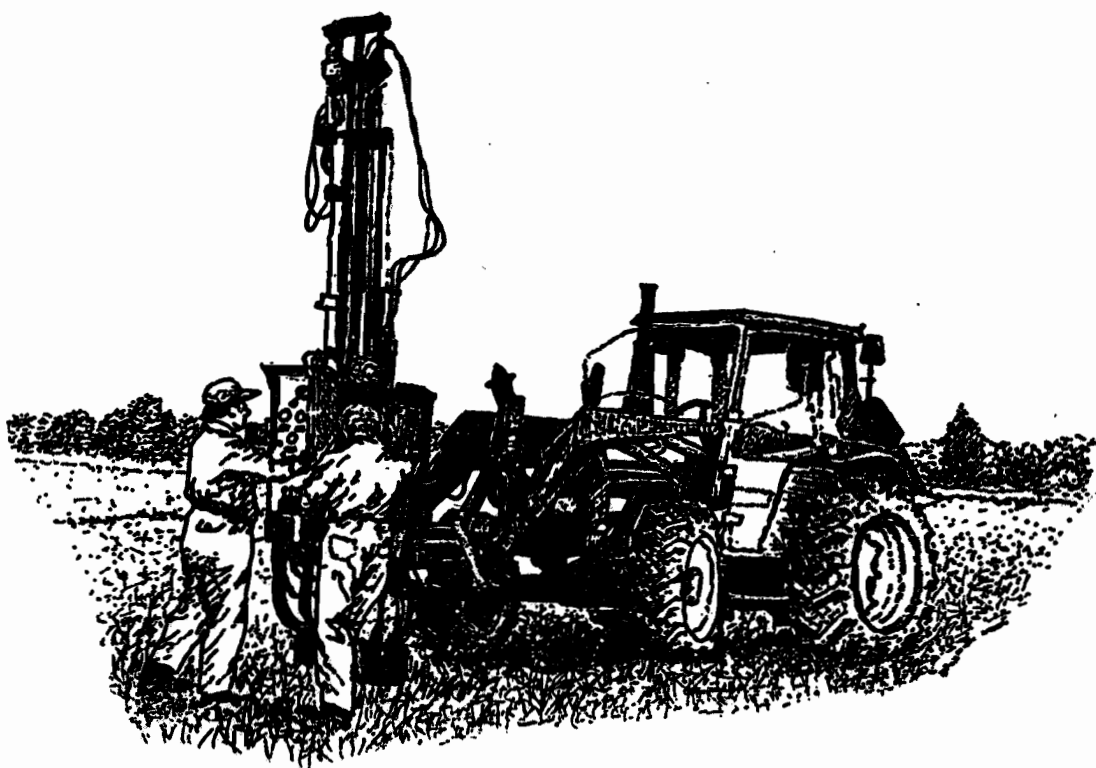




Kari Melander

**PURISTIN – HEIJARIKAIRAUS
KAIRAUSMENETELMÄNÄ**

Geoteknisen osaston tiedote 48

KORJAUKSIA:

ALKULAUSE

Korjaus 4. kappaleeseen:

Työtä valvovaan ryhmään ovat lisäksi kuuluneet prof. Kalle-Heikki Korhonen Teknillisestä korkeakoulusta, DI Jaakko Heikkilä ja ins. Hannu Kärkiö Viatek Oy:stä, DI Pentti Salo Tie- ja vesirakennushallituksesta, Jouko Törnqvist VTT:n geotekniikan laboratoriosta sekä Usko Anttikoski Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekniseltä osastolta.

S. 69, 3. rivi alh.

Po. 2) Annetut kitkakulman arvot pätevät hiekalle. Silttiselle maalle tehdään 2^o lisäys.
2) Annetut kitkakulman arvot pätevät hiekalle. Silttiselle maalle tehdään 2^o vähennys ja soralle 2^o lisäys.

S. 72, 5. rivi

Po. k' kerroin, joka vaihtelee pilarissa 0.06...0.12 %
k' kerroin, joka vaihtelee pilarissa 0.06...0.12

ALKULAUSE

Geoteknisellä osastolla on ollut jatkuvana kehittämiskohteenä kaupunkiolosuhteisiin soveltuva kairausmenetelmä, joka olisi myöskin kairaushenkilöstön työterveyden kannalta mahdollisimman sopiva.

1980-luvun alussa kehitettiin geoteknisellä osastolla puristin-heijarikairauslaite, joka osoittautui erittäin toimivaksi. Myöhemmin laitteeseen sovitettiin atk-rekisteröintijärjestelmä. Puristin-heijarikairaus on geoteknisellä osastolla syrjäyttämässä mm. painokairauksen, sillä yli puolet kairauksista tapahtuu jo tällä uudella menetelmällä. Tämän tutkimuksen jälkeen on puristin-heijarikairamenetelmää kehitetty edelleen sijoittamalla kairauslaite uudelle erikseen suunnitellulle työkonealustalle.

Lähes kymmenen vuoden kuluessa tapahtuneen kehittämistyön ansiosta on geoteknisellä osastolla käytettävissä vuoden 1989 alussa nykyaikainen monikäyttöinen "totaali-kairalaite", jolla saadaan luotettavia kairaustuloksia. Myös kairaushenkilöstön kannalta menetelmä on toimiva.

