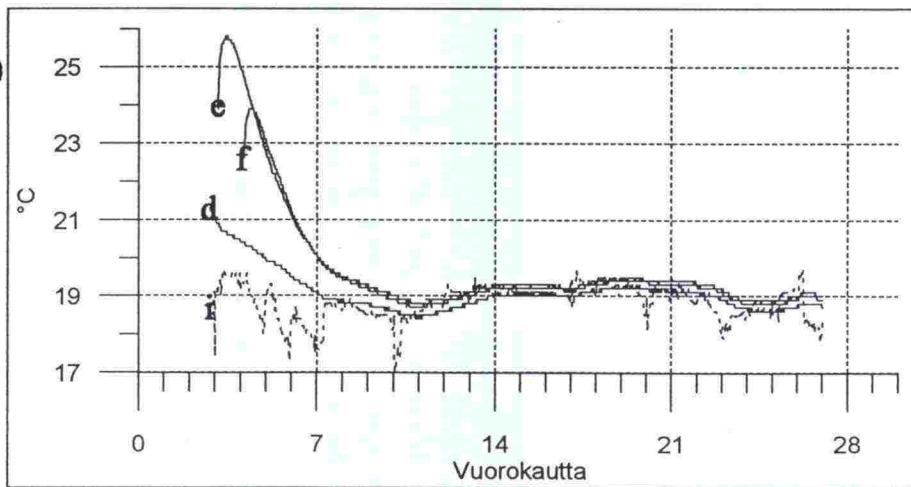


Kuva 23. Näytelieriöiden sijainti tynnyrissä (koesarja 2).

Koesarjan 2 pilareista tuli muutaman sentin korkeampia kuin koesarjan 1 pilareista: massa nousi tynnyreissä noin 0,77 - 0,78 m korkeudelle.

6.4.3 Lujittumisolosuhteet ja lämpötilat lujittumisaikana

Tynnyrin täyttyttyä se peitettiin muovilla ja työnnettiin kärryillä varastohuoneeseen. Lujittumisolosuhteet olivat koesarjan 2 pilareille muuten samat kuin sarjassa 1, paitsi että varastohuoneen ilman lämpötila oli nyt syksyllä useita asteita alhaisempi kuin kesällä, ensimmäisen sarjan pilarien lujituessa. Kuvassa 24 on esitetty pilarien sisältä mitatut ja huoneilman lämpötilat lujittumisaikana.



Kuva 24. Lämpötilan kehittyminen pilarien sisällä sekä huoneilman lämpötila lujittumisaikana. Vaaka-akselin nollakohta on koesarjan ensimmäisen pilarin valuaajankohta. Käyrien symbolit: d = pilari 30, e = pilari 25, f = pilari 20 ja i = huoneilma.

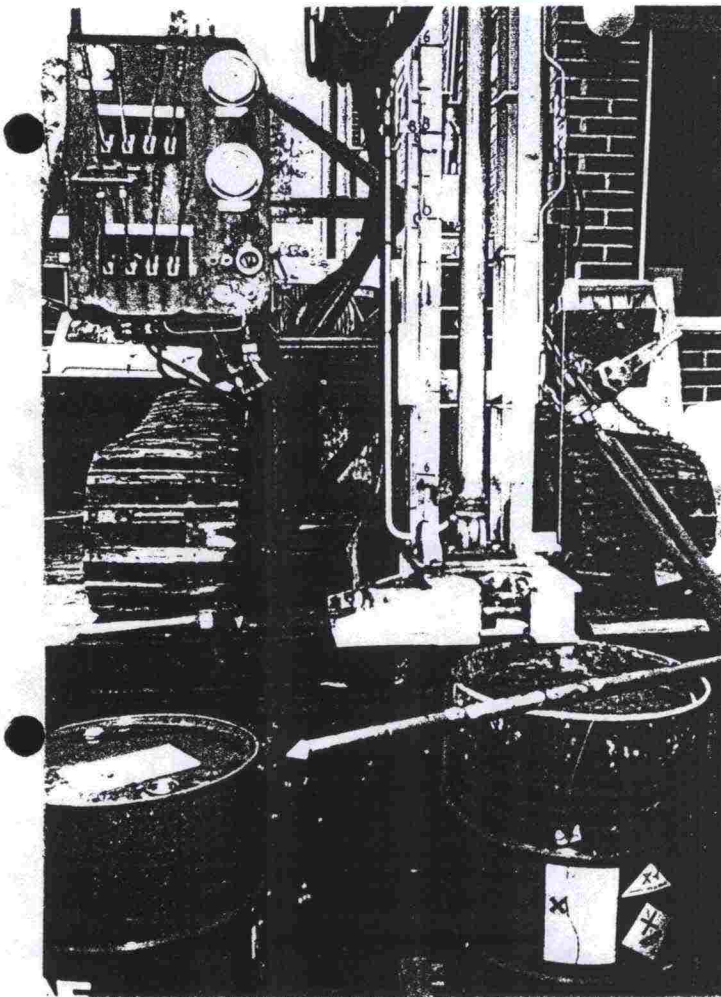
Kun lämpötilatietoja purettiin mittalaitteesta tietokoneelle, pilarin 30 ensimmäisten vuorokausien tiedot valitettavasti katosivat. Pilarien 25 ja 20 lämpötilakäyrät ovat aivan saman muotoisia kuin koesarjan 1 pilareilla. Huoneilman keskimääräinen lämpötila lujittumisaikana oli selvästi koesarjan 1 vastaavaa arvoa alhaisempi: 18,8 °C.

7 TUTKIMUSTEN SUORITTAMINEN

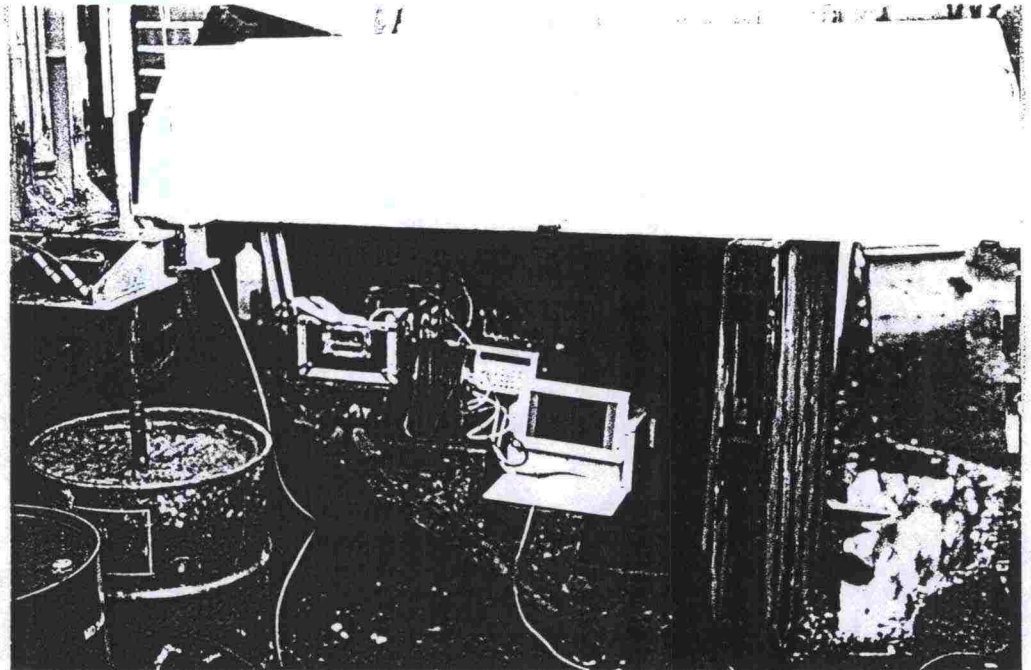
7.1 Koesarja 1

7.1.1 CPT-kairaukse

28 vuorokauden lujittumisen jälkeen koepilarit siirrettiin VTT Yhdyskuntatekniikan Tie- ja geotekniikan laboratorion takapihalla sijaitsevan lastauslaiturin viereen. Monitoimikaira IGT1200 oli ajettu ennalta laiturin päälle ja ankkuroitu vahvoilla liinoilla kiinni laiturisiin. *Kuvat 25 ja 26* esittävät kairausjärjestelyjä.

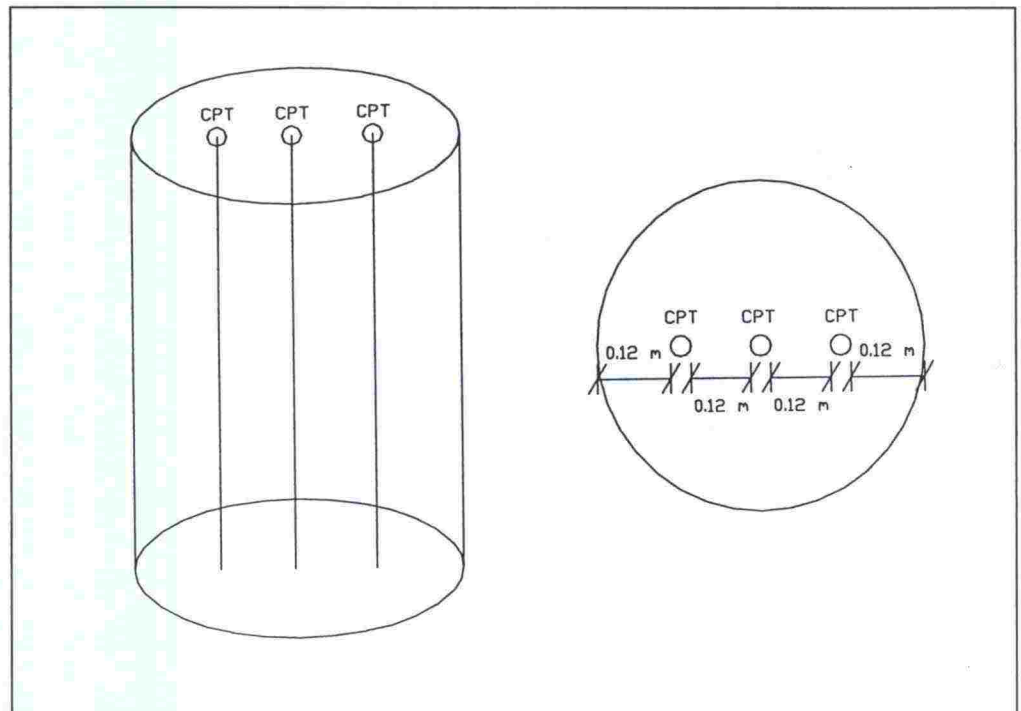


Kuva 25. Kairausjärjestelyt. Oikeanpuoleinen tynnyri on kairattava koepilari, vasemmanpuoleinen auttaa kairamiestä ylettymään säätövipuihin.



Kuva 26. Kairausjärjestelyt. Mittalaite ja tietokone suojattiin sateelta peräkärryn suojakuomulla.

Kukin koepilari kairattiin kuvan 27 mukaisesti kolmesta kohdasta.



Kuva 27. CPT-kairausten sijainti tynnyrissä.

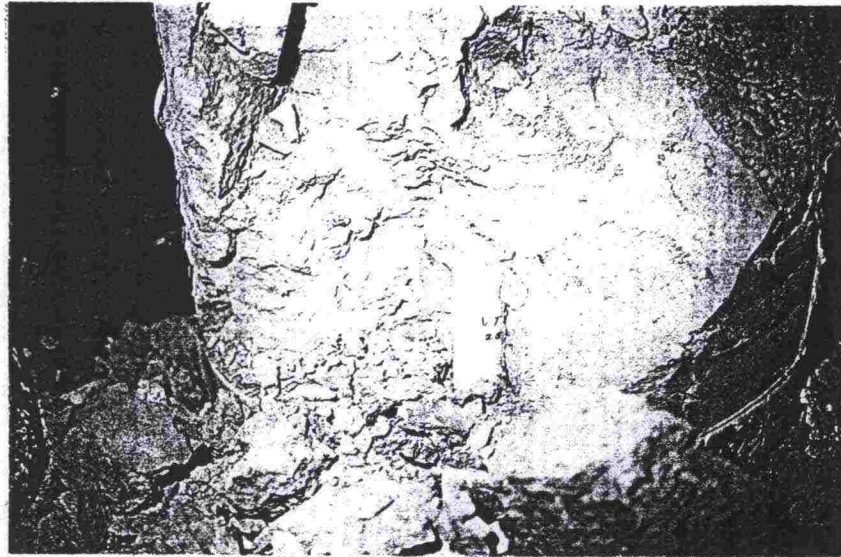
Kairaukset tehtiin järjestyksessä vasen-oikea-keskimmäinen. Ensimmäisenä oli kairausvuorossa koepilari 50 eli eniten sideainetta sisältävä ja näin ollen lujin pilari. Pilari 50 olikin niin luja, että CPT-kairan kapasiteetti oli loppua kesken. Ensimmäisen kairauksen aikana koko laituri monitoimikairoineen kaikkineen nousi muutaman sentin ilmaan. Kairan ylös nostaminen oli hyvin hankalaa, mutta onnistui loppujen lopuksi. Toinen kairaus onnistui ensimmäistä paremmin: kairausnopeus oli tasaisempi eikä laituri tällä kertaa liikkunut – tosin kaira tunkeutui melko vinoon. Kairaa ei millään keinolla saatu vedettyä ylös pilarista, vaan pilari oli rikottava kairan ympäriltä. Tästä syystä pilarista 50 tehtiin vain kaksi kairausta aiotun kolmen sijasta.

Tynnyreitä säilytettiin niiden kuljettamisen mahdollistamiseksi kuormalavojen päällä. Pilarin 40 ensimmäisen kairauksen aikana huomattiin, että ennen kairausta pilari on nostettava pois lavalta. Pilarin 40 alla oli muita heiveröisempi kuormalava, joka antoi kairattaessa periksi ja aiheutti kairan työntymisen vinoon. Lisäksi tynnyri pääsi lavan päällä välillä hieman heilahamaan kairan siihen tunkeutuessa. Pilarin 50 alla oli niin paljon tukevampi lava, ettei pilari 50 päässyt selkeästi heilahtelemaan kairattaessa, mutta varmasti tämäkin lava antoi paikoitellen periksi tynnyrin alla. Kuormalava lienee syy kärkivastuksen suurehkoon, teräväpiirteiseen vaihteluun pilarin 50 molemmissa ja pilarin 40 ensimmäisessä kairauksessa. Muut kairaukset tehtiin niin, että pilari oli tukevasti maata vasten.

Kairausnopeudet vaihtelivat kahdessa ensimmäisessä pilarissa aika paljon ja kairausnopeus oli hitaampaa kuin standardi edellyttäisi. Kokemus näin lujan materiaalin kairaamisesta karttui koko ajan, ja pilarien 30 ja 15 kairaukset sujuivat jo suuremmitta ongelmitta. Kaira tunkeutui massaan melko suoraan ja kairausnopeus oli tasainen ja pysyi puristinkairausstandardissa sallitun vaihteluvälin sisällä.

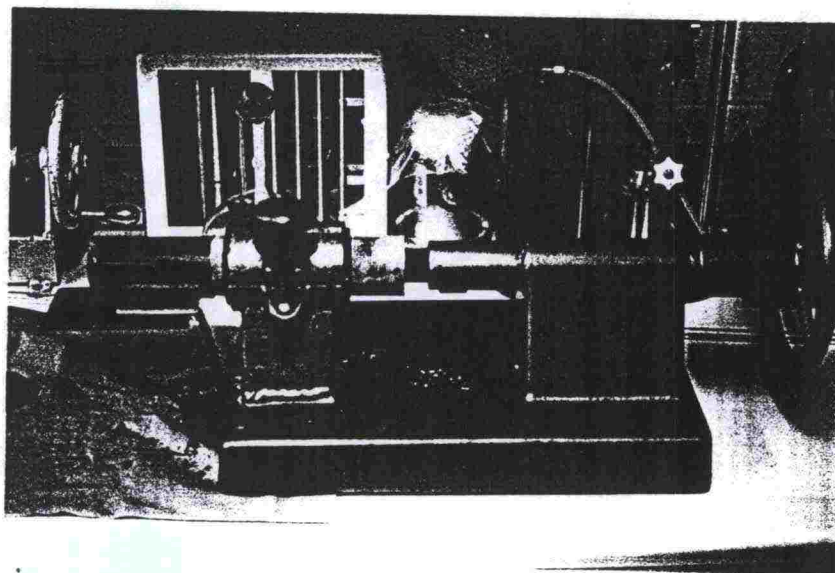
7.1.2 Näytteiden otto

Kuten luvussa 6 on kerrottu, koesarjassa 1 massaan painettiin valmistusvaiheessa kolme näyteliieriötä eri syvyyksille (*kuva 16*). Kun pilari oli kairattu, tynnyri leikattiin sivusta auki ja pilari rikottiin – lieriöiden lähellä varovaisesti – rautakangella. Pilarit lohkesivat kangella lyötäessä muutaman nyrkin kokoisiksi palasiksi, joiden seasta lieriöt oli helppo ottaa (*kuva 28*).



Kuva 28. Näyteliön ottaminen rikutusta pilarista.

Laboratoriossa niin pilarista otetut kuin rinnakkaisnäyteliötkin tyhjennettiin ulostyöntäjän avulla (kuva 29).



Kuva 29. Näytteen työntäminen ulos lieriöstä.

Kolmiaksaali- ja puristuskokeissa pyrittiin käyttämään 100 mm korkuisia näytteitä ($d = 50$ mm). Näytteet olivat niin kovia, että ne katkaistiin rautasahalla ja päät tasoitettiin puukolla. Kuitenkin näytteet olivat myös hauraita, joten niitä piti käsitellä varoen ja muutaman kerran näyte lyheni pari senttiä aiotusta kymmenestä, koska näytteestä lohkesi pala päätä tasoitettaessa.

Pilareista otetut näytteet olivat selkeästi paremman näköisiä kuin rinnakkaisnäytteet, kuten kuvista 30 ja 31 nähdään.



Kuva 30. Esimerkki pilarista otetusta näytteestä.



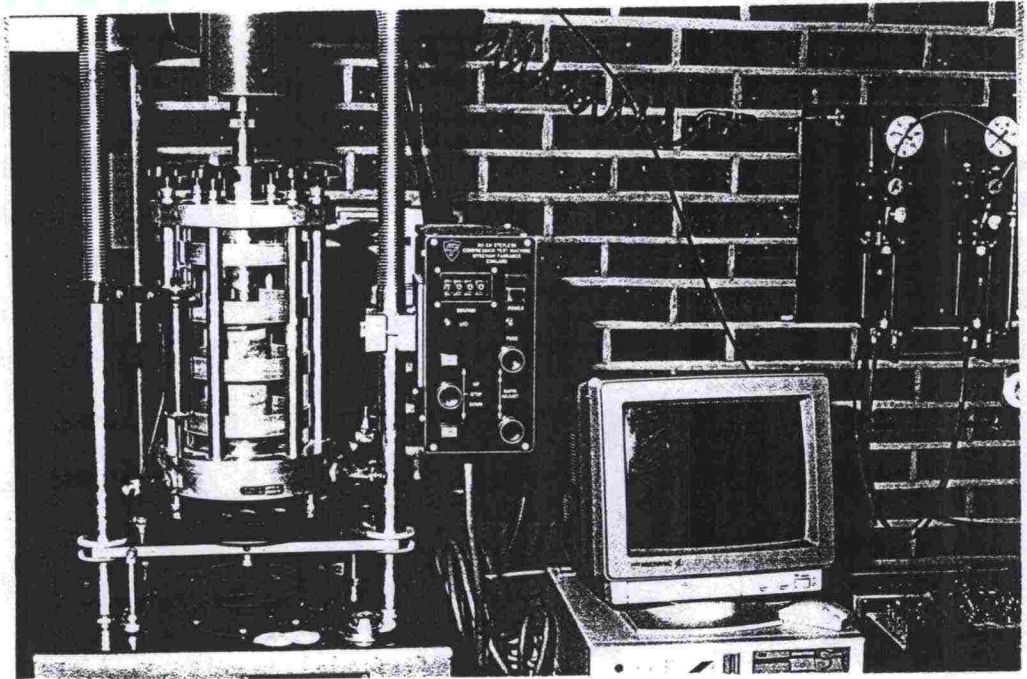
Kuva 31. Esimerkki rinnakkaisnäytteestä.

Kustakin massasta oli käytettävissä kolme pilarista otettua näytettä ja neljä rinnakkaisnäytettä. Kunkin massan rinnakkaisnäytteistä kolme käytettiin kolmiakσιαalikoesarjaan ja yksi rinnakkaisnäyte puristettiin yksiakσιαalisesti. Pilarista otetut kolme näytettä puristettiin yksiakσιαalisesti.

Laboratoriokokeet tehtiin kairauksen kanssa samana päivänä, jotta pilari ja näytteet saivat lujittua saman ajan: aamupäivällä kairattiin ja iltapäivällä tehtiin laboratoriokokeet.

7.1.3 Kolmiakσιαalikokeet

Kolmiakσιαalikokeissa käytettiin rinnakkaisnäytteitä. Kullakin massalla tehtiin kolmen eri sivupaineen kolmiakσιαalikoesarja. Sellipaineiksi valittiin 30, 60 ja 120 kPa eli sellaiset arvot, jotka ovat realistisia maassa syvästabiloidun pilarin ympärillä. Kolmiakσιαalikokeet tehtiin konsolidoimattomina, avoimina, muodonmuutosohjattuina kokeina, joissa näytteen päistä mitattu muodonmuutosnopeus oli 1 % / min. Koelaitteistolla ei ollut mahdollista mitata todellista leikkautumispinnan alaa, vaan pinta-ala on saatu laske-
malla näytteen tilavuuden ja korkeuden osamäärä. Kolmiakσιαalikoe-
laitteisto on esitetty kuvassa 32.