Tässä tiedotteessa selvitetään puristin-heijarikairausmenetelmän kairaustulokseen ja tulkintaan vaikuttavia tekijöitä. Tiedote perustuu Kari Melanderin diplomityöhön, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkolan ohjauksessa. Työtä valvovaan ryhmään ovat lisäksi kuuluneet prof. Kalle-Heikki Korhonen Teknillisestä korkeakoulusta, DI Jaakko Heikkilä ja ins. Hannu Kärkiö Viatek Oy:stä sekä DI Pentti Salo Tie- ja vesirakennushallituksesta.

Helsingissä 2.2.1989



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla. Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää maastokokeiden avulla eri tekijöiden vaikutusta puristin-heijarikairausten tuloksiin. Tulosten tulkinnessa on pyritty selvittämään maakerrokset ja maalajit sekä mahdollisuuksien mukaan kärkivastus ja leikkauslujuus.

Puristus- ja pyöritysnopeudet on tutkittu tätä tutkimusta varten valituissa kohteissa. Maalajien, kärkivastuksen ja leikkauslujuuden määrittämisessä on käytetty hyväksi myös muiden projektien tuloksia. Kärkivastuksen määrittämismenetelmän löytämiseksi puristin-heijarikairalle on vertailumenetelmänä käytetty CPTU-kairausta. Määritetyn kärkivastuksen ja leikkauslujuuden välinen yhteys pyrittiin löytämään siipikairausten avulla.

Tämän tutkimuksen perusteella ei puristusnopeuksilla ollut suurta vaikutusta kairausvastukseen. Tankoja pyörittämällä havaittiin saviset silttikerrokset paremmin kuin pyörittämättä tehdyissä kairauksissa. Kärkivastus voidaan puristin-heijarikairalla määrittää lähes kaikissa olosuhteissa riittävällä tarkkuudella.

Puristin-heijarikairauksen puristusvaiheen maalajitulkinnan luotettavuus on hyvä mutta heijarivaiheen vain välttävä. Kärkivastuksen ja leikkauslujuuden välinen yhteys ei ollut hyvä ainakaan tutkituilla koealueilla. Tässä tutkimuksessa yhteenveto on korvattu luvulla 10; suositus puristin-heijarikairausten suorittamiseksi.

ABSTRACT

The report was done at the Geotechnical Department of the City of Helsinki. The object of the research was to clarify by means of field tests how different factors affect the results on the static-dynamic penetration test (SDPT). Layers and soil types as well as the cone resistance and the shear strength have been interpreted with the SDPT results whenever possible.

The tests concerning the speed of the penetration and the rotation were carried out on the test areas especially chosen for the research. The results of other projects were utilized also in the determination of the soil types, the cone resistance and the shear strength. In order to define the right method to calculate the cone resistance from the SDPT results, the CPTU has been used as the reference method. The correlation between the cone resistance determined in the SDPT, and the shear strength was defined by using vane tests.

The speed of the penetration did not have any significant influence on the penetration resistance. When the rods were rotated the clayey silt layers were detected with better reliability than without rotation. The accuracy of the cone resistance determination is in most circumstances satisfactory with the SDPT.

The indication of the soil layers in static period is good but in the dynamic period only satisfactory. The correlation between the cone resistance and the shear strength was poor in the test areas. The summary of the report has been replaced by chapter 10; the recommendation for the static-dynamic penetration test.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

MERKINNÄT

LIITELUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	PURISTIN-HEIJARIKAIRA.....	3
	2.1 Kehitys.....	3
	2.2 Laitteisto.....	4
	2.3 Kairaus.....	8
	2.4 Rekisteröinti.....	9
3.	KOEALUEET.....	12
	3.1 Koealueiden laajuus.....	12
	3.2 Torpparinmäki.....	12
	3.3 Mellunkylä.....	14
	3.4 Tapanila.....	14
4.	PURISTUSNOPEUS.....	17
	4.1 Puristusnopeuksien valinta.....	17
	4.2 Puristusnopeuksien vertailu.....	20
5.	TANKOJEN PYÖRITYS.....	26
	5.1 Pyöritysnopeuksien valinta.....	26
	5.2 Pyöritysnopeuksien vertailu.....	27
6.	PURISTUSVOIMA.....	39
	6.1 Laitteiston asettamat rajoitukset.....	39
	6.2 Tuloksien havainnollisuus.....	39
	6.3 Puristusvoiman ja iskuluvun vastaavuus.....	42
	6.4 Tankojen vaikutus.....	44
7.	TULOSTEN TULKINTA.....	47
	7.1 Kärkivastus.....	47
	7.2 Vaippavastus.....	51
	7.3 Maakerrokset ja maalajit.....	55
	7.4 Leikkauslujuus.....	60
	7.5 Muut parametrit.....	65
	7.6 Syvästabiloitujen pilarien valvontakairaukset	70
	7.7 Tulosten esitystapa.....	73

8.	VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN.....	75
8.1	Painokaira.....	75
8.2	Heijarikaira.....	79
8.3	Puristinkaira (CPT).....	82
9.	VIRHELÄHTEET.....	89
9.1	Laitteiston aiheuttamat virheet.....	89
9.2	Käyttäjän virheet.....	91
9.3	Täytteen aiheuttama virhe.....	92
10.	SUOSITUS PURISTIN-HEIJARIKAIKAUSTEN	
	SUORITTAMISEKSI.....	95
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	
	LIITTEET.....	

MERKINNÄT

A	pilarikairan puristusala m^2
A_C	kärjen pinta-ala m^2
A_S	vaipan pinta-ala m^2
B	perustuksen leveys m kärjen halkaisija m
C	kokoonpuristuvuusvakio
C_1	korjauskerroin perustamissyvyydelle
C_2	korjauskerroin hiipumalle
D	tankojen halkaisija m
E_{blow}	järkäleen iskuenergia kNm
E_{skin}	vaippakitkan energia kNm
F	hienousluku puristusvoima kN
F_S	pyörityksen voima kN
F_{tot}	puristusvoima (lis. tankojen painot) kN
F_{wst}	painokairauksen puristusvaihe kN
I_p	plastisuusluku %
I_z	muodonmuutosten vaikutuskerroin
I_{zp}	maksimi muodonmuutos vaikutuskerroin
L	perustuksen pituus m tankojen pituus m
M	kokoonpuristuvuusmoduuli kN/m^2 vääntömomentti Nm
ΔM	vääntömomentin kasvu Nm/m
N_C	kantavuuskerroin
N_{cone}	kärkivastuksen iskuluku lyöntiä/0.2 m
N_{skin}	vaippakitkan iskuluku lyöntiä/0.2 m
N_{wst}	painokairauksen kiertovaihe puolikierrosta/0.2 m
N_{20}	iskuluku lyöntiä/0.2 m
R	pyöritysnopeus r/min
S_S	sensitiivisyys
d	halkaisija mm
f_s	vaippavastus kPa, MPa
g	kiihtyvyys m/s^2
h	korkeus m nimellinen pudotuskorkeus m

h'	tehokas pudotuskorkeus m
k	veden läpäisevyys m/s
k'	kerroin
m_o	järkäleen massa kg
n	maakerrosten lukumäärä
Δp	lisäkuorma perustamissyvyydessä kPa
q_c	kärkivastus MPa
q_{c1}	kärkivastus, vääntömomenttia ei huomioitu MPa
q_{c2}	kärkivastus, vääntömomentti huomioitu MPa
r	kierroslukumäärä
r_c	kärjen säde m
s	matka m
	painuma m
s_u	suljettu leikkauslujuus kN/m ²
t	aika a
u	huokospaine kPa
v	puristusnopeus cm/s, m/min
w	vesipitoisuus %
x	kerroin perustusten muodolle
z	syvyys m
Δz	maakerrosten paksuus m
$(z/B)_{cr}$	kriittinen syvyys
$\emptyset$	halkaisija mm
α	kärkikulma °
	suhteellisuuskerroin
	tehokkuuskerroin
σ_{vo}	vallitseva jännitys kN/m ²
σ'_{vo}	tehokas vallitseva jännitys kN/m ²
σ'_{vp}	tehokas vallitseva jännitys kN/m ²
$\Delta \sigma$	jännityksen lisäys maassa kN/m ²
τ_p	pilarin leikkauslujuus kN/m ²
τ_{av}	keskimääräinen vaippakitka kPa

LIITELUETTELO

Liite 1 Mellunkylän koealueen kartta

Liite 2 Mellunkylän kairauspisteiden taulukko

Liite 3 Torpparinmäen koealueen kartta

Liite 4 Torpparinmäen kairauspisteiden taulukko

liite 5 Tapanilan koealueen kartta

Liite 6 Tapanilan kairauspisteiden taulukko

1. JOHDANTO

Painokaira on yleisin pohjatutkimusväline Suomessa. Kairaustulostusta on kehitetty vuosien kuluessa, mutta itse menetelmä on säilynyt samanlaisena. Kairaustuloksista saatava informaatio ei ole lisääntynyt kalustokehityksen myötä. Monenlaisesta kalustosta johtuen kairauksia ei suoriteta täysin samalla tavalla, jolloin tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Heijarikairaus soveltuu kitkamaiden maaperätutkimuksiin, mutta menetelmän puutteena on heikko koheesiomaalajien tunnistettavuus. Puristinkairauksen etuna on nopeus ja saatavan tiedon tarkkuus. Suomen kivisen maaperän takia se ei sellaisenaan aina sovellu olosuhteisiimme.

Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa on kehitelty viime aikoina totaalikairoja sekä menetelmiä, jotka ovat periaatteiltaan samantapaiset. Suomessa kehitetään puristin-heijarikairausmenetelmää, jolla voidaan selvittää sekä koheesio- että kitkamaiden ominaisuudet samalla laitteella. Puristin-heijarikairausmenetelmää on kehitelty noin kymmenen vuotta, ja laitteesta on noin viiden vuoden käyttökokemukset.

Tämän työn tavoitteena on ollut selvittää maastokokeiden avulla eri tekijöiden vaikutusta kairaustuloksiin. Tarkoituksena oli myös kehittää menetelmää siten, että tulosten luotettavuus ja informaatio ovat vähintään yhtä hyviä kuin paino- ja heijarikairauksessa. Tulosten tulokinnassa on pyritty selvittämään maakerrokset ja maalajit sekä mahdollisuuksien mukaan kärkivastus ja leikkauslujuus.

Tätä työtä varten tehtiin 71 kairausta (yhteensä noin 950 m) ja näytteitä otettiin noin 85 kpl. Lisäksi on käytetty hyväksi muiden projektien tuloksia. Menetelmän kehittäminen vaatii vielä paljon uusien tietojen keräämistä ja vanhojen analysointia.