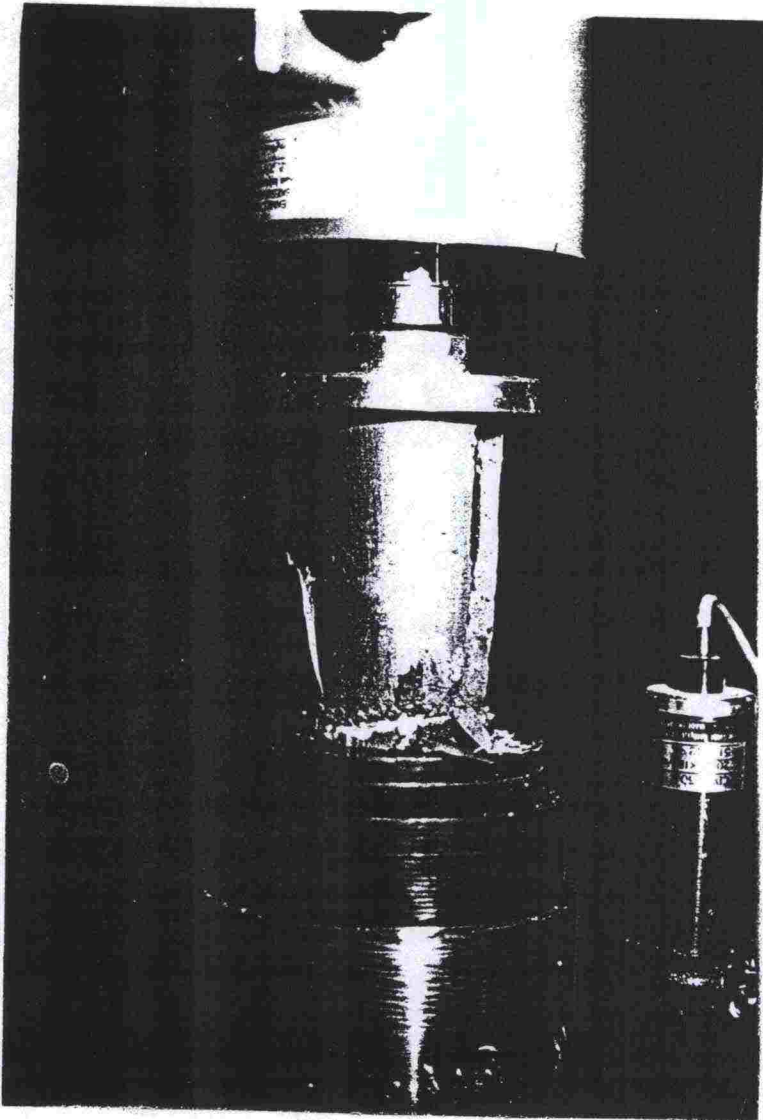
Kuva 32. Kolmiaksaalikoelaitteisto.

Rinnakkaisnäytteet olivat kovin huonokuntoisia (ks. kuva 31). Kaikissa näytteissä oli massan ja näytelieriön väliin jäänyt runsaasti ilmakuplia, jotka sitten näkyivät näytteissä epätasaisina koloina. Kaikkien näytteiden päistä ei saatu aivan tasaisia ja muutama näyte oli jopa halki vaakasuuntaan. Kaikesta huolimatta kolmiaksaalikokeet tehtiin.

Suurimmassa osassa kolmiaksaalikokeita näyte leikkautui vinosti niin kuin sen teoriassa pitääkin. Aika usein näyte kuitenkin murtui puristumalla kasaan ja pullistumalla keskeltä.

7.1.4 Puristuskokeet

Kolmiaksaalikokeiden jälkeen tehtiin puristuskokeet. Myös puristuskokeissa käytettiin muodonmuutosnopeutena 1 % / min. Kuormituslaitteisto oli sama kuin kolmiaksaalikokeissa, nyt tosin ilman selliä. *Kuvassa 33* on puristuskoe käynnissä.

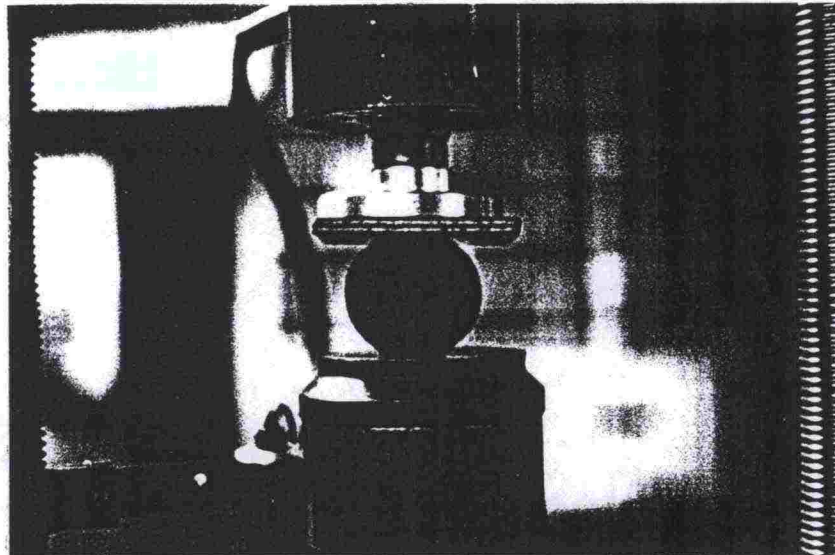


Kuva 33. Puristuskoee.

Kuvassa 33 näkyy tavallinen puristuskokeen lopputulos: lähes kaikissa yksiaksaalisesti puristetuissa näytteissä murtuminen näkyi pystyhalkeamina.

7.1.5 Brasilia-vetokokeet

Koska näytelieriöt olivat 170 mm korkeita ja kolmiaksaali- ja puristuskokeisiin käytettiin kustakin lieriöstä vain noin 100 mm, päätettiin ylimääräisillä palasilla tehdä Brasilia-vetokokeet. Brasilia-kokeessa sylinterimäinen näyte, jonka korkeus on suunnilleen yhtä suuri kuin halkaisija, asetetaan makuuasentoon kuvan 34 mukaisesti. Kuormitettaessa näyte halkeaa ja tuloksista voidaan laskea materiaalin halkaisuvetolujuus.



Kuva 34. Brasilia-vetokoe.

Lähes kaikki näytteet halkesivat keskeltä kahtia (*kuva 34*), kuten niiden teorian mukaan pitikin tehdä. Brasilia-koe on hyvin yksinkertainen ja nopea koe.

7.1.6 Muut tutkimukset

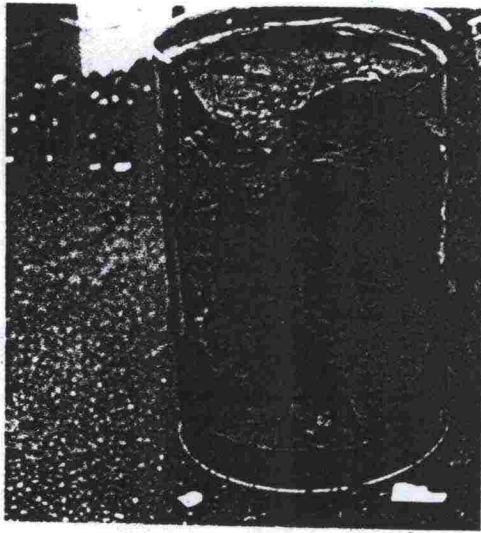
Kustakin massasta otettiin heti sekoituksen jälkeen näyte laboratoriokokeita varten. Tuoreesta massasta määritettiin märkätilavuuspaino γ , vesipitoisuus w , juoksuraja w_L , plastisuusraja w_p sekä kartioleikkauslujuus s_k .

Lujittuneista massoista selvitettiin märkätilavuuspainot ja vesipitoisuudet.

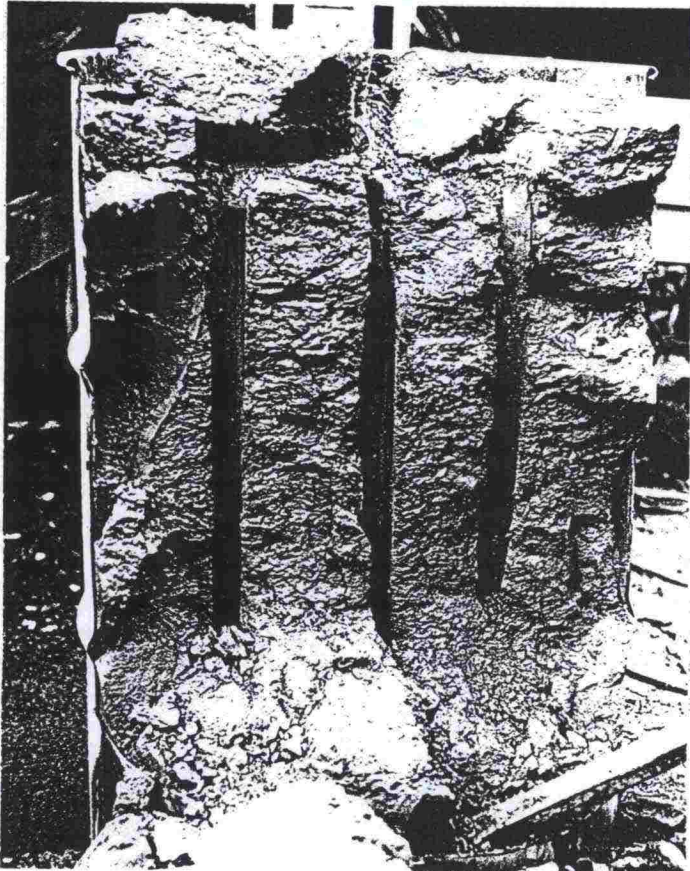
7.2 Koesarja 2

7.2.1 CPT-kairaukset

Koesarjan 2 pilarit siirrettiin 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen samaan paikkaan kairauksia varten kuin ensimmäisessäkin koesarjassa. Erona koesarjan 1 kairauksiin oli se, että kunkin pilarin pintaan tehtiin nyt alkureiät. Kairauskohtaan tehtiin käsiporalla reikä, jonka halkaisija oli noin 30 mm ja syvyys 50 ... 60 mm. Koesarjassa 1 oli havaittu, että kairan kärki hetken aikaa ensin haki kohtaa, josta sitten alkoi tunkeutua pilariin ja tästä johtuen kairaus usein meni jonkin verran vinoon (*kuva 35*) – yhden kerran jopa niin vinoon, että kärki tuli tynnyrin reunasta ulos noin 0,5 metrin syvyydessä. Alku- eli ohjausreikien ansiosta nämä ongelmat vältettiin koesarjassa 2: kairareiät olivat erinomaisen suoria (*kuva 36*).



Kuva 35. Esimerkki koesarjan 1 vinosta kairauksesta. Nuolella osoitetussa kohdassa kairan kärki tuli tynnyrin reunan läpi.

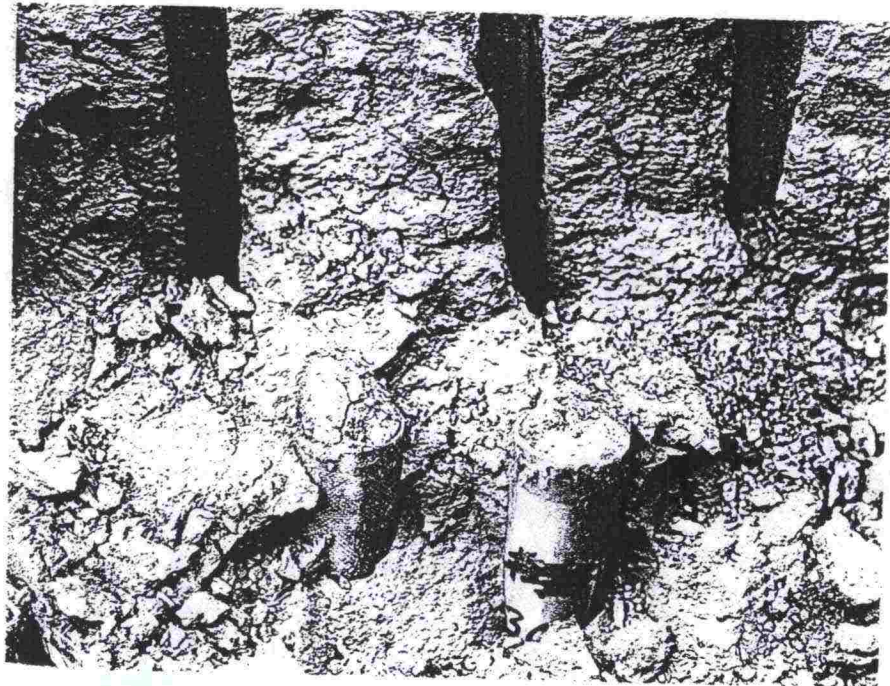


Kuva 36. Koesarjan 2 kairaukset olivat suoria.

Koesarjan 1 havaintojen perusteella kairaukset tehtiin nyt järjestyksessä keskimäinen-vasen-oikea. Kairausnopeus oli sarjan 2 pilareissa tasainen ja pysyi puristinkairausstandardissa sallitun vaihteluvälin (20 ± 5 mm/s) sisällä.

7.2.2 Näytteiden otto

Koesarjan 1 kokemusten perusteella sarjassa 2 kuhunkin tynnyriin laitettiin 12 näytelieriötä *kuvan 23* mukaisesti. Samaan tapaan kuin koesarjassa 1 tynnyri leikattiin CPT-kirauksen jälkeen sivusta auki, pilari rikottiin rautakangella ja näytelieriöt otettiin talteen (*kuva 37*).



Kuva 37. Näytelieriöiden irrottaminen pilarista.

7.2.3 Kolmiaksaalikokeet

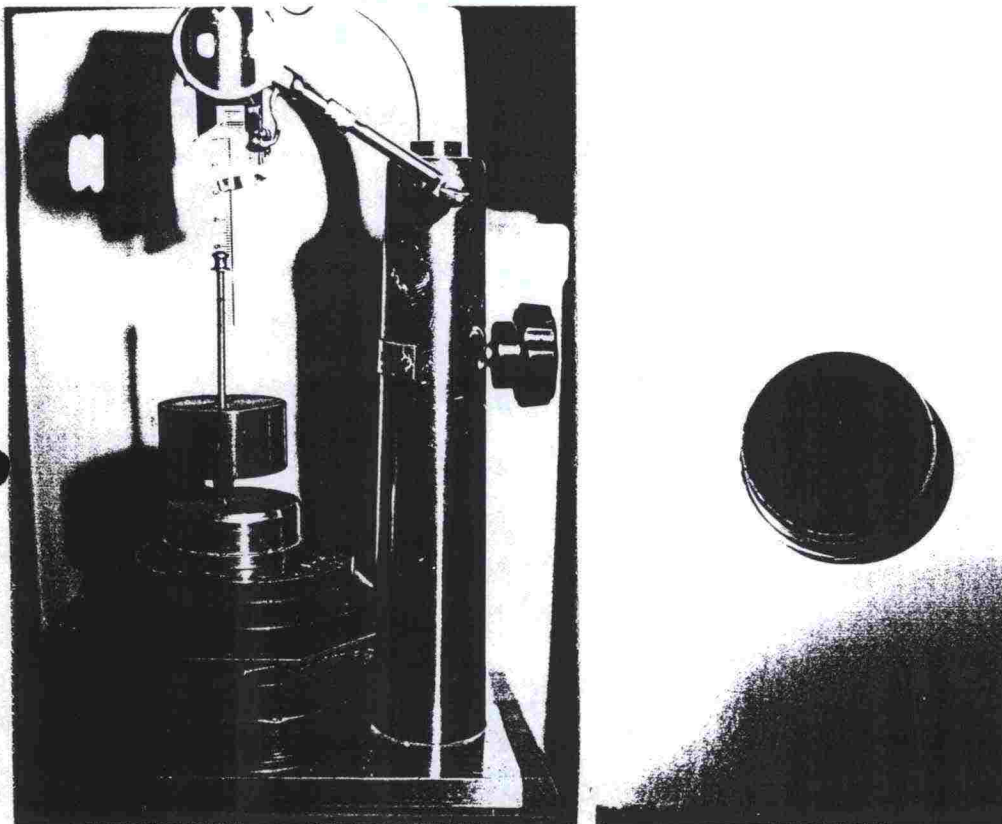
Käytettävissä olleista 12 näytteestä neljä käytettiin kolmiaksaalikokeisiin. Sellipaineina käytettiin 30, 60, 120 ja 150 kPa. Koesarjan 1 tapaan kolmiaksaalikokeet tehtiin nytkin konsolidoimattomina, avoimina, muodonmuutosohjattuina (1 % / min) kokeina. Kuten ensimmäisessäkin koesarjassa, näytteet yleensä murtuivat vinoa leikkauspintaa pitkin tai puristamalla kasaan.

7.2.4 Puristuskokeet

Loput kahdeksan näytettä puristettiin yksiakiaalisesti muodonmuutosnopeudella 1 % / min. Murtuminen ilmeni joko pystyhalkeamina tai näytteen puristumisena kasaan.

7.2.5 Sovelletut kartiokokeet

Kolmiakiaali- ja puristuskokeista yli jääneille näytteenpalasille päätettiin koesarjassa 2 tehdä "sovellettu kartiokoe". Tavallinen kartiokoe ei näin lujalle massalle sovellu, sillä painavimmankin kartion painuma on vain muutamia millimetrejä. "Sovelletussa kartiokokeessa" 400 gramman (kärkikulma 30°) kartio pudotettiin 50, 35 ja 20 mm korkeudelta näytteen yläpuolelta (kuva 38). Näin saatiin tulokset, joissa kartion painuma oli selvästi eri suuruinen ensinnäkin eri massoissa ja toiseksi myös eri pudotuskorkeuksilla.



Kuva 38. "Sovellettu kartiokoe".

Kartiokokeessa käytettiin näytettä, jonka halkaisija oli 50 mm ja korkeus 20 mm. Tavallisen kartiokokeen mukaisesti kartio pudotettiin viisi kertaa yhteen näytteeseen (kuva 38). Tuloksista suurin ja pienin jätettiin huomiotta ja lopuista laskettiin keskiarvo.

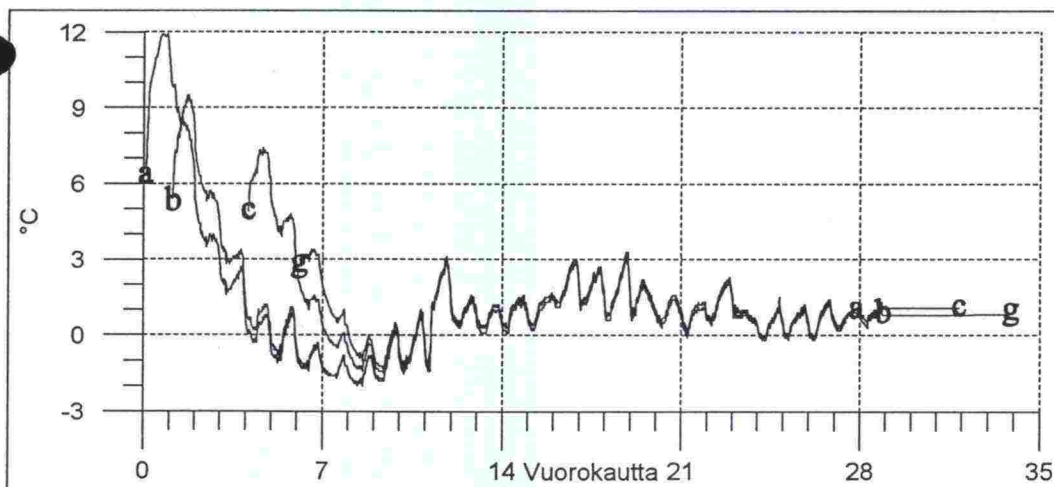
7.2.6 Muut tutkimukset

Koesarjassa 2 tuoreista ja lujittuneista massoista määritettiin samat parametrit kuin koesarjassa 1: tuoreista γ , w , w_L , w_p ja s_k sekä lujittuneista γ ja w .

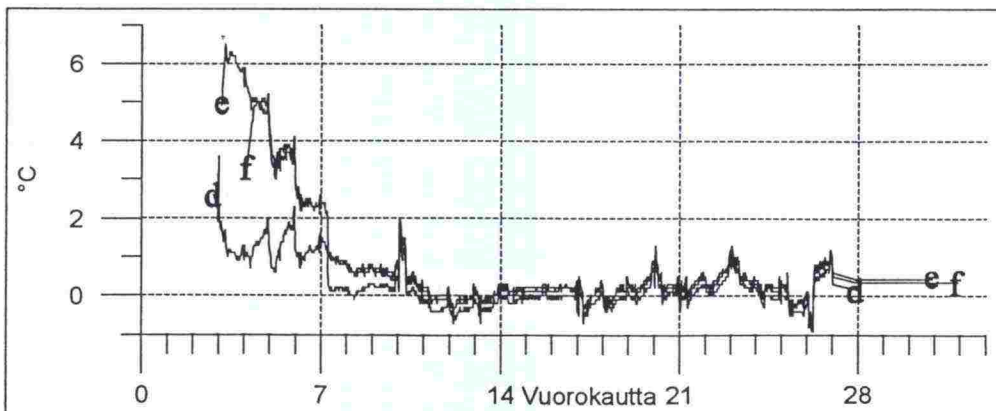
8 TUTKIMUSTEN TULOKSET

8.1 Lujittumisen aikaiset lämpötilat

Mittalaite tallensi lujittumisaikana lämpötilat pilarien sisällä sekä ympäröivän huoneilman lämpötilan puolen tunnin välein. Kuvassa 39 on esitetty koesarjan 1 osalta kunkin pilarin sisälämpötilan ja huoneilman lämpötilan erotus ajan funktiona. Koesarjan 2 vastaavat käyrät on esitetty kuvassa 40. Kaksi viimeksi kairattua pilaria irrotettiin lämpötilamittarista muutamaa päivää ennen kairausta ja jäljelle jääneiden lujittumispäivien lämpötilakehitys on arvioitu edellisten päivien keskimääräiselle tasolle (vaakasuorat viivat kuvien 39 ja 40 oikeassa laidassa).



Kuva 39. Koesarja 1: pilarin sisältä mitatun lämpötilan ja huoneilman lämpötilan erotuksen muuttuminen pilarin lujittumisaikana. Vaaka-akselin nollakohta on koesarjan ensimmäisen pilarin valuaajankohta. Käyrien symbolit: a = pilari 50, b = pilari 40, c = pilari 30 ja g = pilari 15.



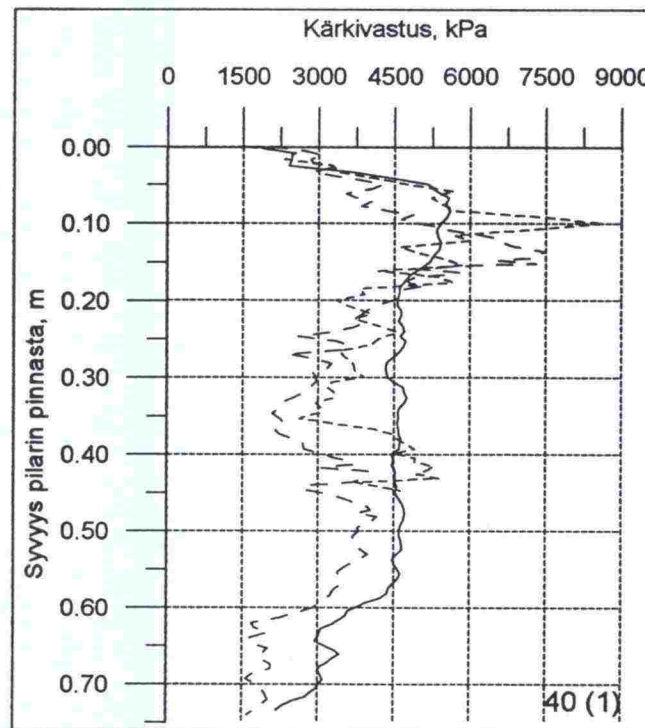
Kuva 40. Koesarja 2: pilarin sisältä mitatun lämpötilan ja huoneilman lämpötilan erotuksen muuttuminen pilarin lujittumisaikana. Vaaka-akselin nollakohta on

koesarjan ensimmäisen pilarin valuajankohta. Käyrien symbolit: d = pilari 30, e = pilari 25 ja f = pilari 20.

Kuvien 39 ja 40 käyrien teräväpiirteinen ylös-alas-poukkoilu johtuu huoneilman lämpötilan muuttumisesta vuorokaudenajan mukaan; pilarien sisällä lämpötilan muuttuminen oli tasaista (ks. kuva 22 ja kuva 24). Pilarien sisälämpötila kävi välillä jopa huoneilman lämpötilan alapuolella: kun sää nopeasti hieman kylmeni, pilarien sisälämpötilat reagoivat muutokseen huonelämpötilaa hitaammin.

8.2 CPT-kairaukset

Kärki- ja vaippavastusdiagrammien perusteella pääteltiin, että kunkin pilarin keskimäinen kairaus kuvaa todenmukaisesti pilarin lujuutta. Syy tähän on reunavaikutus: laitimmaisissa kairauksissa kairan kärki on alas tunkeutuessaan lohkaissut pilarista palan tynnyrin reunaan päin ja päässyt näin tunkeutumaan jonkin matkaa pienemmällä vastuksella kuin ennen lohkeamista. Sitten kärkivastus taas hetken kasvaa, kunnes on lohjennut uusi pala ja kärki on jälleen tunkeutunut alas aiempaa helpommin. Keskimäisessä kairauksessa ei tätä reunavaikutusta ole päässyt syntymään ja kärkivastus on yleensä laitimmaisista kairauksista isompi ja tasaisempi (kuva 41). Liitteessä 2 on esitetty kaikkien tehtyjen puristinkairausten kärkivastukset.



Kuva 41. Pilarin 40 CPT-kairausten kärkivastukset. Yhtenäinen viiva kuvaa keskimäistä kairauksista, katkoviivat laitimmaisista.

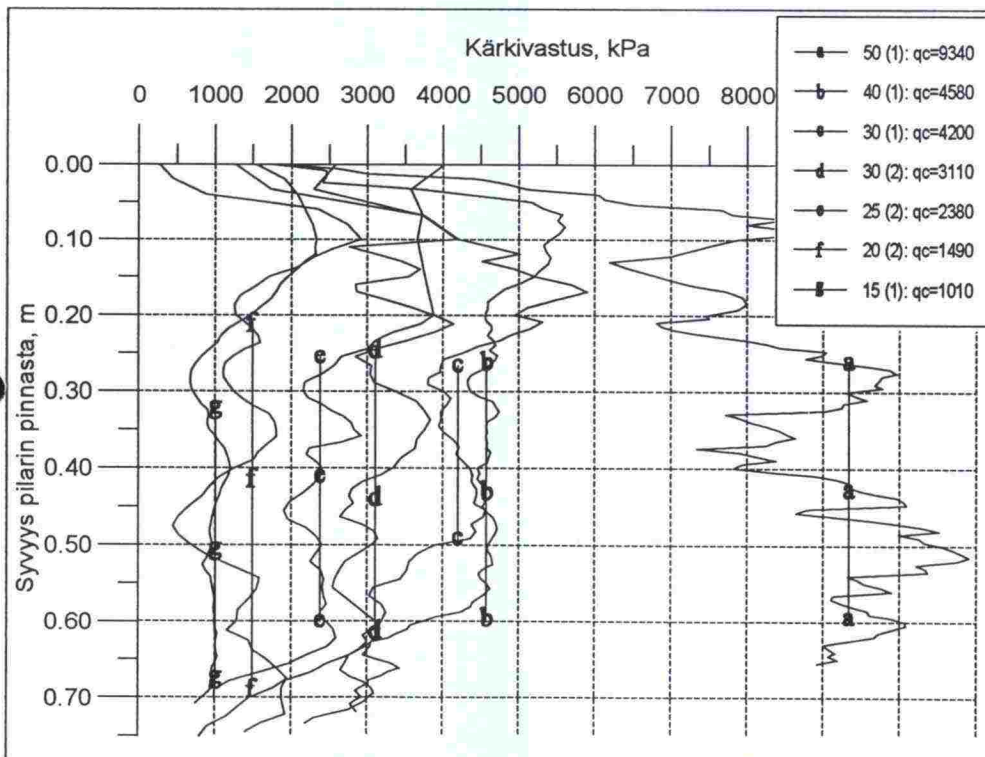
Kuviin 42 ja 43 on piirretty eri pilarien keskeltä tehtyjen CPT-kairausten kärkivastus- ja vaippavastusdiagrammit. Eri pilarien kuvaajat ovat toistensa

kaltaisia: vähän yli 0,2 m syvyyteen saakka kärkivastus saa kovin suuria arvoja ja vaippavastus kasvaa suunnilleen lineaarisesti. Tämän jälkeen niin vaippa- kuin kärkivastusarvotkin tasaantuvat, kunnes noin syvyydellä 0,6 m kärkivastuskuvaaja laskee jyrkästi. Niinpä pilarin keskiosan on katsottu myös pystysuunnassa kuvaavan parhaiten pilarin todellista lujuutta.

Pintakerros on saattanut lujittua hieman muuta pilaria paremmin, mutta vaikutusta lienee silläkin, että alussa kairausnopeus ei ollut heti oikea ja sillä, että koesarjassa 1 kairauksen alussa kairan kärki joutui pitkään hakemaan kohtaa, josta se sitten lähti tunkeutumaan pilariin. Syvemmällä pilarissa kärkivastuksen arvot ovat lähempänä totuutta, kun kairaus on ollut todellista, tasavauhtista puristinkairauستا.

Pilarin pohjassa noin 0,15 m matkalla kärkivastus laskee selvästi alaspäin. Voi olla, että pilarien alapääät ovat lujittuneet jostain syystä muuta pilaria huonommin. Kuitenkin todennäköisempää on se, että kairauksen lopussa kärki on lohkaissut palan tai useampia paloja pohjaan päin ja päässyt näin tunkeutumaan aikaisempaa helpommin (vertaa tämän luvun ensimmäiseen kappaleeseen: reunavaikutukset).

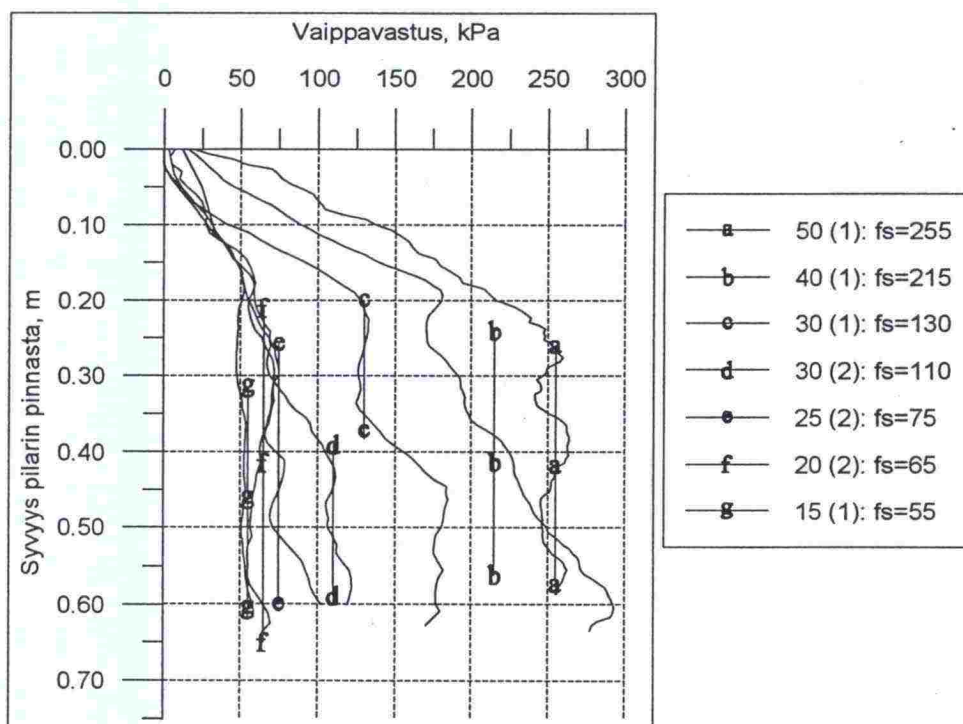
Laboratoriokokeissa ei ollut havaittavissa eroa pilarin ylä-, keski ja alaosan lujuuksissa.



Kuva 42. Eri pilarien keskimmäisten kairauksen kärkivastuskuvaajat. Kirjaimella a ... g merkitty pystysuora viiva kuvaa kairauksen keskiosalle laskettua $q_{c:n}$ keskiarvoa. Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Pystyviiva on piirretty nimenomaan sille syvyyvälille, jolta keskiarvo on laskettu.

Koesarjan 1 pilareiden 50 ja 30 keskimmäisten kairauksen kärkivastukset ovat selvästi suurempia kuin muiden pilarien perusteella voisi olettaa. Tätä ehkä selittää se, että juuri näissä kairauksissa kaira tunkeutui pilariin melko vinosti. Kummassakin pilarissa vain yksi kairaus antoi erityisen suuria kärkivastuksen arvoja (ks. taulukko 7 ja liite 2).

Vaippavastustietoja tulkittaessa on otettu huomioon se, että vaippavastus mitataan VTT:n puristinkairassa noin 0,1 m ylempää kuin kärkivastus.



Kuva 43. Eri pilarien keskimmäisten kairauksen vaippavastuskuvaajat. Kirjaimella a ... g merkitty pystysuora viiva kuvaa kairauksen keskiosalle laskettua f_s :n keskiarvoa. Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Pystyviiva on piirretty nimenomaan sille syvyysvälille, jolta keskiarvo on laskettu.

Taulukoihin 7 ja 8 on koottu kaikkien tehtyjen kairauksen keskimääräiset kärki- ja vaippavastusarvot.

Taulukko 7. Puristinkairauksen keskimääräiset kärkivastusarvot (kPa) (ks. kuva 42). Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Luotettavimmaksi katsotun kairauksen arvot on esitetty ilman sulkuja, muut arvot suluissa.

	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
Vasen	(1250)	1490	-	(1980)	(1680)	(3600)	(1990)
Keskimmäinen	1010	(1540)	2380	3110	4200	4580	-
Oikea	(620)	(1240)	(2350)	(3190)	(2440)	(3190)	9340

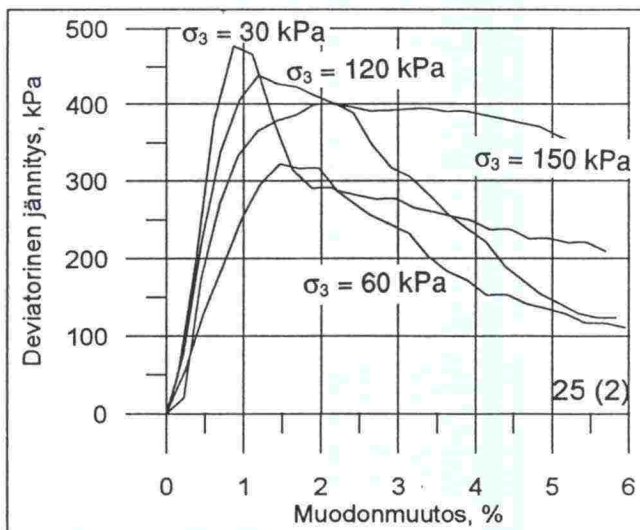
Taulukko 8. Puristinkairauksen keskimääräiset vaippavastusarvot (kPa) (ks. kuva 43). Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Luotettavimmaksi katsotun kairauksen arvot on esitetty ilman sulkuja, muut arvot suluissa.

	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
Vasen	(40)	65	-	(115)	(115)	(55)	(180)
Keskimmäinen	55	(60)	75	110	130	215	-
Oikea	(45)	(60)	(100)	(120)	(110)	(210)	255

Pilarin keskeltä tehty kairaus on katsottu luotettavimmaksi ja muiden kairauksen tulokset on merkitty sulkuihin. Pilarissa 20 (koesarja 2) keskimääräisessä kairauksessa saatiin taltioitua vain viimeisten parinkymmenen sentin arvot, joten toinen laitimmaisista kairauksista on valittu luotettavimmaksi. Pilarissa 50 (koesarja 1) voitiin tehdä vain kaksi kairauksista (laitimmaisista) ja näistä suurempia arvoja antanut on valittu edustavimmaksi.

8.3 Kolmiaksaalikokeet

Kuvassa 44 on esimerkki kolmiaksaalikokeen tuloksesta: suurimmassa osassa kolmiaksaalikoesarjoja kävi niin, että sellipaineen lisäys ei suurentanut deviatorisen jännityksen ($\sigma_1 - \sigma_3$) maksimia.



Kuva 44. Pilarin 25 (koesarja 2) kolmiaksaalikokeet.

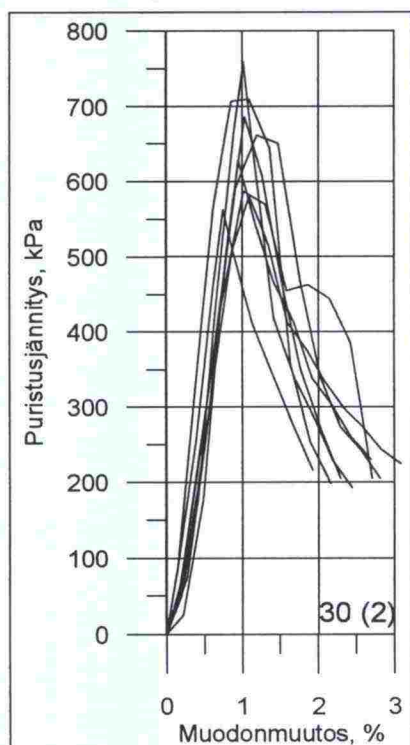
Kolmiaksaalikokeet siis epäonnistuivat. Koesarjan 1 kohdalla syy epäonnistumiseen on melko selvä; kolmiaksaalikokeet tehtiin huonokuntoisilla rinnakkaisnäytteillä. Koesarjassa 2 kolmiaksaalikokeissa käytettiin pilarista otettuja näytteitä ja näytteiden laatu oli parempi kuin koesarjassa 1. Epäonnistumisen syy lieneekin näytteiden päiden tasaamisessa. Tutkittava materiaali oli kovaa, mutta haurasta. Näytteiden päät tasoitettiin rautasahalla ja puukolla eikä päistä saatu absoluuttisen tasaisia ja kohtisuoria näytteen pystyakselia vastaan.

Kolmiakksiaalikoeteissa ilmeisesti kävi niin, että näytteen laatu ja sen päiden epätasaisuus vaikuttivat puristusjännityksen maksimiin usein enemmän kuin sellipaine. Sama tasaamisongelma koski tietenkin myös puristuskokeita, mutta koska puristuskokeita tehtiin enemmän, huonot tai huonosti tasatut näytteet oli mahdollista erottaa tuloksista.

Kaikkien tehtyjen kolmiakksiaalikoeteiden tulokset (deviatorinen jännitys - muodonmuutos -kuvaajat) on esitetty liitteessä 3.

8.4 Puristuskokeet

Puristuskokeista saatiin selvästi luotettavammampia ja johdonmukaisempia tuloksia kuin kolmiakksiaalikoeteista. *Kuvassa 45* on esimerkki puristuskokeen tuloksesta.



Kuva 45. Pilarin 30 (koesarja 2) puristuskokeet.

Kaikkien tehtyjen puristuskokeiden tulokset (puristusjännitys - muodonmuutos -kuvaajat) on esitetty liitteessä 4. Puristuskokeista saadut puristuslujuudet ja kimmomoduulit on esitetty *taulukossa 9* ja *10*. *Taulukoiden 9* ja *10* keskimääräisten arvojen perusteella on piirretty kaavamainen yhteenvetokuva (*kuva 46*) eri massojen puristuskokeista.

Taulukko 9. Pilareista otettujen näytteiden puristuslujuudet eli puristuskokeiden maksimipuristusjännitykset (kPa). Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Epäluotettaviksi katsotut tulokset (huono näyte tms.) on merkitty sulkuihin.

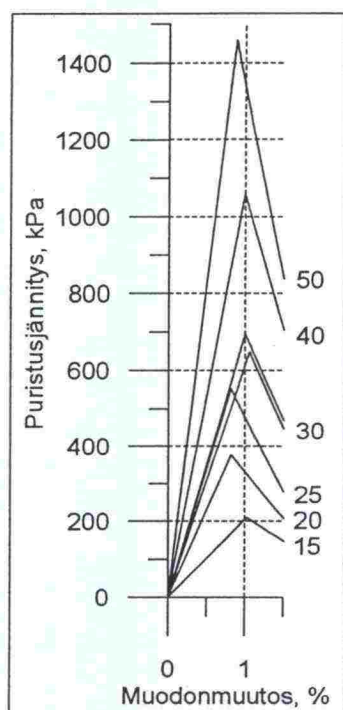
	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
Keskiarvo ("hyvät")	210	375	550	645	695	1060	1455
Keskihajonta ("hyvät")	55	25	85	70	17	40	50
	(140)	390	520	760	710	(655)	1420
	170	335	(330)	630	685	1090	1490
	250	360	(305)	660	(540)	1035	(950)
		390	575	710			
		400	(360)	685			
		(285)	665	585			
		(300)	570	560			
		385	430	580			
Keskiarvo (kaikki)	(185)	(355)	(470)	(645)	(645)	(925)	(1315)
Keskihajonta (kaikki)	(55)	(45)	(130)	(70)	(92)	(235)	(245)

Kaikkien näytteiden maksimipuristusjännityksistä lasketut keskihajonnat ovat suuria, mutta "hyvien" – taulukossa 9 sulkeisiin merkitsemättömien – tulosten keskihajonnat ovat jo melko pieniä. Näytteen leikkauslujuus saadaan jakamalla puristuslujuus kahdella.

Taulukko 10. Pilareista otettujen näytteiden puristuskokeiden kimmomoduulit E_{50} (kPa). Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Epäluotettaviksi katsotut tulokset (huono näyte tms.) on merkitty sulkuihin.

	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
Keskiarvo ("hyvät")	20400	45800	67700	61300	69400	106400	162600
Keskihajonta ("hyvät")	2100	8600	8900	11900	6300	17200	1000
	(25100)	42700	51800	62900	73900	(46800)	166300
	18900	34700	(53500)	51400	65000	118600	165000
	21900	50300	(55700)	57900	(49700)	94300	(133300)
		59300	70900	87200			
		40700	(52900)	55400			
		(32400)	73300	56800			
		(44900)	70700	67100			
		47400	71800	52000			
Keskiarvo (kaikki)	(22000)	(44000)	(62600)	(61300)	(62900)	(86500)	(154900)
Keskihajonta (kaikki)	(3100)	(8600)	(9800)	(11900)	(12200)	(36500)	(18900)

Kimmomoduulien kohdalla on samat näytteet merkitty sulkuihin kuin puristuslujuuksissa. Nytkin hyviksi katsottujen näytteiden tulosten keskihajonta on pienempi kuin kaikkien tulosten keskihajonta. Ero ei kuitenkaan ole yhtä selvä kuin puristuslujuuksissa.



Kuva 46. Eri massojen keskimääräiset puristuskoetulokset kaavamaisesti esitettynä.