Kairausdiagrammeissa esiintyvät maalajitulkinnat perustuvat näytteisiin ja kirjoittajan omaan tulkintaan. Menetelmästä voitaneen antaa Suomen geoteknillisen yhdistyksen suositus kairausten suorittamiseksi vuoden 1990 aikana.

2. PURISTIN- HEIJARIKAIRA

2.1 Kehitys

Pohjoismaissa, etenkin Suomessa ja Ruotsissa, maaperäolosuhteet poikkeavat selvästi esimerkiksi Keski-Euroopan kitkamaista, joissa puristinkairaus on hyvä pohjatutkimusmenetelmä. Tämän vuoksi Pohjoismaissa kehitys on suuntautunut ns. totaalikairauksen kehittämiseen. Totaalikairalla tarkoitetaan laitetta, jolla voidaan tehdä erityyppisiä kairauksia. Siirtyminen kairauslajista toiseen tapahtuu helposti laitteistoa tai kairausvarustusta muuttamalla.

Norjalaiset ovat kehittäneet kiertopuristinkairausmenetelmää 1960-luvun loppupuolelta lähtien. Kairaus tapahtuu nimen mukaisesti puristamalla ja kiertämällä tankoja samanaikaisesti. Kärkikappale muistuttaa painokairan kärkeä, mutta se on kuitenkin suurempi. Käytössä on ollut myös kalliokruunukärki. Ruotsissa on kehitelty 1970-luvulta lähtien puristin-heijarikairaa muistuttavaa laitetta. Kärkinä on kokeiltu useita eri malleja, mm. teleskoopikärkeä, jolla voidaan kärkivastus määrittää tankoja nostamalla ja painamalla /15/.

Heijarikairaus soveltuu tiiviiden kitkamaiden tutkimiseen ja varsinkin paalujen arvioidun tunkeutumissyvyyden määrittämiseen. Koheesiomaiden maaperätutkimuksiin heijarikairaus ei sovellu. Painokairaa käytetään pääasiassa löyhien kitka- ja koheesiomaiden maaperätutkimuksiin. Painokairauslaitteistoa on kehitelty ns. punttikairauksesta monitoimikairaukseen, koska mm. työterveydellisiä riskejä haluttiin vähentää. Kuitenkaan monitoimikairalla ei voida tehdä heijari- tai puristinkairausta, vaikka kairauslaitteiston hankintahinta on huomattavasti korkeampi kuin moottoripainokairan. Puristinkairaus soveltuu koheesio- ja kivettömien kitkamaiden tutkimiseen, mutta sen vähäiset kokemukset Suomessa ovat keskittyneet muutamille käyttäjille. Suomen maaperäolosuhteisiin soveltuvan kai-

rausmenetelmän tarve ja työturvallisuuden huomioiminen johtivat uuden kairausmenetelmän kehittämiseen.

Koska puristinkairaus (CPT) ja heijarikairaus yhdessä soveltuvat hyvin Suomessa maaperätutkimuksiin, Helsingin kaupunki aloitti puristin- heijarikairan kehittämisen vuosina 1978 - 79 /17/. Puristinkaira oli asennettu traktoriin, ja kairaus suoritettiin niin syväälle kuin oli mahdollista. Kairauksen aikana tankoja ei pyöritetty. Puristinkairauksen jälkeen traktori siirrettiin pois ja paikalle asennettiin vapaapudotusheijarikaira. Mikäli kohdattiin uudestaan löyhää maata, siirryttiin takaisin puristinkairaukseen. Tämän perusteella Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla aloitti Kärkiö puristin- heijarikairalaitteiston kehittämisen vuonna 1983 aluksi Geofinn Oy:n kanssa yhteistyössä. Myös muualla Suomessa on ollut samantapaisia kehitysajatuksia. Ainakin Savola ja Murremäki kokeilivat ja kehittivät omaa puristin-heijarikairaa 1970-luvulla.

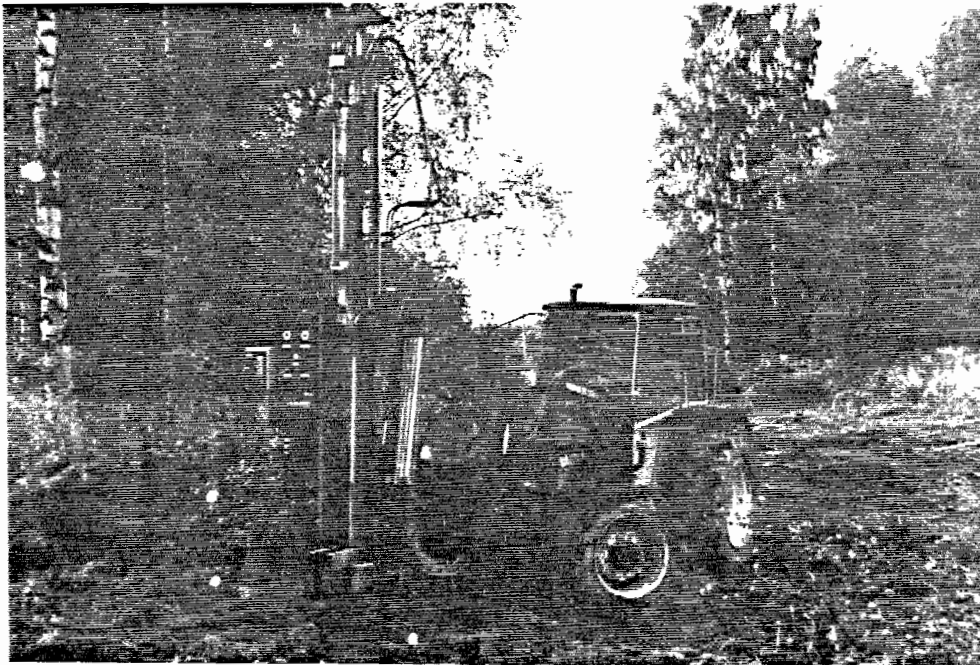
Puristin- heijarikairaus on yhdistelmäkairaus, jossa on mukana mekaaninen puristin- sekä heijarikairaus ja lisäksi tankoja pyöritetään jatkuvasti. Viimeisen kolmen vuoden aikana kairasta on saatu paljon kokemuksia. Automaattinen rekisteröintilaitte otettiin Helsingin kaupungilla käyttöön vuonna 1987. Tällä hetkellä puristin-heijarikairoja on käytössä neljä kappaletta: kaksi Helsingin kaupungilla ja kaksi Viatek Oy:llä.