8.5 Muut tutkimukset

8.5.1 Vesipitoisuus, tilavuuspaino yms.

Taulukkoon 11 on koottu tuoreista massoista tehtyjen määritysten tulokset.

Taulukko 11. Tuoreille massoille tehtyjen laboratorikokeiden tulokset. Vertailun vuoksi taulukossa esitetään myös stabiloimattoman saven vastaavat koetulokset. Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Kaksi oikeanpuoleisinta massaa tutkittiin noin tunnin kuluttua sekoituksesta; muut tuoreiden massojen kokeet tehtiin heti sekoituksen jälkeen.

	savi	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)	15 (1)	40 (1)
γ , kN/m ³	15,6	14,6	14,5	14,3	14,6	14,8	14,9	15,2	14,8	14,1
w, %	81,5	82,9	83,4	85,4	79,5	75,1	68,6	62,5	81,9	68,2
w _L , %	59,2	123,1	113,9	118,7	116,1	110,0	108,0	94,5		
w _p , %	30,8	58,6	47,7	48,9	40,0	43,6	45,5	34,4		
s _k , kN/m ²	8,6	10,6	10,8	8,3	11,1	10,6	14,9	13,4	22,1	58,5

Taulukosta 11 nähdään, että noin tunnin kuluttua sekoituksesta massan kartioleikkauslujuus oli jo noussut huomattavasti verrattuna heti sekoituksen jälkeiseen tilanteeseen.

Taulukkoa 11 tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että ennen sideaineen sekoittamista saveen lisättiin niin paljon vettä, että vesipitoisuus nousi tasan sataan prosenttiin.

Puristus-, kolmiaksaali- ja Brasilia-kokeisiin käytetyistä näytteistä laskettiin tilavuuspainot ja vesipitoisuudet (taulukko 12).

Taulukko 12. Lujittuneille massoille tehtyjen laboratoriokokeiden keskiarvot. Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15.

	15 (1)	20 (2)	25 (2)	30 (2)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
γ , kN/m ³	14,5	15,1	15,2	15,2	15,1	15,2	15,7
w, %	83,1	76,1	78,1	75,6	73,0	67,0	59,3

8.5.2 Brasilia-vetokokeet

Koesarjan 1 puristus- ja kolmiaksaalikokeista yli jääneillä näytteenpalasilla tehtiin Brasilia-halkaisuvetokokeet (taulukko 13).

Taulukko 13. Brasilia-vetokokeilla määritetyt halkaisuvetolujuudet (kPa). Merkintä 15 (1) tarkoittaa koesarjan 1 pilaria 15. Epäluotettaviksi katsotut tulokset (huono näyte tms.) on merkitty sulkuihin.

	15 (1)	30 (1)	40 (1)	50 (1)
Keskiarvo ("hyvät")	49	142	182	242
Keskihajonta ("hyvät")	9	33	11	43
Rinnakkaisnäyte	54	135	(138)	277
Rinnakkaisnäyte	(36)	111	177	187
Rinnakkaisnäyte	49	187	170	213
Rinnakkaisnäyte	62	114	(140)	(123)
Pilarista otettu näyte	43	166	184	291
Pilarista otettu näyte	39	(62)	196	240
Pilarista otettu näyte	(21)	(51)	(113)	(147)
Keskiarvo (kaikki)	(44)	(118)	(160)	(211)
Keskihajonta (kaikki)	(13)	(50)	(30)	(63)

Jokaisella massalla muutama koe epäonnistui (antoi huomattavasti muita pienemmän lujuuden), mutta onnistuneiden kokeiden Brasilia-vetolujuuksien keskihajonnat ovat pieniä.

8.5.3 "Sovelletut kartiokokeet"

Koesarjan 2 puristus- ja kolmiakσιαalikokeista yli jääneille näyteenpalasilla tehtiin "sovelletut kartiokokeet", joiden tulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 14. Kaikkien yksittäisten pudotusten tulokset löytyvät liitteestä 5.

Taulukko 14. Sovellettujen kartiokokeiden tulokset: kartion (400 g / 30°) painuman (mm) keskiarvo eri korkeuksilta pudotettaessa. Merkintä 20 (2) tarkoittaa koesarjan 2 pilaria 20.

Pudotuskorkeus (mm)	Pilari 20 (2) painuma, mm	Pilari 25 (2) painuma, mm	Pilari 30 (2) painuma, mm
20,5	7,5	6,5	6,0
35	9,7	8,8	8,0
50,5	10,0	9,5	8,9

Taulukosta 14 nähdään, että – niin kuin saattoi olettaa – kartion painuma kasvoi pudotuskorkeuden suurentuessa ja pieneni massan sideainepitoisuuden lisääntyessä.

8.6 Yhteenveto kaikista tutkimuksista

Tämän työn yhteydessä tehtiin kaikkiaan 20 CPT-kairaus, 23 kolmiakσιαalikoetta, 40 yksiakσιαalista puristuskoetta, 28 Brasilia-vetokoetta ja 36 "sovellettua kartiokoetta" lujittuneille massoille. Lisäksi jokaisesta seitsemästä massasta määritettiin heti sekoituksen jälkeen tilavuuspaino, vesipitoisuus, juoksuraja, plastisuusraja ja kartiroleikkauslujuus sekä 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen tilavuuspaino ja vesipitoisuus.

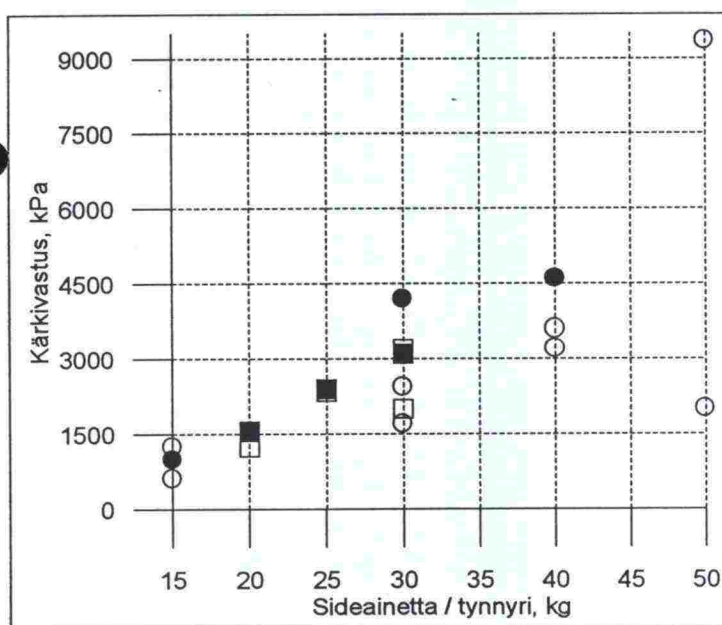
Tutkimuksen tavoitteen – CPT-kairauksen ja stabiloidun massan leikkauslujuuden välinen riippuvuus – kannalta tärkeimmät tutkimukset eli CPT-kairaukset ja puristuskokeet onnistuivat suhteellisen hyvin. Myös Brasilia-vetokokeet, sovelletut kartiokokeet ja tuoreista massoista tehdyt määritykset onnistuivat hyvin. Kolmiakσιαalikokeet eivät onnistuneet.

9 TULOSTEN TARKASTELO

9.1 Sideainemäärän vaikutus eri muuttujiin

9.1.1 CPT-kairauksen kärkivastus

Kuvassa 47 on esitetty sideainemäärän vaikutus pilarin keskiosan kärkivastukseen.



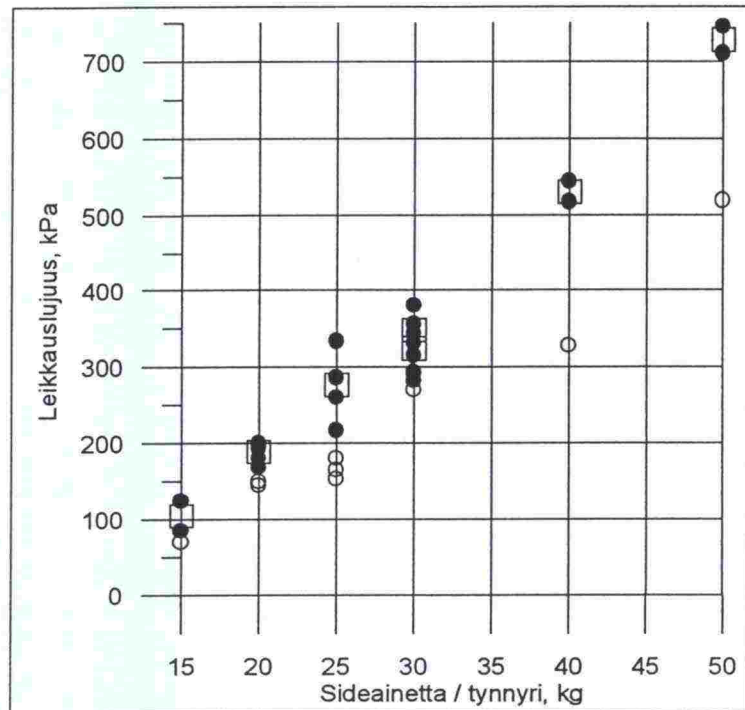
Kuva 47. Sideainemäärän vaikutus CPT-kairauksen kärkivastukseen. Ympyrät esittävät koesarjan 1 kairauksia, neliöt koesarjan 2 kairauksia. Mustat merkit kuvaavat keskimäisiä kairauksia, valkoiset laitimaisia kairauksia. Vertaa kuvaan 42 ja taulukkoon 7.

Kuvasta 47 havaitaan, että mustat merkit eli pilarien keskimäisten kairauksien kärkivastukset sijoittuvat hyvin tarkkaan samalle suoralle lukuunottamatta koesarjan 1 pilaria 30. Myös pilarin 50 (koesarja 1) kärkivastus osuu kuvitellun suoran ulkopuolelle. Nämä poikkeukset saattavat johtua siitä, että juuri näissä kairauksissa kaira tunkeutui pilariin melko vinosti.

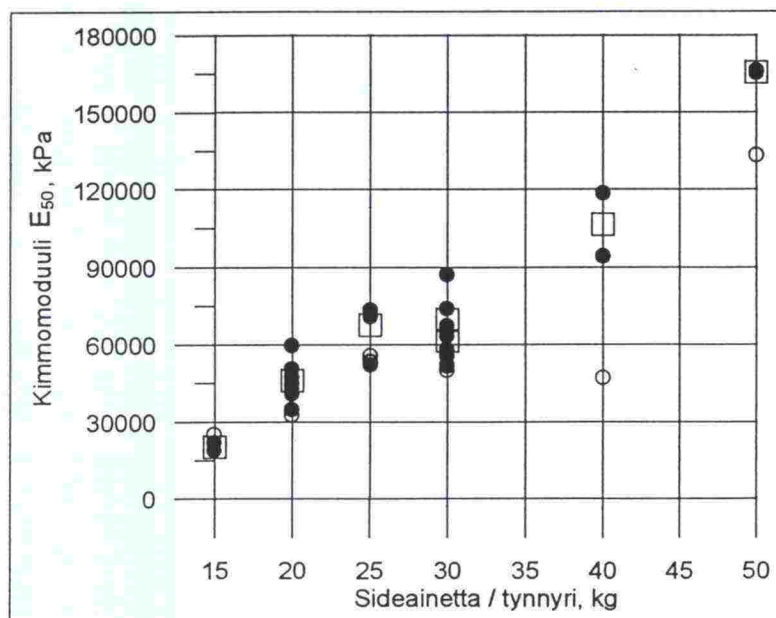
9.1.2 Kolmiaksaali- ja puristuskokeet

Kuten jo luvuissa 7.1.3 ja 8.3 todettiin, koesarjan 1 rinnakkaisnäytteet olivat niin huonolaatuisia, että niillä tehtyjen kolmiaksaali- ja puristuskokeiden tulokset hylätään. Edelleen todettiin, että kolmiaksaalikokeista saatiin kovin ristiriitaisia ja epä johdonmukaisia tuloksia. Tästä syystä jäljempänä keskitytään vain puristuskokeisiin.

Kuvassa 48 on esitetty sideainemäärän ja pilareista otettujen näytteiden puristuskokeilla määritettyjen leikkauslujuuksien välinen riippuvuus ja kuvassa 49 sideainemäärän ja vastaavalla tavalla määritettyjen kimmomoduulien välinen riippuvuus.



Kuva 48. Sideainemäärän vaikutus puristuskokeilla määritettyyn leikkauslujuuteen. Mustat ympyrät kuvaavat "hyvien" puristuskokeiden tuloksia, valkoiset ympyrät "huonojen" puristuskokeiden tuloksia ja neliöt esittävät "hyvien" tulosten keskiarvoja. Vertaa taulukkoon 9.



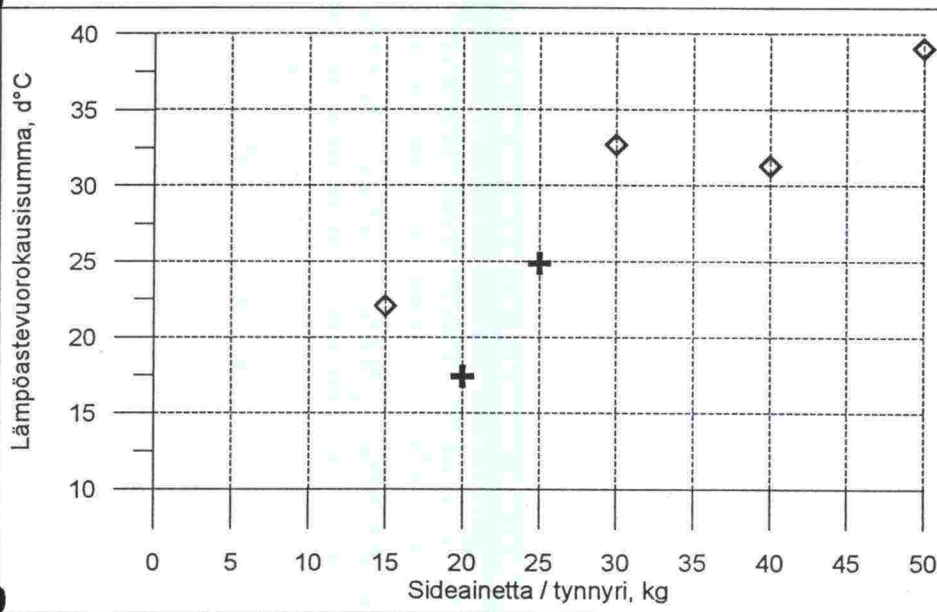
Kuva 49. Sideainemäärän vaikutus puristuskokeilla määritettyyn kimmomoduuliin E_{50} . Mustat ympyrät kuvaavat "hyvien" puristuskokeiden tuloksia, valkoiset ympyrät "huonojen" puristuskokeiden tuloksia ja neliöt esittävät "hyvien" tulosten keskiarvoja. Vertaa taulukkoon 10.

Neliöt eli "hyvien" puristuskokeiden keskiarvot osoittavat, että niin leikkauslujuus kuin kimmomoduulikin suurenevät lineaarisesti sideainemäärän kasvaessa – ainakin tällä sideainepitoisuusvälillä.

9.1.3 Muut tulokset

Lujittumisen aikana kehittynyt lämpömäärä

Kuvassa 50 on esitetty lujittumisen aikana kehittyneen lämpömäärän riippuvuus sideainemäärästä. Lämpöastevuorokausisumma on laskettu pilarin sisältä mitatun lämpötilan ja huoneilman lämpötilan erotuksesta. Eri massojen lujittumisen aikaiset kumulatiiviset lämpöastevuorokausisummat on esitetty liitteessä 6.

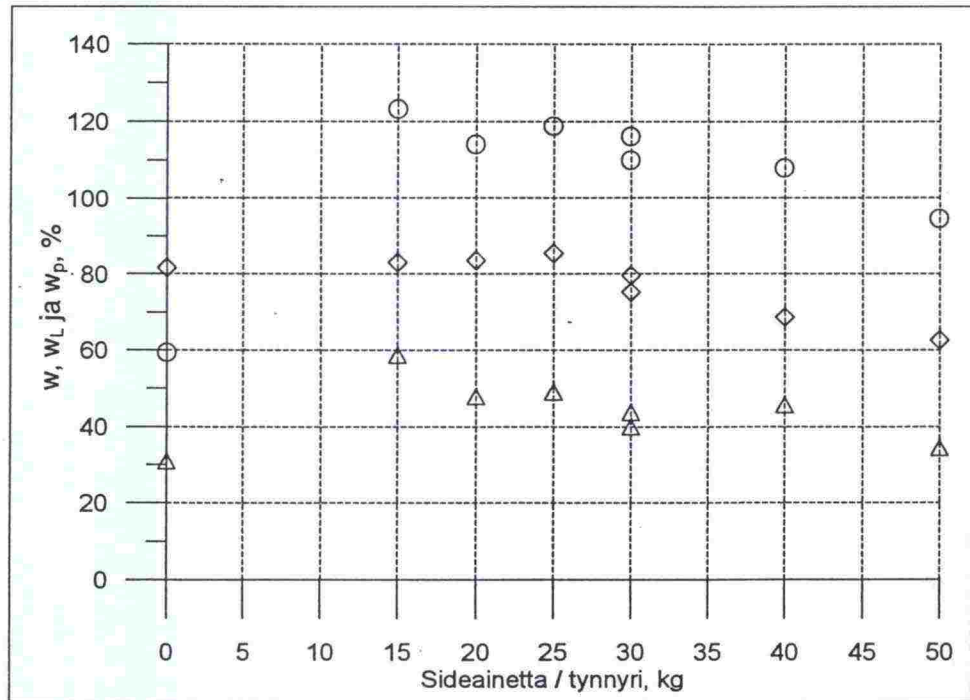


Kuva 50. Sideainemäärän vaikutus massan lujittumisen aikaiseen lämpöastevuorokausisummaan (lujittumisaika 28 d). Vinoneliöt kuvaavat koesarjaa 1 ja ristit koesarjaa 2.

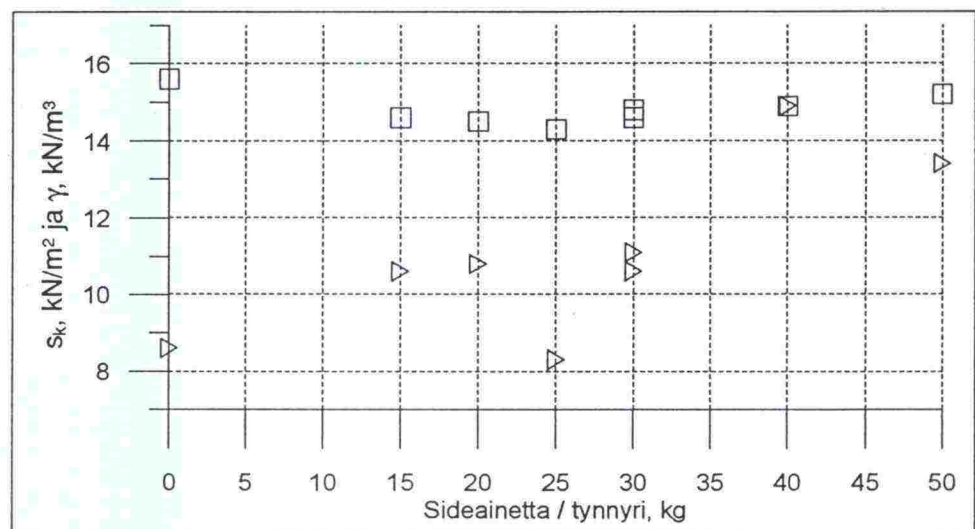
Kuten odottaa sopi, lujittumisen aikana kehittyi sitä enemmän lämpöä, mitä enemmän massassa oli sideainetta. Kuvassa 50 hajonta on melko suurta, mutta suunta on selkeä ja odotettu: mitä enemmän sideainetta, sitä enemmän kehittyi lämpöä. Koesarjan 2 pilarin 30 piste puuttuu lämpötilatietojen siirrosta tapahtuneen häiriön vuoksi.

Tuoreesta massasta tehdyt määritykset

Kuvissa 51 ja 52 esitetään, kuinka sideaineen lisääminen saveen vaikuttaa vesipitoisuuteen, juoksurajaan, plastisuusrajaan, märkätilavuuspainoon ja kartioleikkauslujuuteen.



Kuva 51. Sideainemäärän vaikutus tuoreen stabiloidun massan vesipitoisuuteen (vinoneliö), juoksurajaan (ympyrä) ja plastisuusrajaan (kolmio). Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty myös saven vastaavat ominaisuudet (kohdalla sideainetta 0 kg / tynnyri).



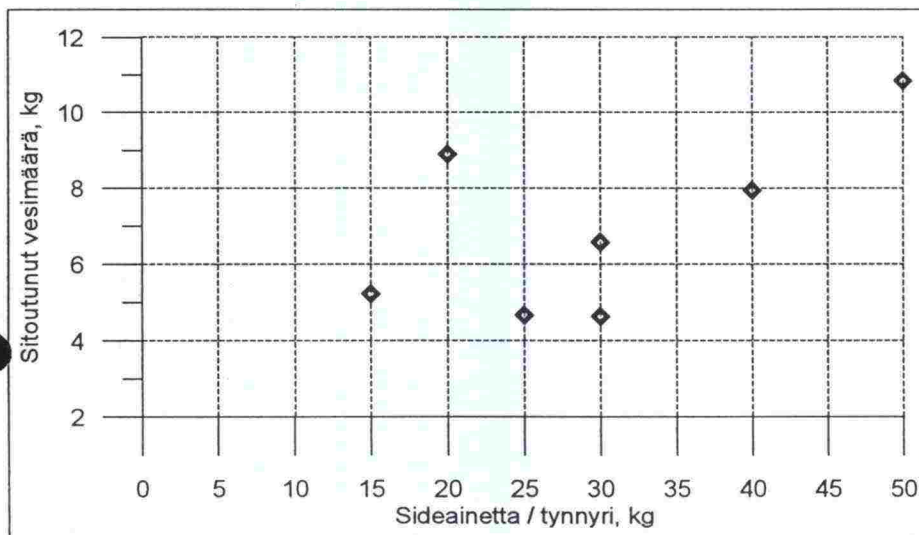
Kuva 52. Sideainemäärän vaikutus tuoreen stabiloidun massan märkätilavuuspainoon (neliö) ja kartioleikkauslujuuteen (kolmio). Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty myös saven vastaavat ominaisuudet (kohdalla sideainetta 0 kg / tynnyri).

Kuvasta 51 nähdään, että sideainepitoisuuden lisääntyessä vesipitoisuus sekä juoksu- ja plastisuusrajat pienenevät lineaarisesti – jopa täsmälleen yhdensuuntaisesti. Tämä tuntuukin luontevalta: mitä enemmän massassa on sideainetta, sitä enemmän se sitoo vettä reaktioissaan. Suoraviivaisesti sideainemäärän mukaan muuttuvat tulokset kertovat sekoitustyön onnistuneen kaikkien massojen kohdalla yhtä hyvin.

Märkätilavuuspaino pysyy melko tarkkaan vakiona sideainemäärästä riippumatta ja kartioleikkauslujuus hieman kasvaa sideainepitoisuuden suurentuessa. Koska laboratoriokokeet tehtiin heti sekoituksen jälkeen, massan lujittuminen oli vasta alkamassa eli kartioleikkauslujuudet eivät vielä ole merkittävästi saven lujuutta suurempia. Kaksi poikkeavaa s_k -arvoa (massat 25 ja 40) voivat johtua pienistä eroista koeajankohdassa. Luvun 8.5.1 taulukosta 11 nähdään, että noin tunnin kuluttua sekoituksesta kartiokoe antoi leikkauslujuudelle jo huomattavasti suurempia arvoja.

Lujittuneista massoista tehdyt määritykset

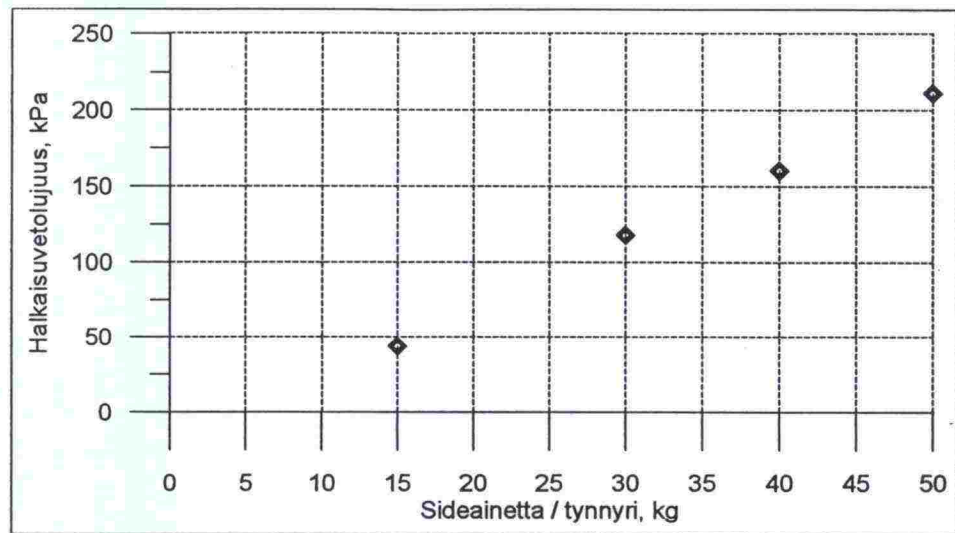
Lujittuneista massoista määritettiin vesipitoisuudet ja märkätilavuuspainot. Kuvassa 53 on esitetty näiden perusteella lasketun lujittumisaikana tynnyrissä sitoutuneen vesimäärän riippuvuus sideainemäärästä.



Kuva 53. Sideainemäärän vaikutus pilarissa lujittumisen aikana sitoutuneeseen vesimäärään.

Suuntaus on odotettu – vettä on sitoutunut sitä enemmän, mitä suurempi on pilarin sideainepitoisuus – mutta vaihtelu on melko suurta.

Brasilia-vetokokeet

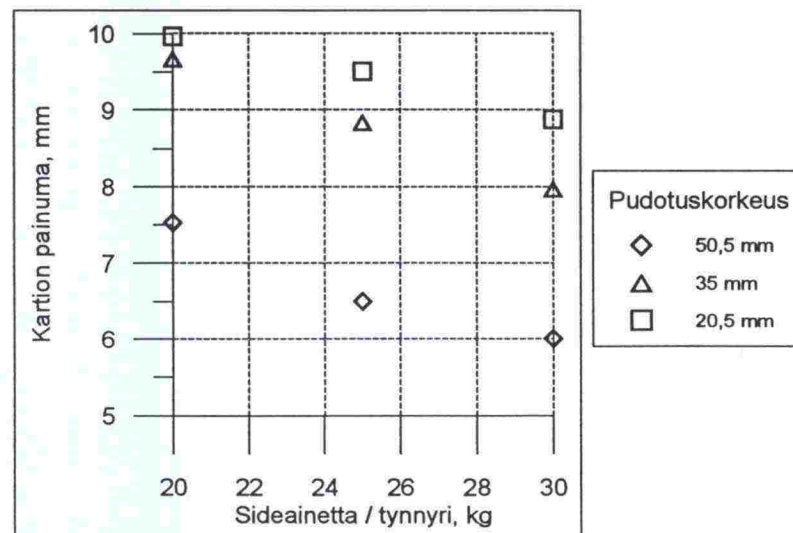


Kuva 54. Sideainemäärän vaikutus Brasilia-halkaisuvetokokeella mitattuun vetolujuuteen.

Myös halkaisuvetolujuus näyttää riippuvan tällä sideainepitoisuusvälillä lineaarisesti sideainemäärästä.

"Sovelletut kartiokokeet"

Kuvassa 55 on esitetty sovellettujen kartiokokeiden eri pudotuskorkeuksien tulosten keskiarvot.



Kuva 55. Sideainemäärän vaikutus kartion painumaan eri korkeuksilta pudotettaessa.

Kartion painuma vaikuttaa riippuvan suunnilleen lineaarisesti sideainemäärästä. Sen sijaan kartion painuman ja pudotuskorkeuden välinen riippuvuus ei ole suoraviivainen.

9.1.4 Yhteenveto

Kaikki luvuissa 9.1.1 - 9.1.3 esitetyt stabiloidun massan ominaisuudet näyttävät olevan suoraan riippuvaisia sideainemäärästä – ainakin tässä työssä käytetyllä sideaineella (Lohja Mix) ja sideainepitoisuusvälillä (80 ... 265 kg/m³).

Kaikkien ominaisuuksien tasaisesta muuttumisesta sideainepitoisuuden mukaan voidaan päätellä, että koepilarien valmistusmenetelmä oli hyvä; massasta tuli varsin homogeenista.

9.2 N_c-kerroin

9.2.1 Regressioanalyysi

Tämän työn tavoitteen kannalta massan keskeisiä ominaisuuksia ovat kärkivastus q_c , leikkauslujuus c_u ja kimmomoduuli E . Luvussa 8 on esitetty yksittäisistä kokeista saadut tulokset. Tässä luvussa tarkastellaan eri massojen keskimääräisiä q_c -, c_u -, E_{50} -, G_{50} - ja I_{r50} -arvoja. Luke [1995] huomauttaa, että mikään N_c -kerrointa käsittelevistä teorioista ei kerro, mitä leikkausmoduulia G laskelmissa pitäisi käyttää. Hän on päätenyt käyttämään kimmomoduulin E_{50} ja Poisson-luvun $\nu = 0,5$ perusteella laskettua leikkausmoduulia G_{50} . Taulukossa 15 käytetään samoja oletuksia.

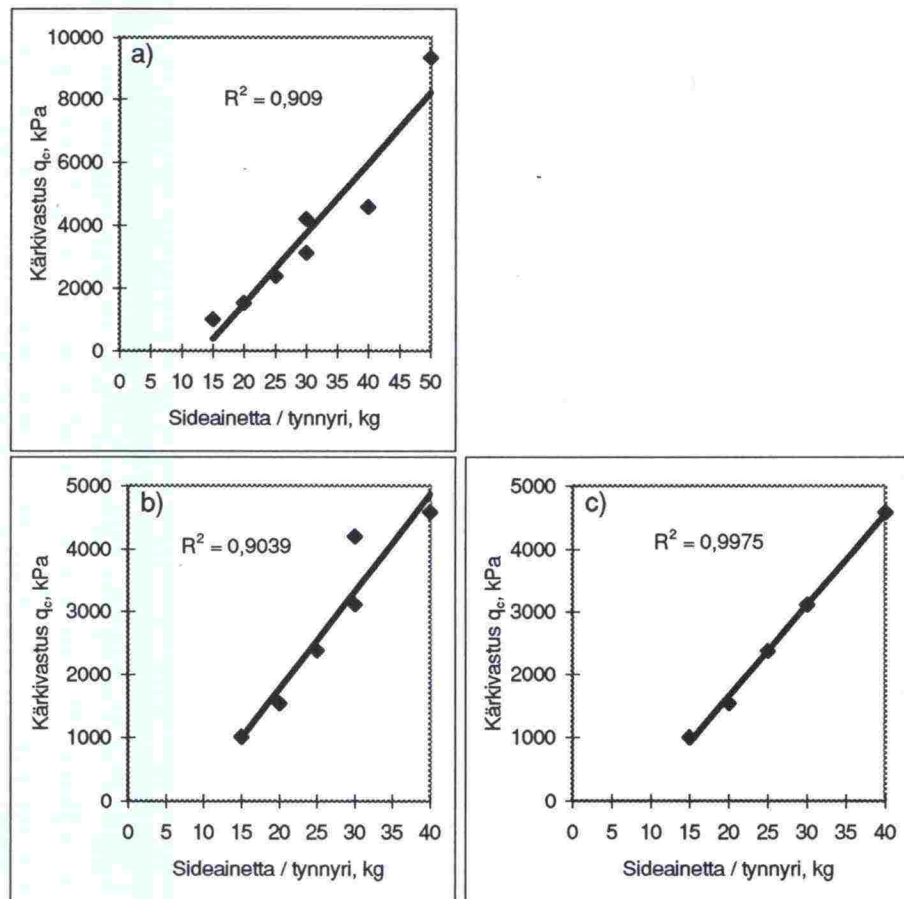
Taulukko 15. Eri massojen keskimääräiset q_c , c_u , E_{50} , G_{50} , I_{r50} sekä N_c .

	q_c	c_u	E_{50}	G_{50}	I_{r50}	N_c
15 (1)	1006	104	20397	6799	67	9,64
20 (2)	1538	188	45846	15282	81	8,17
25 (2)	2380	276	67679	22560	83	8,63
30 (2)	3109	323	61339	20446	63	9,62
30 (1)	4200	348	69458	23153	67	12,08
40 (1)	4583	531	106438	35479	67	8,64
50 (1)	9338	728	165638	55213	76	12,83

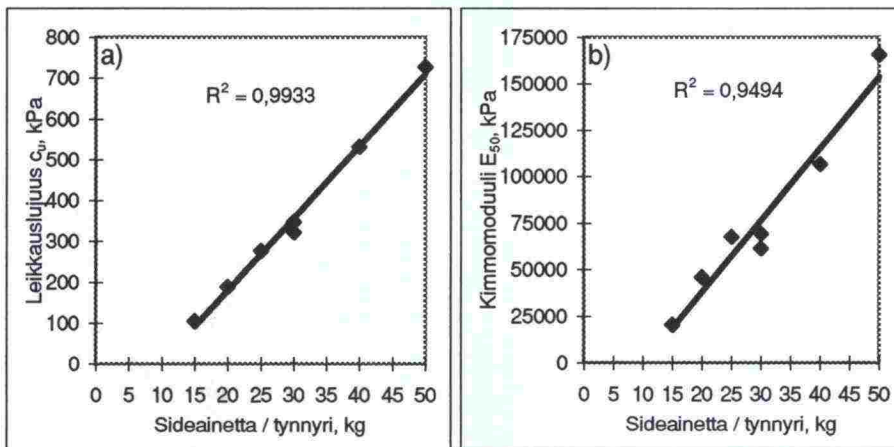
Taulukossa 15 N_c -kerroin on laskettu jakamalla kärkivastus q_c suoraan leikkauslujuudella c_u eli kärkivastuksesta ei ole vähennetty vallitsevaa jännitystä σ_0 . Tähän on kaksikin syytä: ensinnäkin eri teorioissa käytettävä vallitseva jännitys vaihtelee (σ_{v0} , σ_{ho} tai σ_{oct}) ja toiseksi näin lyhyissä pilareissa vallitseva jännitys on etenkin suuriin kärkivastusarvoihin verrattuna merkityksettömän pieni. Esimerkiksi puolen metrin paksuisen maakerroksen ($\gamma = 20$ kN/m³) aiheuttaman pystysuoran jännityksen 10 kN/m² vähentäminen kärkivastuksesta aiheuttaa taulukon 15 N_c -arvoihin vain noin 0,05 suuruisen

vähennyksen. Kaiken kaikkiaan ollaan hieman varmalla puolella, kun vallitsevaa jännitystä ei vähennetä kärkivastuksesta N_c -kerrointa laskettaessa.

Koepilarien määrä – seitsemän – on pieni. Niinpä on ajateltu, että pienestä otoskoosta johtuvaa epävarmuutta N_c -kertoimessa voidaan vähentää käyttämällä regressioanalyysillä laskettuja kärkivastuksen, leikkauslujuuden ja kimmomoduulin arvoja. *Kuvissa 56 ja 57* on esitetty kärkivastuksen, leikkauslujuuden ja kimmomoduulin keskiarvojen regressiosuorat (vaaka-akselina sideainemäärä).



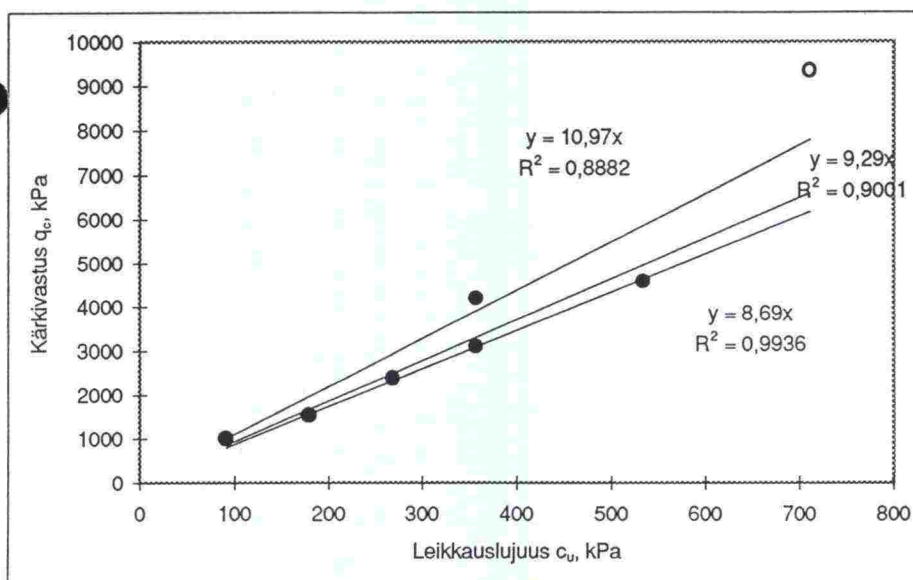
Kuva 56. Sideainepitoisuuden vaikutus kärkivastukseen. a) Kaikkien seitsemän massan keskimääräisten kärkivastusten regressiosuora. b) Regressiosuora, jota laskettaessa pilarin 50 (1) kärkivastusarvo on jätetty huomiotta. c) Regressiosuora, jota laskettaessa pilarien 30 (1) ja 50 (1) kärkivastusarvot on jätetty huomiotta. R^2 on regressiosuoran selityssaste.



Kuva 57. Sideainepitoisuuden vaikutus massan leikkauslujuuteen ja kimmomoduuliin. a) Keskimääräisten leikkauslujuuksien regressiosuora. b) Keskimääräisten kimmomoduulien regressiosuora. R^2 on regressiosuoran selityysaste.

Kaikilla kuvien 56 ja 57 regressiosuorilla on erittäin hyvä selityysaste R^2 eli pistejoukkoja voi perustellusti kuvata suoralla. Koska q_c ja c_u ovat molemmat lineaarisesti riippuvaisia massan sideainepitoisuudesta, ne ovat suoraan riippuvaisia myös toisistaan. Siis $q_c = N_c \cdot c_u$ ja N_c on vakio! Leikkauslujuuspisteisiin suoran sovittaminen on helppoa (kuva 57 a), mutta kärkivastuksen osalla regressiosuoran oikealle kaltevuudelle jää hieman tulkinanvaraa (kuva 56), koska kaksi seitsemästä pisteestä on muuta suuntausta suurempia.

Kuvaan 58 on piirretty eri koepilarien leikkauslujuus- ja kärkivastusarvot c_u - q_c -koordinaatistoon siten, että leikkauslujuudet ovat kuvan 56 a regressiosuoran yhtälöllä laskettuja arvoja ja kärkivastukset mitattuja arvoja.



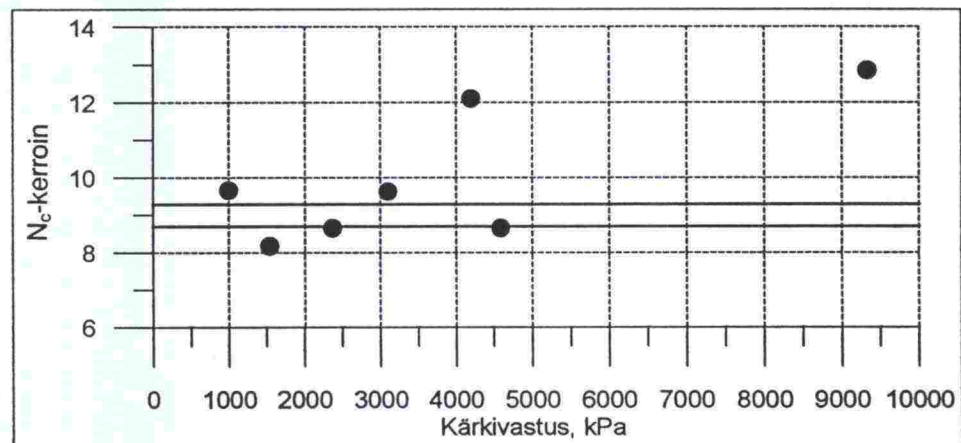
Kuva 58. Leikkauslujuuden ja kärkivastuksen välinen riippuvuus. Ylin suora on kaikkien seitsemän pisteen regressiosuora, keskimäinen kuuden mustan pis-

teen regressiosuora ja alin viiden samassa linjassa olevan mustan pisteen regressiosuora.

Kuvasta 58 nähdään, että N_c -kerroin on sovituksista riippuen 8,7, 9,3 tai 11,0. Pilarin 50 (koesarja 1) kärkivastus on selkeästi suurempi kuin muiden pilarien kärkivastusten perusteella voisi olettaa. Tämä johtuu joko jo aiemmin mainitusta kyseisen kairauksen vinoudesta tai muusta mittausvirheestä tai sitten kairaustulos on aivan oikea, mutta c_u :n ja q_c :n välinen yhteys ei enää noin leikkauslujuuden 500 kPa jälkeen olekaan lineaarinen. Mahdollista on sekin, että yhteys on edelleen lineaarinen, mutta kulmakerroin on aiempaa suurempi.

Koesarjan 1 pilarin 30 kärkivastusarvo on muihin verrattuna poikkeuksellisen suuri. Tästä syystä kuvassa 58 on laskettu myös viiden hyvin tarkkaan samalle suoralle osuvan kärkivastuspisteen regressiosuora. Näin ollen leikkauslujuusvälillä noin 100 ... 500 kPa oikea q_c -sovitus on jompi kumpi kuvan 58 alemmista suorista ja N_c -kerroin noin 8,7 ... 9,3.

Kuvassa 59 on esitetty, kuinka suoraan mittaustuloksista lasketut N_c -kertoimet suhtautuvat yllä mainittuihin vakioarvoihin.



Kuva 59. Kärkivastuksen vaikutus N_c -kertoimeen. Ympyrät kuvaavat mitatuista arvoista laskettuja N_c -kertoimia (taulukko 15). Vaakaviivat $N_c = 8,7$ ja $N_c = 9,3$.

Kuvassa 59 kaksi ylintä ympyrää (koesarjan 1 pilarit 30 ja 50) eivät oikein sovi muiden vinoneliöiden sarjaan. Kuten jo aiemmin on todettu, näissä pilareissa keskimäinen kairaus jostain syystä antoi poikkeuksellisen suuren kärkivastuksen. Muut ympyrät ovat kaikki välillä 8 - 10 eli lähellä kuvan 59 suoraa.

Koska kerroin N_c sijaitsee leikkauslujuuden kaavassa (3) nimittäjässä, pyöristetään kertoimen arvoa ylöspäin: $N_c = 10$.

9.2.2 Tulosten vertailu luvussa 5 esitettyihin teorioihin

Puristinkairauksen leikkauslujuustulkinta perustuu kaavaan (3)

$$c_u = \frac{q_T - \sigma_0}{N_c} \quad (3bis)$$

Kantavuuskertoimen N_c laskemiseksi on esitetty useita eri teorioita. Kaikki nämä teoriat ovat muotoa

$$N_c = A(1 + \ln I_r) + B \quad (16)$$

missä A ja B ovat vakioita. $I_r = G/c_u$ ja $G = E/2(1+\nu)$.