2.2 Laitteisto

Puristin- heijarikaira käsittää kairamaston, joka on asennettavissa erilaisiin alustoihin. Käytännössä soveltuvimmat vaihtoehdot ovat telavetoinen alusta tai traktori. Pienellä alueella toimittaessa on traktorialusta usein käyttökelpoisempi, koska traktorilla voidaan liikkuu kätevästi lyhyet etäisyydet. Traktoria voidaan käyttää myös muihin töihin, jos kairamasto on irrotettava.

Jos laitteiston kuljetus tehdään lavetilla (esim. kuljetusmatkat pitkiä), telavetoinen alusta on myös käytännöllinen. Telavetoisen alustan hyvänä puolena on pidettävä sen maastokelpoisuutta mm. heikosti kantavilla maaperillä.

Tämän työn puristin- heijarikairaukset on suoritettu Insinööritoimisto Geotuote Oy:n (IGT) valmistamilla HK-sondeilla, jotka on asennettu nelivetoisiin maataloustraktoreihin, kuva 1 ja kuva 2. Käytössä oli kaksi puristin-heijarikairausyksikköä. Toiseen kairamasto oli asennettu traktorin taakse nostolaitteisiin ja toisessa etunostolaitteisiin.

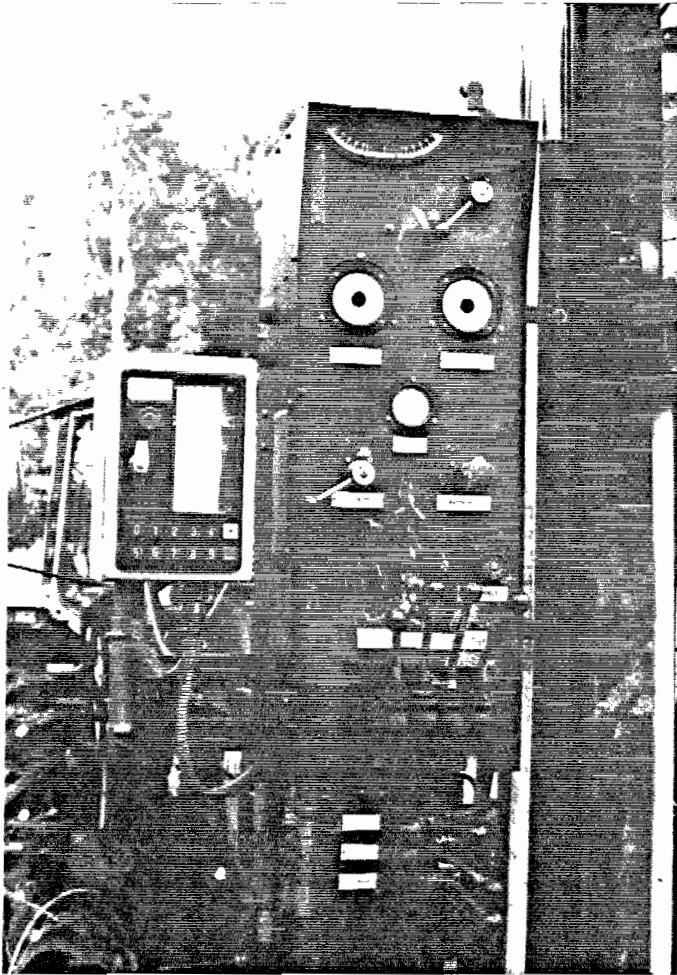


Kuva 1. Puristin-heijarikairausyksikkö.

Suomessa kehitetyssä puristin- heijarikairausmenetelmässä pyöritetään kairauksen yhteydessä tankoja vakionopeudella. Menetelmässä mitataan seuraavia suureita:

- puristusvoima
- vääntömomentti
- kairaussyvyys
- iskujen määrä
- puristusnopeus
- pyörityskierrosten määrä.

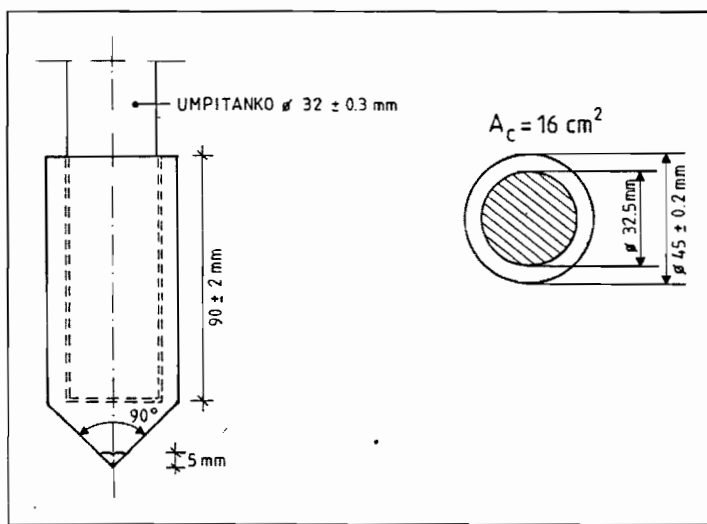
Helsingin kaupungin HK- sondeissa puristusvoima ja vääntömomentti mitataan hydraulipaineen tulo- ja menoputkien paine-erona. Kaikki suureet mitataan mekaanisesti. Puristus- ja pyöritysnopeuden mittaamisessa tarvitaan myös kelloa. Käytössä on myös HK-sondeja, joissa puristusvoima mitataan erillisen hydraulisylinterin avulla ja vääntömomentti määritetään kokonaishydraulipaineesta.



Kuva 2. Puristin-heijarikairan ohjauspaneeli (HK-sondi).

Puristin- heijarikairan kärkenä käytetään heijarikairan irtokärkeä. Siinä ei ole minkäänlaista kiinnitystä tankoihin, joten se jää lähes aina maahan tankoja nostettaessa ylös. Kärki on pyöreä $\varnothing 45/90$ mm, jossa kärkikulma(α) on 90° (kuva 3). Kärjen pinta-ala (A_C) on $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ja vaipan pinta-ala (A_S) on $1.27 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. Tämän työn alkuvaiheessa kärki yritettiin kiinnittää tangon päähän kiinni siten, että se ei pyörisi tankojen mukana.

Kärjen sisäpintaa ja tangon päätä sorvattiin sellaiseksi, että kitka olisi mahdollisimman pieni. Lisäksi tanko ja kärki rasvattiin hyvin. Tuloksista oli kuitenkin pääteltävissä, että kärki pyöri tankojen mukana, joten tulosten tulkinnessa on kärjen pyöräminen huomioitu. Helsingin kaupunki on kokeillut myös ruotsalaisten käyttämää kärkeä, joka ei pyöri tankojen mukana. Se ei kuitenkaan ollut kestävä ja sen valmistuskustannukset olivat korkeat.



Kuva 3. Puristin-heijarikairan kärki /30/.

Alte /1/ tutki Ruotsissa vuonna 1983 puristusnopeuden, pyöritysnopeuden ja kärjen muodon vaikutusta tuloksiin. Kokeiltavia kärkiä oli kolmea eri mallia:

- kierteinen kärki (painokairan kärkeä muistuttava)
- neliskanttinen kärki
- pyöreä kärki.

Pehmeässä savessa tuloksissa ei havaittu juurikaan eroja, mutta siltti- ja hiekkakerrokset savessa tulivat parhaiten esiin neliskanttisella ja pyöreällä muodolla. Kierteisellä kärjellä kerros vaikutti kaikista paksuimmalta ja löyhimmältä. Jokaisella kärjellä havaittiin kuitenkin kerrostumat. Siltissä ja hiekassa neliskanttinen kärki antoi suuremman kairausvastuksen kuin kierteinen kärki, jolla oli kaikista paras tunkeutumiskyky.

Tankokalustona puristin-heijarikairassa käytetään $\varnothing$ 32 mm heijarikairan umpitangostoa. Tangot ovat metrin pituisia ja painavat 6 kg/m. Tangot voivat olla myös pidempiä, jos se on laiteteknisesti mahdollista. Tankokaluston tappioiden pienentämiseksi on mahdollista siirtyä $\varnothing$ 36 mm onttoihin tankoihin. Haittana on vaippakitkan kasvu. Lisäksi tässä työssä esitetyt tulkintamenetelmät eivät ole enää käyttökelpoisia.

2.3 Kairaus

Kairaus aloitetaan puristinkairauksena, jossa kärkeä ja tankoja pyöritetään sekä puristetaan samanaikaisesti. Kun puristuskapasiteetti loppuu, siirrytään heijarikairaukseen (tankoja pyöritetään edelleen). Heijarikairauksesta voidaan siirtyä takaisin puristinkairaukseen, mikäli kairausvastus sitä edellyttää /21/. Kairaus päättyy aina heijarikairaukseen. Ennen tätä työtä puristusnopeutena on käytetty 1.2 m/min ja pyöritysnopeutena 12 r/min. Puristinkairauksesta heijarikairaukseen on normaalisti siirrytty, kun puristusvoima on ylittänyt noin 15 kN. Takaisin puristinkairaukseen on siirrytty, jos heijarin iskuluku on alittanut 5 iskua/0.2 m. Puristusvaiheessa mitataan kokonaispuristusvoima, josta kärkivastus voidaan määrittää. Tankojen pyörittämiseen tarvittavan vääntömomentin avulla voidaan laskea näennäinen vaippavastus. On huomioitava, että normaalissa puristinkairauksessa (CPT) tankoja ei pyöritetä, joten momentista laskettava vaippavastus ei ole sama asia kuin CPT:llä saatava vaippavastus.