Taulukkoon 16 on laskettu N_c -kertoimet luvussa 4 esitettyjen teorioiden mukaan. Leikkauslujuudet ja kimmomoduulit ovat regressiosuorien yhtälöillä laskettuja arvoja.

Taulukko 16. Eri koepilarien N_c -kertoimet luvussa 4 esitettyjen teorioiden mukaan (vrt. luvun 4.5 taulukko 3).

	15	20	25	30	40	50	ka
c_u , kPa	92	180	268	357	534	711	
E_{50} , kPa	18900	38200	57400	76700	115200	153700	
G_{50} , kPa	6300	12700	19100	25600	38400	51200	
I_{r50}	68,8	70,7	71,3	71,6	71,9	72,1	71,2
N_c -kertoimet:							
Vesic 1972, SCE	6,98	7,01	7,02	7,03	7,03	7,04	7,02
Vesic 1972, CCE	5,23	5,26	5,27	5,27	5,28	5,28	5,26
Vesic 1975	9,55	9,58	9,59	9,60	9,60	9,61	9,59
Baligh 1975	16,23	16,26	16,27	16,27	16,28	16,28	16,26
K & L 1987 ($\phi=10^\circ$)	8,21	8,25	8,26	8,27	8,27	8,28	8,26
K & L 1987 ($\phi=45^\circ$)	19,06	19,16	19,19	19,20	19,22	19,23	19,18
H & T 1988	10,06	10,11	10,13	10,14	10,15	10,15	10,12

Konrad & Law'n [1987] teoriassa N_c riippuu jäykkyyksindeksin lisäksi myös maan ja kärjen välisestä kitkakertoimesta M (oletettu $M = 1$) ja maan kitkakulmasta ϕ . Taulukkoon 16 on laskettu Konrad & Law'n teorialla kertoimia kahdella eri kitkakulman arvolla kitkakulman vaikutuksen havainnollistamiseksi.

Kantavuusteorioiden mukaisissa lähestymistavoissa N_c ei riipu massan ominaisuuksista vaan pelkästään geometriasta ja teorian murtumismallista. Sandven [1990] esittää, että Meyerhofin (1961) teoria antaa kantavuuskertoimelle tasotapauksessa arvon 9,7, mikä on melko hyvin sopuoinnussa tämän työn tulosten kanssa.

Parhaiten tämän työn tuloksiin (N_c -kerroin noin 8,7 ... 9,3) sopii Vesicin [1975b] esittämä teoria. Vesic esitti vuonna 1975, että N_c -kerroin lasketaan kaavasta (11)

$$N_c = \frac{4}{3}(1 + \ln I_r) + 2,57 \quad (11\text{bis})$$

Kaikki teoriat tukevat vakioarvon käyttämistä N_c -kertoimelle tässä työssä tarkastellulla lujuusalueella: Koska jäykkyysindeksistä I_r otetaan kaavassa (16) luonnollinen logaritmi, sen muuttuminen 69:stä 71:een (*taulukko 16*) ei juuri N_c -kertoimeen vaikuta. Vaikka käytettäisiin luvun 9.2.1 *taulukossa 15* esitettyjä mitattujen kimmomoduulien ja leikkauslujuuksien perusteella laskettuja jäykkyysindeksejä (67 ... 83), tämänkin vaihtelun merkitys N_c -kertoimessa on Vesicin [1975b] teorian mukaan alle 0,3.

9.2.3 Tulosten vertailu kirjallisuuteen

Kuten luvussa 4.1 mainittiin, N_c -kerroin vaihtelee erilaisilla luonnontilaisilla savilla huomattavasti. Schmertmann [1975] esittää vaihteluväliksi 5 ... 70, de Ruiter [1982] normaalikonsolidoituneelle savelle 10 ... 15 sekä ylikonsolidoituneelle savelle 15 ... 20 ja Campanella & Robertson [1988] 4 ... 30. Tänä vuonna järjestetyn CPT'95-symposion kansallisissa raporteissa esitetään N_c -kertoimelle arvioita, jotka lähes kaikki osuvat välille 10 ... 20. Kantavuuskerroin voi olla jollakin tietyllä alueella suunnilleen vakio, mutta yleisesti hyväksytyä, kaikkiin maaperäolosuhteisiin soveltuvaa kantavuuskerrointa ei ole olemassa.

Niin kantavuuskertoimen arvo kuin sen vaihteluvälikin ovat vuosien saatossa hieman pienentyneet. Aikaisempaa tarkemmat leikkauslujuuden määrittämenetelmät antavat aiempaa suurempia leikkauslujuuden arvoja ja koska N_c -kerroin on kääntäen verrannollinen leikkauslujuuteen, päädytään entistä pienempiin N_c -kertoimiin. Muutamia edellä mainituista kansallisista raporteista esittävät kantavuuskertoimelle arvoa 10. Tähän arvoon ovat päätyneet myös muun muassa Hanzawa & al. [1994], Luke [1995] ja Steenfelt & Sørensen [1995]. Luken [1995] saamiin tuloksiin sopivat Vesicin [1975b] sekä Houlsbyn & Teh'n [1988] kantavuuskerrointeoriat hyvin.

Kaikki edellä esitetyt kantavuuskertoimet on määritetty luonnontilaiselle savelle; stabiloidulle savelle vastaavaa selvitystä ei ole aikaisemmin tehty. Joitakin hieman stabiloitua savea muistuttavia materiaaleja on kuitenkin tutkittu: Longin & Rodgersin [1995] mukaan irlantilaisessa hyvin pehmeässä kalkkipitoisessa maassa N_c -kerroin on 6 ... 11 ja Steenfelt & Sørensen [1995] ovat määrittäneet tanskalaisessa kalkkipitoisessa savimoreenissa kertoimeksi 8. Stabiloidun saven voitaneen katsoa muistuttavan myös jäätynyttä maata; Ladanyi [1982] esittää jäätyneelle maalle sopivaksi N_c -kertoimeksi noin arvoa 10.

Syvästabiloinnin laadunvalvonnassa esimerkiksi Helsingin kaupunki käyttää puristinkairauksen tulkinnessa N_c -kerrointa 12 tai 13 [Halkola 1994]. Samansuuruisia arvoja on havainnut myös Laaksonen [1994]. Näitä arvoja määritettäessä leikkauslujuuden vertailuarvona on käytetty pilarisiipikairaa. Tämän tutkimuksen alkuvaiheessa pohdittiin, mikä olisi sopiva c_u :n määrittäminen. Puristus- ja kolmiaksaalikokeita pidettiin pilarisiipikairausta luotettavampina, koska siipikairauksen murtotapahtuma kovassa stabiloidussa materiaalissa on aivan erilainen kuin siipikairan tulkin perustana oleva pehmeän saven murtumismekanismi siiven ympärillä. Puristus- ja vielä paremmin kolmiaksaalikokeen voidaan ajatella esittävän syvästabiloidun pilarin kuormittamista pienoiskoossa, jolloin murtotapahtumakin on lähellä oikeata.

Monet tutkijat ovat huomauttaneet, että leikkauslujuuden vertailuarvon määrittäminen vaikuttaa selvästi N_c -kertoimen arvoon. N_c -kerroin lasketaan kaavasta (3)

$$N_c = \frac{q_T - \sigma_0}{c_u} \quad (3bis)$$

eli mitä suurempi leikkauslujuus, sitä pienempi N_c -kerroin. Esimerkiksi Schmertmannin [1975] mielestä leikkauslujuuden entistä tarkempi määrittäminen saattaa pienentää kantavuuskerrointa jopa 2 ... 3 yksikköä (ks. luvun 4.1 taulukko 2). Houlsby & Wroth [1989] esittävät, että havaitut N_c -kerroimet ovat selvästi teoreettisia arvoja suurempia nimen omaan leikkauslujuuden vertailuarvon määrittämenetelmän epätarkkuuksien takia.

Vaikuttaakin siltä, että ero tässä tutkimuksessa saadun N_c -kertoimen (10) ja tähän asti käytössä olleiden kertoimien (12 ... 13) välillä johtuu lähinnä erilaisesta leikkauslujuuden määrittämenetelmästä.

10 YHTEENVETO

Tämä työ koostuu kahdesta pääosasta: Kirjallisuustutkimuksella selvitettiin CPT-kairauksen ja suljetun leikkauslujuuden välinen riippuvuus savessa ja kokeellisessa osassa tutkittiin näiden teorioiden soveltuvuutta stabiloidulle savelle. Työn alussa esitellään lisäksi lyhyesti syvä- ja massastabiloinnin periaatteita sekä puristinkairausta.

Kirjallisuusselvityksessä tarkastellaan seitsemää erilaista teoriaa, jotka on koottu taulukon muotoon luvussa 4.5. Teoriat voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kantavuusteoriat, ontelon laajenemiseen perustuvat teoriat (cavity expansion theory) sekä siirtymäpolkumenetelmä (strain path method). Eri teorioissa maan murtumismalli puristinkairan kärjen ympärillä on oletettu hieman erilaiseksi, mutta lopulta kaikissa näissä teorioissa puristinkairauksen kärkivastuksen tulkinta saven leikkauslujuudeksi tapahtuu kaavalla (3)

$$c_u = \frac{q_T - \sigma_0}{N_c} \quad (3bis)$$

Kaavan (3) osalta teoriat eroavat toisistaan vallitsevan jännityksen σ_0 ja kantavuuskertoimen N_c osalta. Vallitsevana jännityksenä käytetään monessa teoriassa pystyjännitystä, mutta joissakin myös vaaka- tai oktaedristä jännitystä. Kaava N_c -kertoimen laskemiseen on kaikissa teorioissa samantapainen:

$$N_c = A(1 + \ln I_r) + B \quad (16bis)$$

A ja B ovat vakioita – eri teorioissa eri suuruisia – eli N_c -kerroin riippuu vain jäykkyyksindeksistä I_r .

Työn kokeellisessa osassa valmistettiin seitsemän lujuudeltaan erilaista koepilaria tynnyreihin, joiden korkeus oli 0,86 m ja sisähalkaisija 0,57 m. Saven, veden ja sideaineen sekoittamiseen käytettiin pakkosekoittajaa. Massa valmistettiin vajaan 20 litran annoksissa, joten yhteen tynnyriin mahtui hieman alle 11 annosta. Massa tiivistettiin puujuntalla noin seitsemän sentin kerroksissa. Koepilarin valmistamisen yhteydessä massaan painettiin tietyille syvyyksille näytelieriöitä helpottamaan näytteiden saamista lujittuneesta pilarista.

28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen koepilarit puristinkairattiin ja kairauksen jälkeen pilarit rikottiin niin, että edellä mainitut näytelieriöt saatiin irti. Laboratoriossa näytteille tehtiin muun muassa puristus- ja kolmiaksaalikoikeita leikkauslujuuden selvittämiseksi. Puristuskokeilla saatiin pilarien leikkauslujuus ja kimmomoduuli selville, mutta kolmiaksaalikokeet epäonnistuivat.

Tuloksia tarkasteltaessa havaittiin kärkivastuksen, leikkauslujuuden ja kimmomoduulin olevan suoraan verrannollisia koepilarin sideainemäärään. Regressioanalyysit antoivat suorasovituksille erittäin hyvät selitysasteet. Näin ollen myös kärkivastuksen ja leikkauslujuuden välinen riippuvuus on kokeissa käytetyllä sideainepitoisuusvälillä lineaarinen eli N_c -kerroin on

vakio! Tuloksia tarkasteltaessa vallitsevaa jännitystä ei kaavassa (3) huomioitu, koska sen vaikutus on näin pienillä syvyyksillä ja näin suurilla kärkivastuksen arvoilla mitättömän pieni. Koetulosten perusteella N_c -kertoimelle saatiin arvo 10 stabiloidun saven leikkauslujuuden ollessa välillä 100 ... 500 kPa.

Erilaisille luonnontilaisille saville on saatu kovin erilaisia N_c -kertoimen arvoja, mutta monissa viimeaikaisissa tutkimuksissa on päädytty noin arvoon 10. Tämän perusteella voitaneen olettaa, että vakioarvo 10 sopii myös pehmeälle stabiloidulle savelle, jonka leikkauslujuus on alle 100 kPa. On kuitenkin muistettava, että tätä olettamusta ei ole kokeellisesti varmistettu; pehmeimmän tässä työssä tutkitun koepilarin leikkauslujuus oli noin 100 kPa.

Kirjallisuustutkimuksessa tarkastelluista teorioista parhaiten koetuloksiin sopii Vesicin vuonna 1975 esittämä, ontelon laajenemiseen perustuva teoria. Kaikki teoriat tukevat vakioarvon käyttämistä N_c -kertoimelle: Kaavan (16) mukaan N_c -kerroin riippuu vain jäykkyysindeksin luonnollisesta logaritmista, ja tässä työssä käytetyillä sideainemäärillä eri lujuuksisten pilarien jäykkyysindeksit eivät paljon poikenneet toisistaan.

Syvästabiloinnin laadunvalvonnassa on N_c -kertoimelle usein käytetty arvoa 12 tai 13. Tällöin leikkauslujuuden vertailuarvo on määritetty pilarisiipikairalla. Siipikairaus saattaa kuitenkin antaa liian pieniä leikkauslujuuden arvoja, sillä siipikairauksen murtotapahtuma kovassa stabiloidussa materiaalissa on aivan erilainen kuin siipikairan tulkinnan perustana oleva pehmeän saven murtumismekanismi siiven ympärillä. Puristus- ja vielä paremmin kolmiaksaalikokeen voidaan ajatella esittävän syvästabiloidun pilarin kuormittamista pienoiskoossa, jolloin murtotapahtumakin on lähellä oikeata. Monet tutkijat ovat huomauttaneet, että entistä tarkempi leikkauslujuuden vertailuarvon määritysmenetelmä pienentää selvästi N_c -kerrointa – jopa 2 ... 3 yksikköä.

Erilaisille luonnontilaisille saville on havaittu suurestikin toisistaan poikkeavia N_c -kertoimia eikä mitään yleispätevää vakioarvoa ole olemassa. Tässä tutkimuksessa käytettiin vain yhdenlaista savea ja yhtä sideainetta. Saven häirinnällä ja sideaineen sekoittamisella pyritään mahdollisimman homogeeniseen stabiloituun tuotteeseen, joten voitaneen ajatella, että luonnontilaisista savista poiketen erilaiset stabiloidut savet käyttäytyvät puristin-kairan kärjen ympärillä samalla tavalla. Tällä oletuksella erilaisissa stabiloituissa savissa voidaan N_c -kertoimelle käyttää samaa vakioarvoa 10.

11 KIRJALLISUUSLUETTELO

- Aaltonen, L. 1994. Dyla-testaus. TPPT-projektin 332.60 Stabiloidun tuotteen laadun varmistus ja mittaaminen osaprojektin työraportti, 9 s.
- Arkima, O., Okko, O. & Törnqvist, J. 1994. Puristinkairaus, ruuvilevykoe, geofysikaaliset menetelmät. TPPT-projektin 332.60 Stabiloidun tuotteen laadun varmistus ja mittaaminen osaprojektin työraportti, 35 s.
- Baligh, M.M. 1975. Theory of Deep Site Static Cone Penetration Resistance. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Report no. R. 75-76, Cambridge, Mass.
- Baligh, M.M. 1985. The Strain Path Method. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 111, no. 9, p. 1108 - 1136.
- Baligh, M.M. 1986. Undrained Deep Penetration. I: Shear Stesses. Geotechnique, vol. 36, no. 4, p. 471 - 485.
- Baligh, M.M. & Levadoux, J.N. 1980. Pore pressure dissipation after cone penetration. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Report no. R. 80-11, Cambridge, Mass.
- de Beer, E.E., Goelen, E., Heynen, W.J. & Joustra, K. 1989. Cone penetration test CPT.: International reference test procedure. ISOPT-1, Orlando, vol. 1, p. 27 - 51.
- Begemann, H.K. 1965. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, vol. 1, p. 17-20.
- Bishop, R.F., Hill, R. & Mott, N.F. 1945. Theory of Indentation and Hardness Tests. Proceedings of the Physical Society, London, vol. 57, no. 3, p. 145 - 159.
- Broms, B. & Boman, P. 1978. Stabilization of soil with lime columns. Design Handbook, Second Edition, Department of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology.
- Campanella, R.G. & Robertson, P.K. 1988. Current status of the piezocone test. ISOPT-1, Orlando, vol. 1, p. 93 - 116.
- Carlsten, P. 1994. Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Presentation av den nya kc-pelarskriften. Temadag – Internationell jordförstärkningsteknik, Göteborg, 51 s.
- CPT'95. International Symposium on Cone Penetration Testing, Linköping 1995, Swedish Geotechnical Society, Report 3:1995, 911 p.
- ESOPT I. Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing. Stockholm 1974, 914 p.

ESOPT II. Penetration testing. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam 1982, 982 p.

Halkola, H. 1994. Suullinen tiedonanto 4.7.1994. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto.

Hanzawa, H., Kishida, T., Fukasawa, T. & Asada, H. 1994. A case study of the application of direct shear and cone penetration tests to soil investigation, design and quality control for peaty soils. Soils and foundations, vol. 34, no. 4, p. 13 - 22.

Houlsby, G.T. & Teh, C.I. 1988. Analysis of the piezocone in clay. ISOPT-1, Orlando, vol. 2, p. 777-783.

Houlsby, G.T. & Wroth, C.P. 1989. The influence of soil stiffness and lateral stress on the results of in-situ soil tests. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, vol. 1, p. 227 - 232.

ISSMFE 1989. International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC16 with Reference Test Procedures. Swedish Geotechnical Society, Swedish Geotechnical Institut, Information 7, Linköping, 49 p.

ISOPT-1. Penetration testing 1988. Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing. Orlando 1988, 1076 p.

Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Tordella, L. & Battaglio, M. 1982. Undrained strength from CPT. ESOPT II, Amsterdam, vol. 2, p. 599 - 606.

Janbu, N. 1974. Penetrations in Clay at Undrained Conditions. Discussion to ESOPT I, Vol. 2.1, p. 129 - 132.

Konrad, J.M. & Law, K.T. 1987. Undrained Shear Strength from piezocone tests. Canadian Geotechnical Journal, 24, p. 392 - 405.

Kujala, K. 1990. Syvästabiloinnin sideaineet. RIL K128-1990 Syvästabiloinnin suunnittelu ja toteutus, s. 93 - 106.

Kukko, H. & Ruohomäki, J. 1995. Savien stabilointi eri sideaineilla. VTT tiedotteita 1682, 39 s.

Kurup, P.U., Voyiadijs, G.Z. & Tumay, M.T. 1994. Calibration Chamber Studies of Piezocone Test in Cohesive Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 120, no 1, p. 81 - 107.

Laaksonen, J. 1994. Syvästabiloinnin valvontakairaukset. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan erikoistyö, 15 s.

Ladanyi, B. 1963. Expansion of a Cavity in a Saturated Clay Medium. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 89, no. SM4, p. 127 - 161.

- Ladanyi, B. 1967. Deep punching of Sensitive Clays. Proceedings of third Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Caracas, vol. 1, p. 533 - 546.
- Ladanyi, B. 1982. Determination of geotechnical parameters of frozen soil by means of the cone penetration test. ESOPT II, Amsterdam, vol. 2, p. 671 - 678.
- Lahtinen, P. & Kujala, K. 1991. Syvästabilointiohje STO-91. Rakennustieto Oy, Helsinki, 52 s.
- Lahtinen, P. & Parkkinen, E. 1992. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Tielaitoksen selvityksiä 46/1992, Helsinki, 49 s.
- Larsson, R. 1993. CPT-sondering: utrustning – utförande – utvärdering. Statens geotekniska institut, Information 15, Linköping, 80 s.
- Long, M. & Rodgers, M. 1995. Geotechnical behaviour of very soft calcareous soils in Ireland. Proceedings of the Eleventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, vol. 8, p. 103 - 108.
- Luke, K. 1995. The use of c_u from Danish triaxial tests to calculate the cone factor. CPT'95, Linköping, vol. 2, p. 209 - 214.
- Parkkinen, E. 1991. Syvästabiloinnin laadunvalvonta. Diplomityö, TTKK/Geotekniikan laitos, Tampere, 79 s.
- PRO-1988. RIL 121-1988, Pohjarakennusohjeet, 77 s.
- Putala, J. 1990. Maanvaraisten perustusten kantokyky. RIL 157-2, Geomekaniikka II, luku 13, s. 67 - 87.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1992. Geotekniikka. Otatieto 464, Hämeenlinna, 290 s.
- Rantamäki, M. & Tammirinne, M. 1992. Pohjarakennus. Otatieto 465, Hämeenlinna, 232 s.
- Rathmayer, H. 1989. Syvästabilointi kalkkipilareilla: tutkimus- ja kehittämistarpeet. Suomen geoteknillinen yhdistys SGY, Geotekniikan päivä 16.11.1989, 111 s.
- Rekonen, R. & Halkola, H. 1994. Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto, tiedote 64/1994, 69 s.
- RIL K128-1990. Syvästabiloinnin suunnittelu ja toteutus. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL, 127 s.
- Robertson, P.K. & Campanella, R.G. 1983. Interpretation of cone penetration tests. Part I: Clay. Canadian Geotechnical Journal, 20, p. 734 - 745.

- Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, p. 151 - 158.
- de Ruiter, J. 1982. The static cone penetration test. State-of-the-art-report. *ESOPT II, Amsterdam*, vol. 2, p. 389 - 405.
- Rusanen, J. 1994. Puristin-huokospainekairauksen tulkinta. Diplomityö, TKK/RM-osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka, Otaniemi, 106 s.
- Saarela, A., Jämsä, H., Törnqvist, J., Tammirinne, M. & Saarelainen, S. 1994. Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimussuunnitelma vuosille 1994 - 2000. Tielaitoksen selvityksiä 7/1994, Helsinki, 181 s.
- Sandven, R. 1990. Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests. *Doktor Ingeniøravhandling 1990:3*, Institutt for Geoteknikk, NTH, Trondheim.
- Schmertmann, J.H. 1972. Static Cone Penetration Tests. Canadian National Research Council, Div. Building Research, Ottawa, Project G-1m Internal Report 1.
- Schmertmann, J.H. 1975. Measurement of In Situ Shear Strength, SOA Report. *Proceedings of ASCE Conference on In Situ Measurements of Soil Properties*, Raleigh, vol. 2. p. 57 - 138.
- Schmertmann, J.H. 1978. Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Report no. FHWA-TS-78-209, 64 p.
- Steenfelt, J.S. & Sørensen, C.S. 1995. CPT – Contraption for Probing in Tills? *CPT'95, Linköping*, vol. 2, p. 307 - 312.
- Svensson, P.L. 1990. Jordförstärkningsteknik, "State of Art rapport". Byggeforskningsrådet T12:1990, Stockholm, 28 s.
- Teh, C.I. 1987. An analytical study of the cone penetration test. D. Phil. thesis, University of Oxford.
- Törnqvist, J., Laaksonen, R. & Tammirinne, M. versio 1994. CPTU-kairauksen tulkinta. Kirjallisuusselvitys ja tulkintamenetelmien soveltaminen suomalaisissa pohjasuhteissa. Julkaisematon, 87 s.
- Törnqvist, J. 1995. Suullinen tiedonanto 28.11.1995. VTT/Yhdyskuntatekniikka Tie- ja geotekniikan laboratorio.
- Vepsäläinen, P. 1994. Käännetty pilarikairaus. TPPT-projektin 332.60 Stabiloidun tuotteen laadun varmistus ja mittaaminen osaprojektin työraportti, 16 s.
- Vesic, A.S. 1972. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, vol. 98, SM3, p. 265 - 290.

Vesic, A.S. 1975a. Bearing Capacity of Shallow Foundations. Winterkorn, H.F. & Wang, H-Y. editors., Foundation Engineering Handbook, p. 121 - 147.

Vesic, A.S. 1975b. Principles of Pile Design. Lecture Series on Deep Foundations. Sponsored by the Geotechnical Group, BSCE/ASCE, Cambridge, Mass.

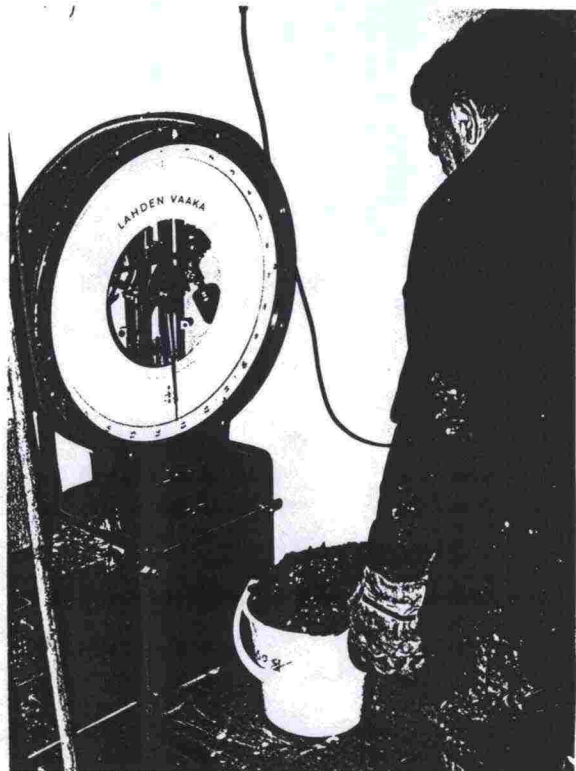
Åhnberg, H. & Holm, G. 1986. Kalkpelarmetoden. Statens Geotekniska Institut, Rapport No 31, Linköping, 122 s.

Åhnberg, H., Johansson, S-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. & Holm, G. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Statens Geotekniska Institut, Rapport No 48, Linköping, 213 s.

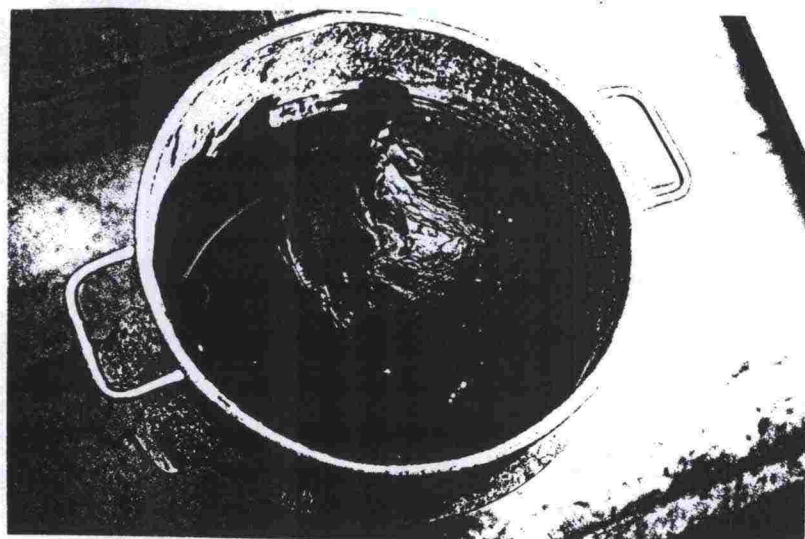
12 LIITTEET

1. Kuvasarja massan valmistuksesta
2. Puristinkairausten kärkivastusdiagrammit
3. Kolmiaksoaalikokeiden tulokset: deviatorinen jännitys - muodonmuutos -kuvaajat.
4. Puristuskokeiden tulokset: puristusjännitys - muodonmuutos -kuvaajat.
5. "Sovellettujen kartiokokeiden" tulokset
6. Koepilarien kumulatiiviset lämpöastevuorokausisummat

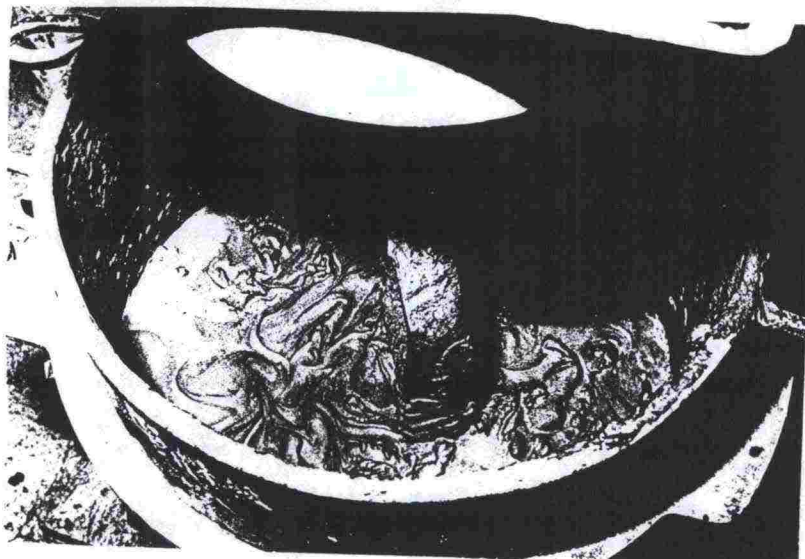
Kuvasarja massan valmistuksesta.



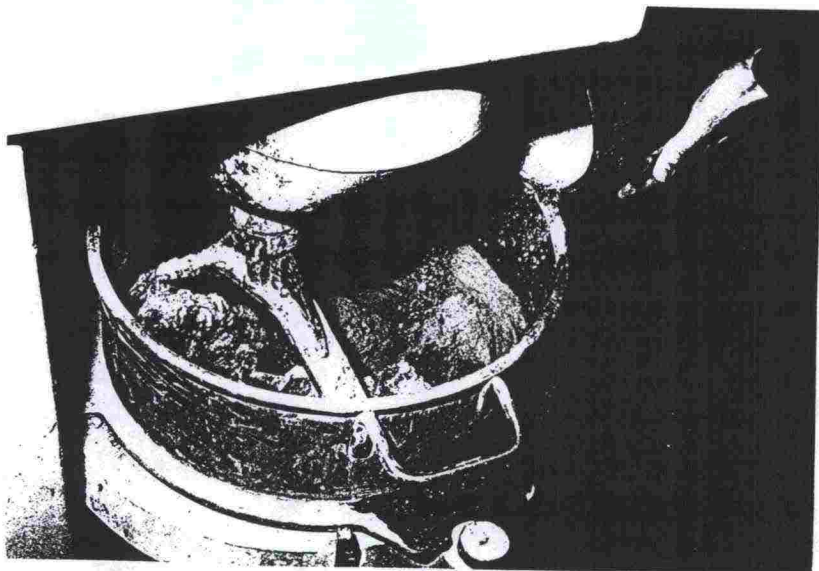
A. Aluksi vesi ja savi punnittiin ...



B. ... sekoituskuuhon.



C. Sitten ne sekoitettiin ja ...



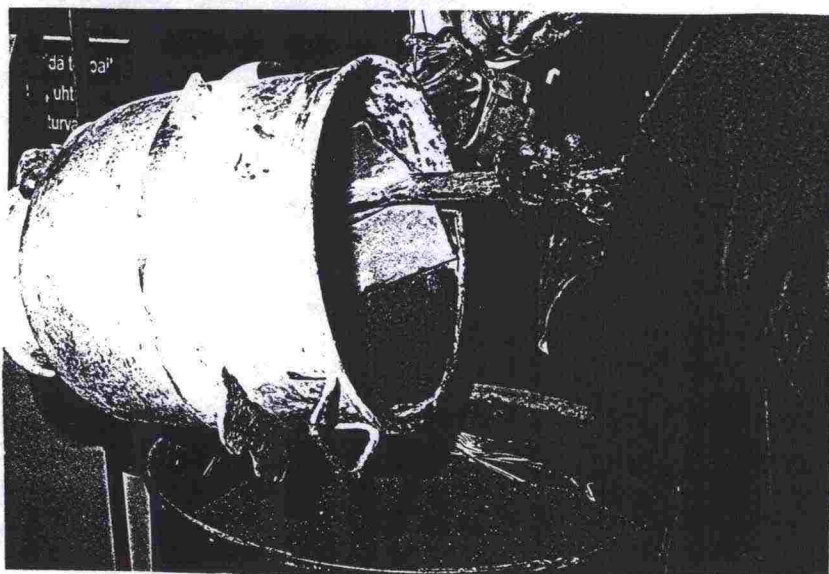
D. ... edelleen sekoittaen
lisättiin sideaine.



E. Sekoitusta jatkettiin, kunnes massa oli
homogenista.



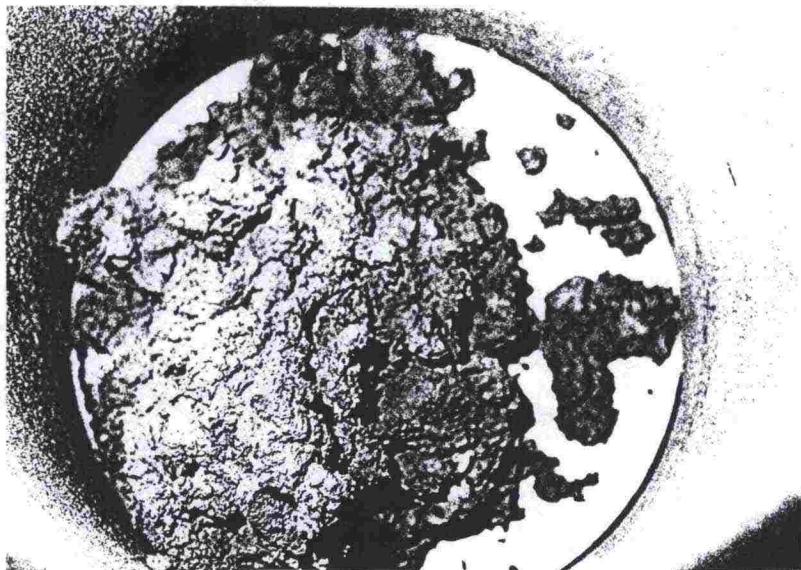
F. Vispilä ja ...



G. ... sekoituskulho ...



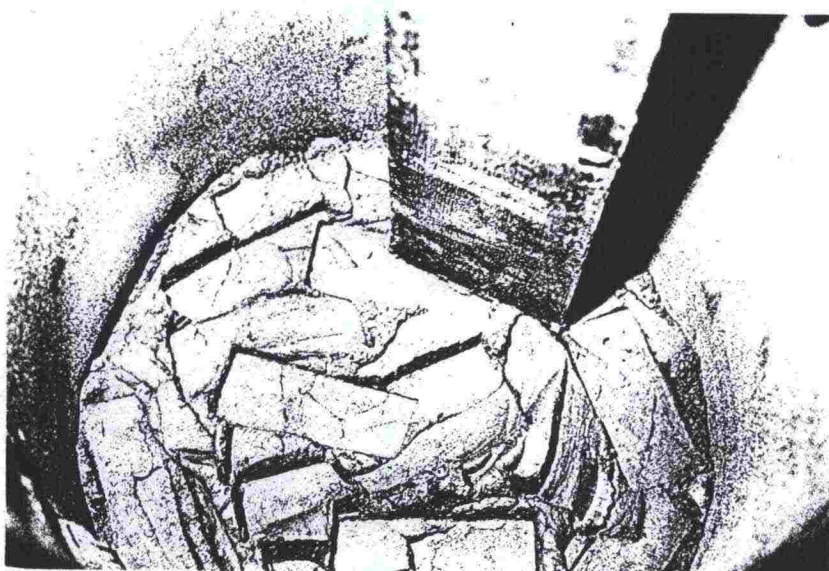
H. ...



I. ... tyhjennettiin tynnyriin.



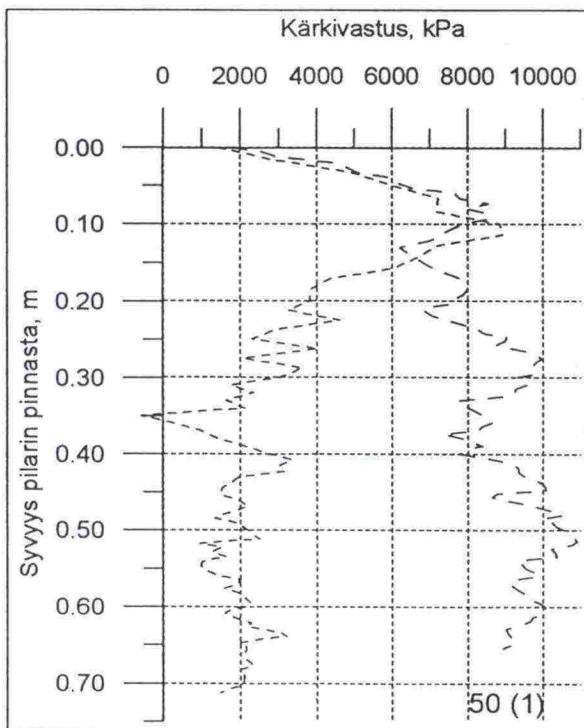
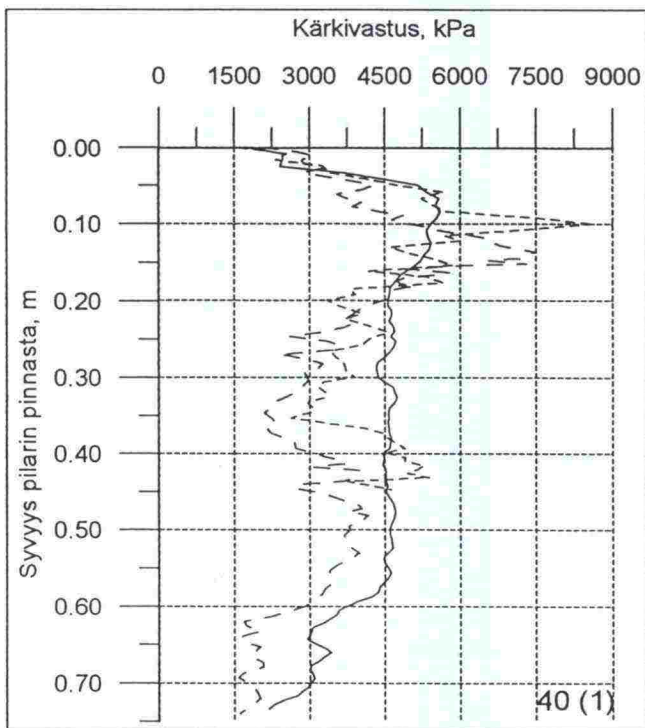
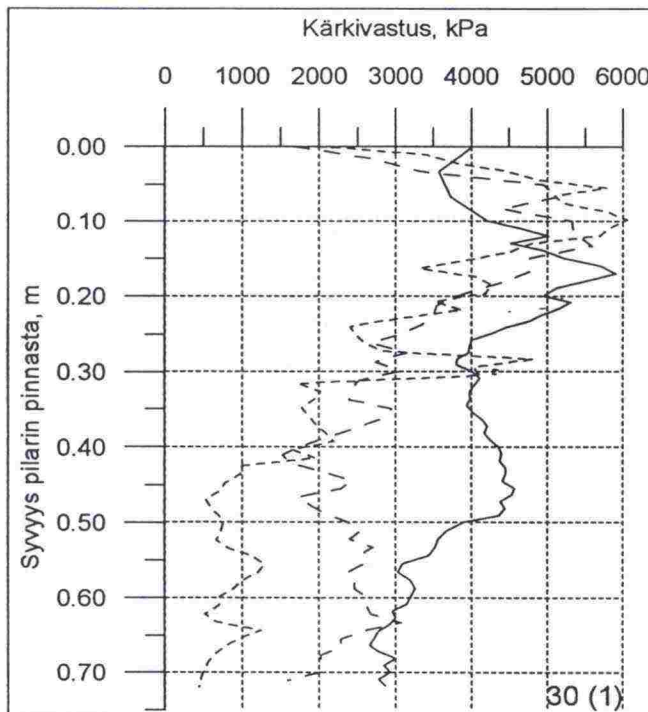
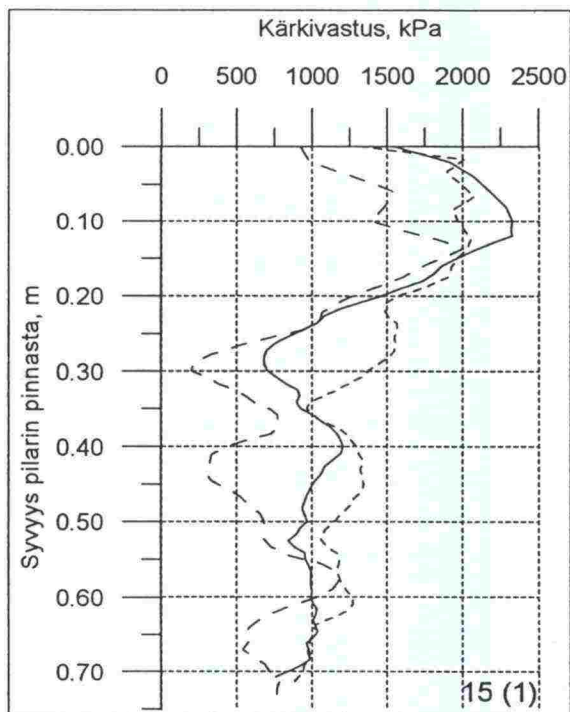
J. Lopulta massa-annos tiivistettiin ...



K. ... puujuntalla. Sitten alettiin valmistaa uutta annosta.

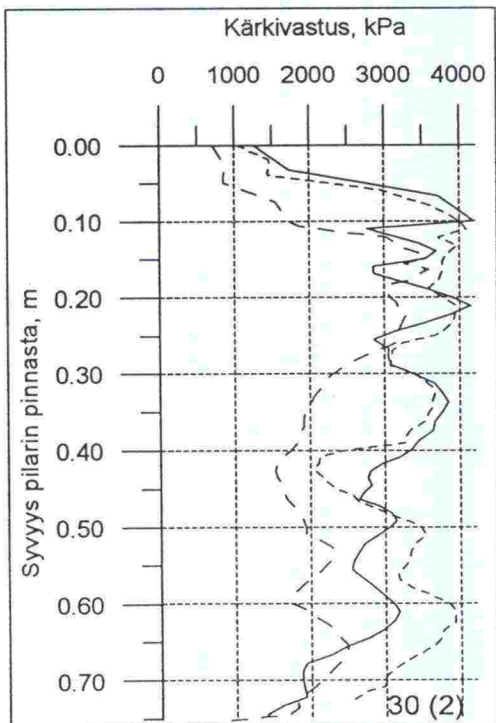
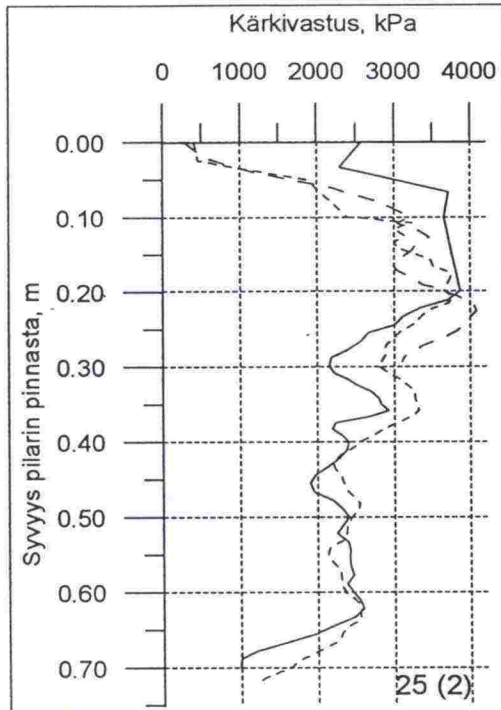
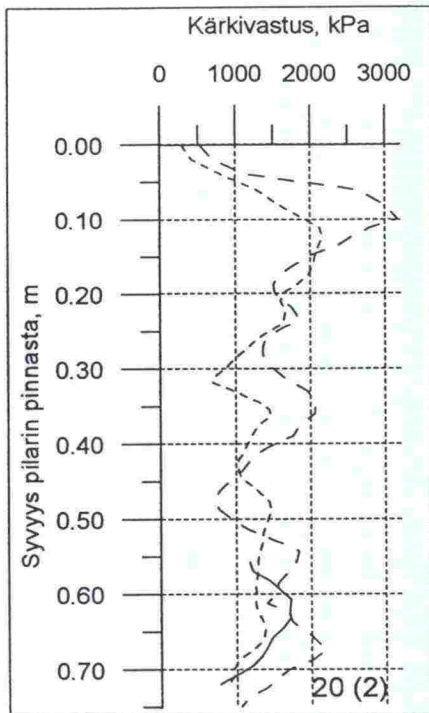
Koesarjan 1 puristinkairausten kärkivastusdiagrammit.