Heijarikairausvaihe poikkeaa Suomen geoteknillisen yhdistyksen (SGY) suosituksesta /30/ siten, että tankoja pyöritetään jatkuvasti samalla nopeudella kuin puristusvaiheessakin. Heijarin massa on 65 ± 1.5 kg ja pudotuskorkeus on 50 cm. Kairausvastus ilmoitetaan iskujen lukumääränä 20 cm tunkeutumaa kohden. Taulukossa 1 esitetään puristin-heijarikairauksen vertailu muihin menetelmiin.

Taulukko 1. Puristin-heijarikairausmenetelmän vertailu ISSMFE:n suosituksen mukaiseen CPT-kairaukseen /23/ ja SGY:n suosituksen mukaiseen paino- sekä vapaapudotusheijarikairaukseen /30/.

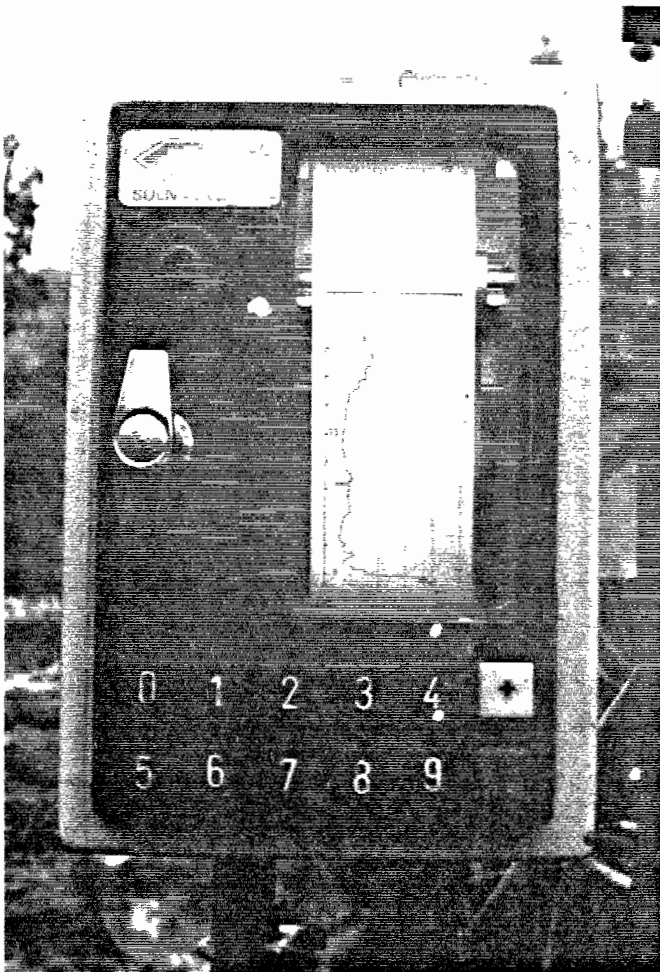
KAIRAUS TEKIJÄ	PURISTIN- HEIJARIKAIRAUS	CPT- KAIRAUS	HEIJARI- KAIRAUS	PAINO- KAIRAUS
Kärjen halk. (mm)	45	36	45	34, kierteinen
Tankojen halk. (mm)	32	36	32	22,25
Järkäle (kg)	63.5	-	63.5	-
Puristusnop. (m/min)	1.2	1.2	-	1.2-3.0
Pyöritysnop. (r/min)	12	-	väh. 1 m:n välein, <10 m 0.2 m:n vä- leihin, ≥10 m	15-50

2.4 Rekisteröinti

Kairaustulokset voidaan rekisteröidä manuaalisesti tai automaattisesti. Manuaalisessa rekisteröinnissä luetaan puristusvoima ja vääntömomentti mittareista. Puristuslu-
kema ja vääntömomentti kirjataan muistiin esimerkiksi 0.2 metrin välein. Heijarikairauksessa merkitään 0.2 metriä kohden tarvittavat iskujen lukumäärät. Manuaalisessa re-
kisteröinnissä ohuet maakerrokset jäävät helposti kairaa-
jalta huomaamatta, ja puristusvoiman sekä vääntömomentin arvot ovat epätarkempia. Lisäksi tulosten tulkinta on hankalampaa kuin automaattisella rekisteröinnillä, jolla saadaan lähes jatkuva kairausdiagrammi.