- keskimääräinen kairaus
- - - - - laitimmaisiet kairaukset
-



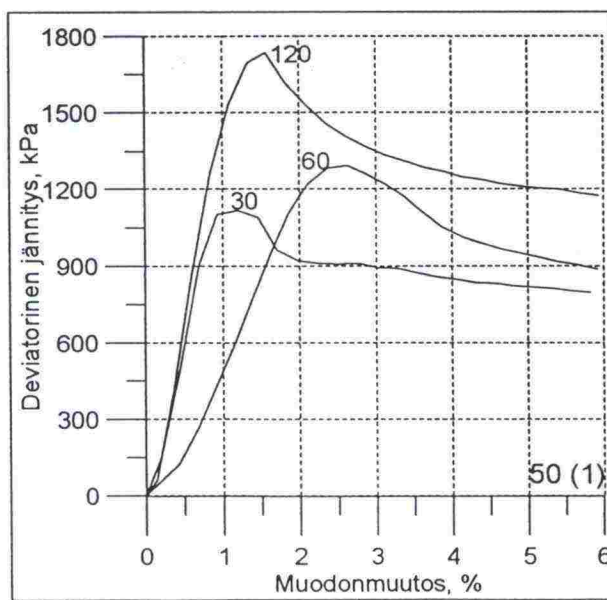
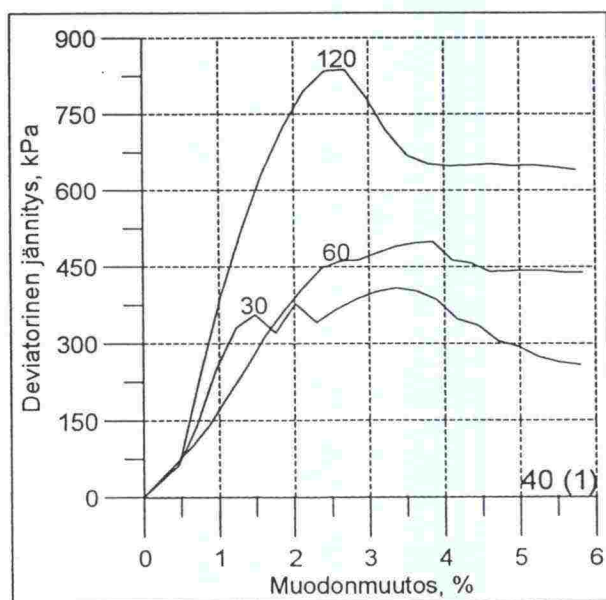
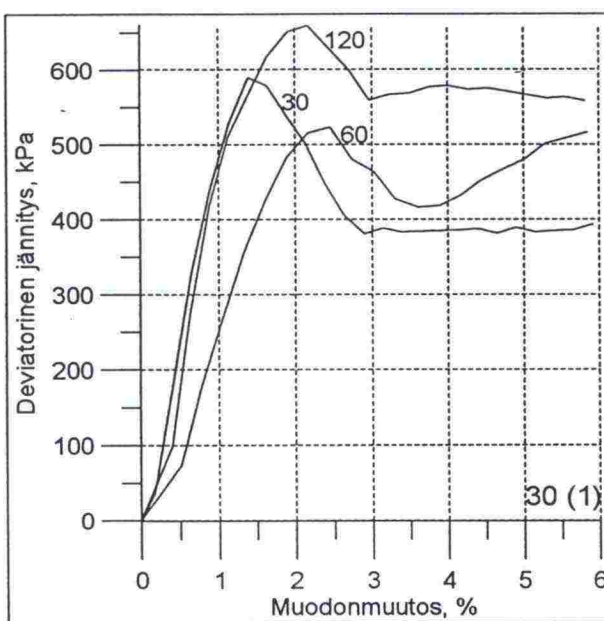
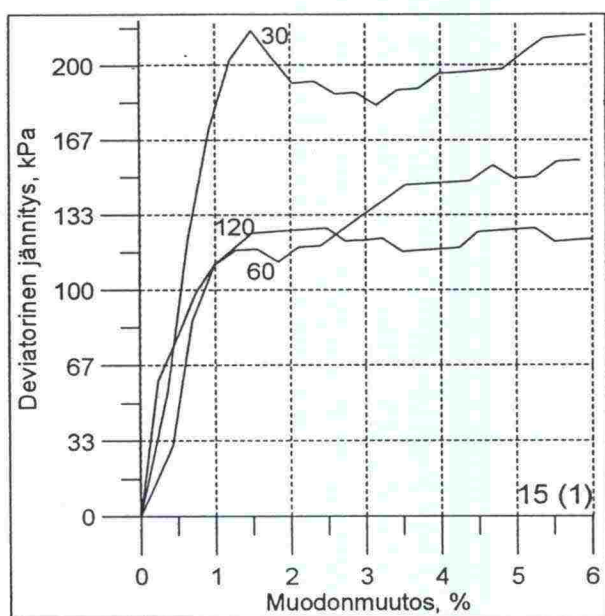
Koesarjan 2 puristinkairauksen kärkivastusdiagrammit.

- keskimäinen kairaus
- - - - - laitimaiset kairaukset
-



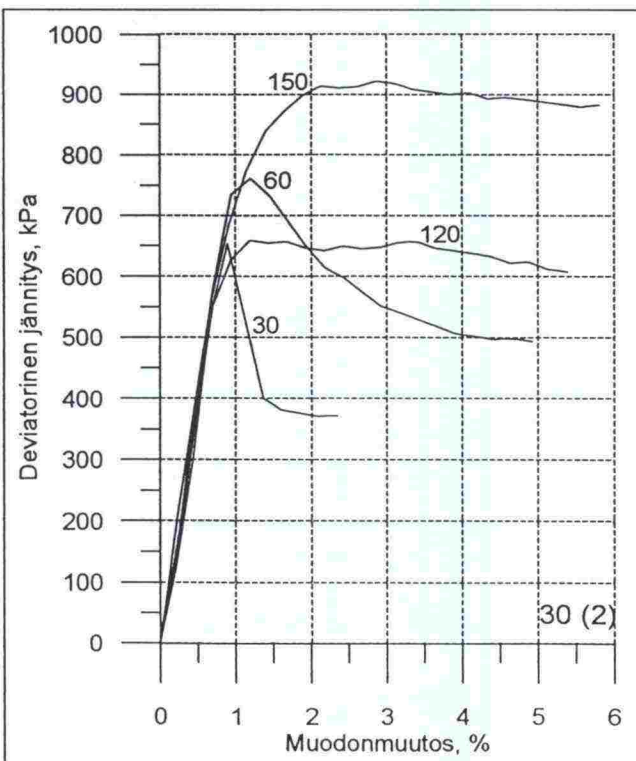
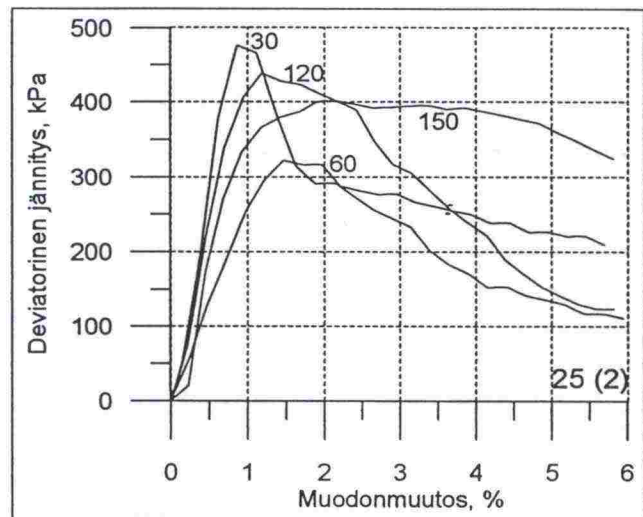
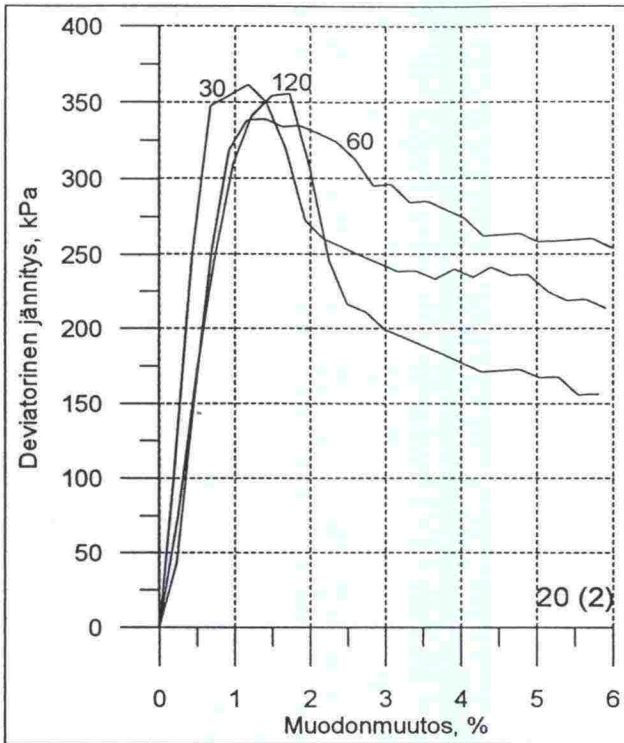
Koesarjan 1 kolmiakiaalikoekiden tulokset: deviatorinen jännitys - muodonmuutos -kuvaajat.

Sivupaineet $\sigma_3 = 30, 60$ ja 120 kPa.



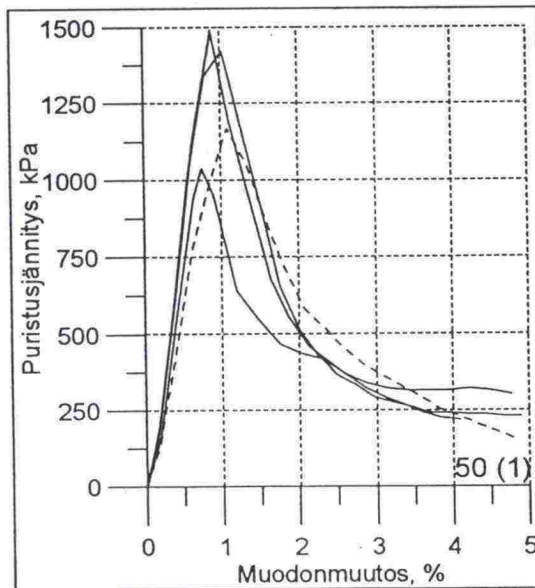
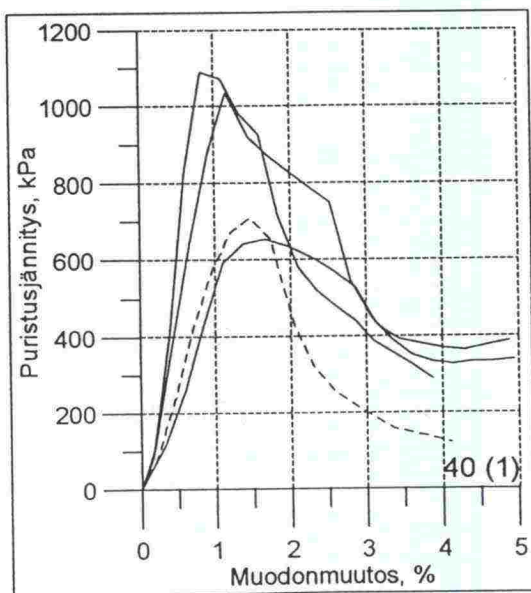
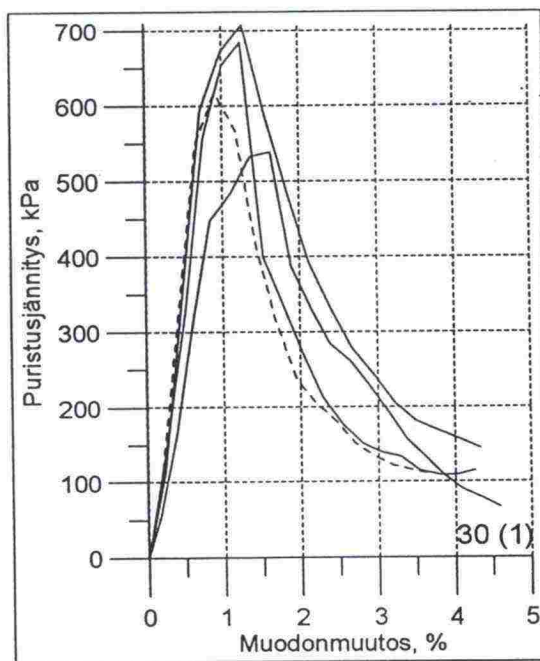
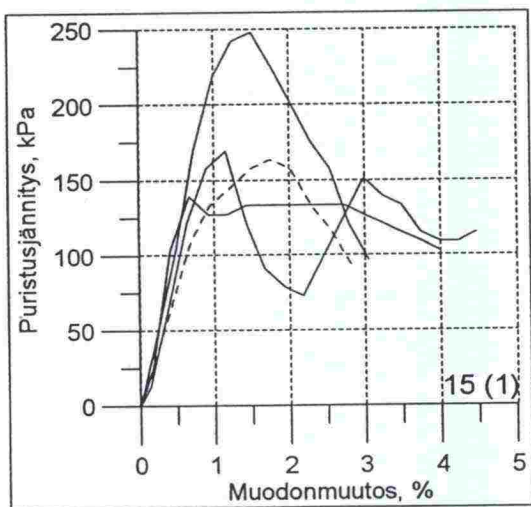
Koesarjan 2 kolmiakiaalikokeiden tulokset: deviatorinen jännitys - muodonmuutos -kuvaajat.

Sivupaineet $\sigma_3 = 30, 60, 120$ ja 150 kPa.

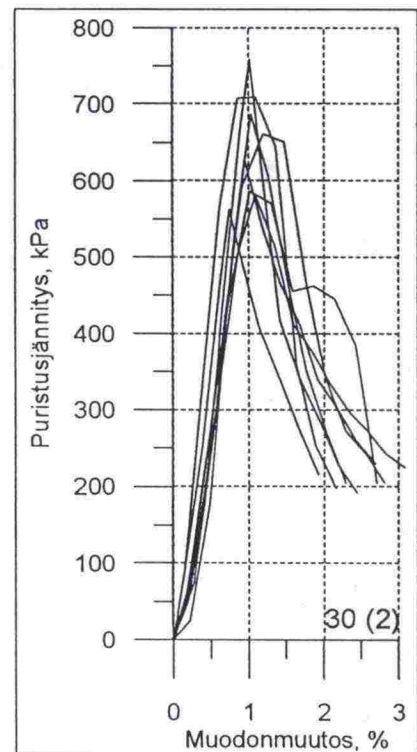
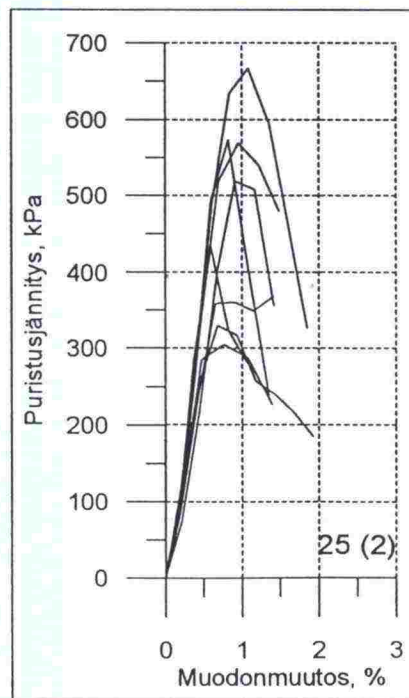
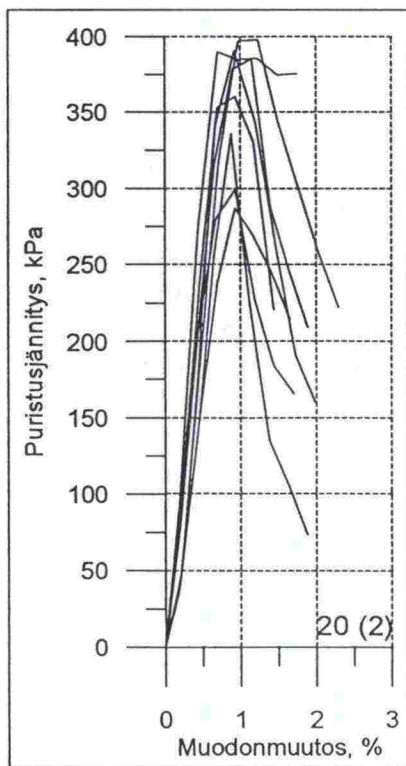


Koesarjan 1 puristuskoekes tulokset: puristusjännitys - muodonmuutos -kuvaajat.

- pilarista otettu näyte
- rinnakkaisnäyte



Koesarjan 2 puristuskokeiden tulokset: puristusjännitys - muodonmuutos -kuvaajat.



"Sovellettuja kartiokokeiden" tulokset.

ikä (d)	pud.kork. (mm)	nimi	painuma (mm)					ka (mm)
34	50,5	30k1	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	8,5
34	50,5	30a1	9,0	9,5	8,5	9,0	8,5	8,8
34	50,5	30a1	10,5	10,0	8,5	9,0	9,5	9,5
34	50,5	30y2	8,5	8,0	8,5	11,5	9,0	8,7
34	20,5	30a2	6	6	7	6,5	6,5	6,3
34	20,5	30y3	5,5	5,5	5,5	5	5,5	5,5
34	20,5	30k3	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
34	20,5	30a3	7	6,5	7	6,5	6,5	6,7
34	35	30k2	7,5	7,5	8	7,5	7	7,5
34	35	30y4	8,5	10	8	9	8	8,5
34	35	30k4	8	8	8	7,5	7,5	7,8
34	35	30a4	8	8	8	8	8,5	8,0

ikä (d)	pud.kork. (mm)	nimi	painuma (mm)					ka (mm)
31	50,5	25y1	9	10	9,5	10	10,5	9,8
31	50,5	25k1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
31	50,5	25a1	9,5	9	9,5	9	9,5	9,3
31	50,5	25y2	9	9,5	9	9,5	9,5	9,3
32	20,5	25a2	6,5	7	6,5	7	7	6,8
32	20,5	25y3	6,5	6	6,5	6	7	6,3
32	20,5	25k3	6	6	6	6	5,5	6,0
32	20,5	25a3	6,5	7	6,5	7	7	6,8
31	35	25k1	8	8,5	9	9,5	9,5	9,0
31	35	25y2	9,5	9	9	9	9	9,0
32	35	25y3	8,5	8,5	9	8	9	8,7
32	35	25a3	8	9	9	9	8	8,7

ikä (d)	pud.kork. (mm)	nimi	painuma (mm)					ka (mm)
31	50,5	20k1	9,5	10,5	10,5	10	9,5	10,0
31	50,5	20k1	10,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
31	50,5	20a1	10,5	9,5	10,5	10,5	10	10,3
31	50,5	20y2	9,5	10	10	10,5	10	10,0
31	20,5	20a2	8,5	7,5	7	7,5	7,5	7,5
31	20,5	20a2	7,5	8	9	8,5	7,5	8,0
31	20,5	20y3	7	7,5	7,5	7	7,5	7,3
31	20,5	20k3	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7,5
31	20,5	20k3	7	7	7,5	7	7,5	7,2
31	20,5	20a3	7,5	7,5	7,5	8	8,5	7,7
31	20,5	20a3	7,5	7,5	7,5	7,5	8	7,5
31	35	20k2	9,5	9,5	9,5	9	9,5	9,5
31	35	20k2	9,5	9	8,5	8,5	9	8,8
31	35	20y4	10,5	10	10,5	10	9	10,2
31	35	20y4	11	11	9,5	10	9,5	10,2
31	36	20k4	11	10,5	9,5	9	9	9,7

Kumulatiiviset lämpöastevuorokausisummat eri pilareille.

- a Koesarjan 1 pilari 50
- b Koesarjan 1 pilari 40
- c Koesarjan 1 pilari 30
- e Koesarjan 2 pilari 25
- f Koesarjan 2 pilari 20
- g Koesarjan 1 pilari 15

Käyrää d (koesarjan 2 pilari 30) ei valitettavasti ole voitu piirtää lämpötilatietojen siirrossa tapahtuneen häiriön vuoksi.

Pilarin kumulatiivinen lämpöastevuorokausisumma on laskettu kaavalla

$$\Sigma\{(sisälämpötila) - (ulkolämpötila)\} \cdot aika\}$$