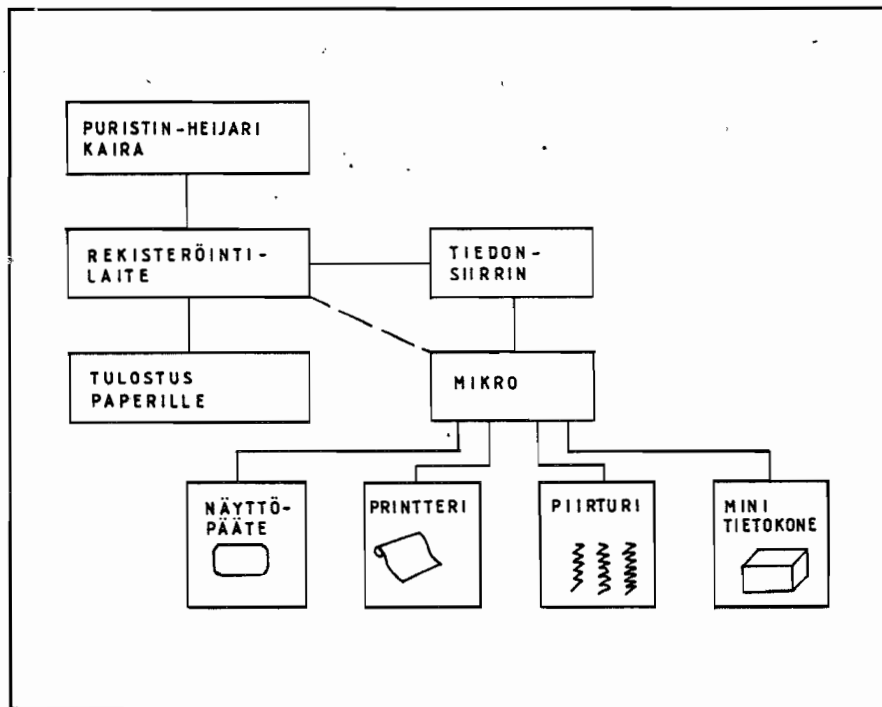
Tämän työn kaikki puristin- heijarikairaustulokset rekis-
teröitiin automaattisesti. Rekisteröintilaitte (kuva 4) on ruotsalaisen Enviromental Mechanics AB:n valmistama Geo-
printer, joka on kiinnitetty ohjauspaneliin. Datamuistiin mahtuu yli 600 metriä puristin- heijarikairaustietoja. Syvyyden mittaustarkkuus on 1 cm. Puristusvoima tallentuu muistiin 4 cm ja vääntömomentti 20 cm kairauksen välein.

Tulosten erottelukyky on puristusvoiman osalla 214 N ja vääntömomentilla 3 Nm. Heijarikairauksessa vääntömomentti rekisteröityy tankojen liikkeen aikana. Tämän vuoksi vääntömomentti saattaa vaihdella melko paljonkin. Heijari-iskujen lukumäärät tallentuvat 4 cm välein, vaikka ne tulostetaankin lyöntiä /0.2 m. Kun kairaustiedot (puristusvoima, vääntömomentti, heijarin lyöntien lukumäärä ja syvyys) tallentuvat muistiin, laitteen piirturi tulostaa samalla myös tiedot hopeapaperille. Kairaaja näkee välittömästi kairausdiagrammin ja mahdolliset häiriöt.



Kuva 4. Puristin-heijarikairan rekisteröintilaitte.

Rekisteröintilaitteesta tiedot puretaan tiedonsiirtimelle (Geostack), jolla ne kuljetetaan purettavaksi mikrotietokoneelle. Rekisteröintilaitteesta voidaan tiedot siirtää myös suoraan mikrolle. Kuvassa 5 on esitetty periaate (Helsingin kaupunki) automaattisesta rekisteröinnistä ja tulosten käsittelystä.



Kuva 5. Periaate puristin-heijarikairauksen automaattisesta rekisteröinnistä ja tulosten käsittelystä (Helsingin kaupunki).

Manuaalisen ja automaattisen rekisteröinnin suurimmiksi eroiksi voidaan esittää seuraavia näkökohtia:

- automaattisella rekisteröinnillä saadaan diagrammeista lähes jatkuva kuvaaja (mittausväli 4 cm)
- automatiikkaa käytettäessä voi yksi kairaaaja tarvittaessa suorittaa koko työn
- automaattisen rekisteröintilaitteen ja tarvittavan ATK:n hankintahinta on melko korkea
- manuaalisesti rekisteröity kairaus on hitaampaa
- automaattinen rekisteröinti on häiriöalttiimpaa ja vaatii ATK:n perehtynyttä laitteiston käyttäjiä sekä tulosten käsittelijöitä.

3. KOEALUEET

3.1 Koealueiden laajuus

Koealueita valittaessa oli tarkoituksena löytää tyyppil-
tään erilaisia alueita, jotta puristin-heijarikairausko-
keet ja tulkinnot kattaisivat erilaiset maaperäolosuh-
teet. Helsingin kaupungin suhteellisen suppea alue asetti
tietyt rajoitukset valinnalle. Tutkimusalueiksi valittiin
Torpparinmäki, Mellunkylä ja Tapanila. Maalajitulkintaa
ja leikkauslujuuden määrittämisä varten on tuloksia saatu
myös 12 normaalista suunnittelukohteesta. Helsingin alu-
eella esiintyvät erilaiset maakerrostumat ovat ainakin
tyyydyttävästi edustettuina. Täytemaakerroksia, joiden
paksuus on yli 1 m, ei esiinny missään edellä mainituissa
kohteissa.

3.2 Torpparinmäki

Torpparinmäen koealue sijaitsee Pohjois-Helsingissä tyy-
pillisellä savialueella, joka kairauksia tehtäessä oli
peltoaluetta. Aikaisemmin ympäristössä tehtyjen puris-
tin-heijarikairauksen perusteella maaperä on hyvin tasa-
laatuista. Maakerrosrajoissa ei ole syvyysvaihtelumuutok-
sia koealueen kokoisella alueella. Alueen geotekniset
ominaisuudet esitetään kuvassa 6.

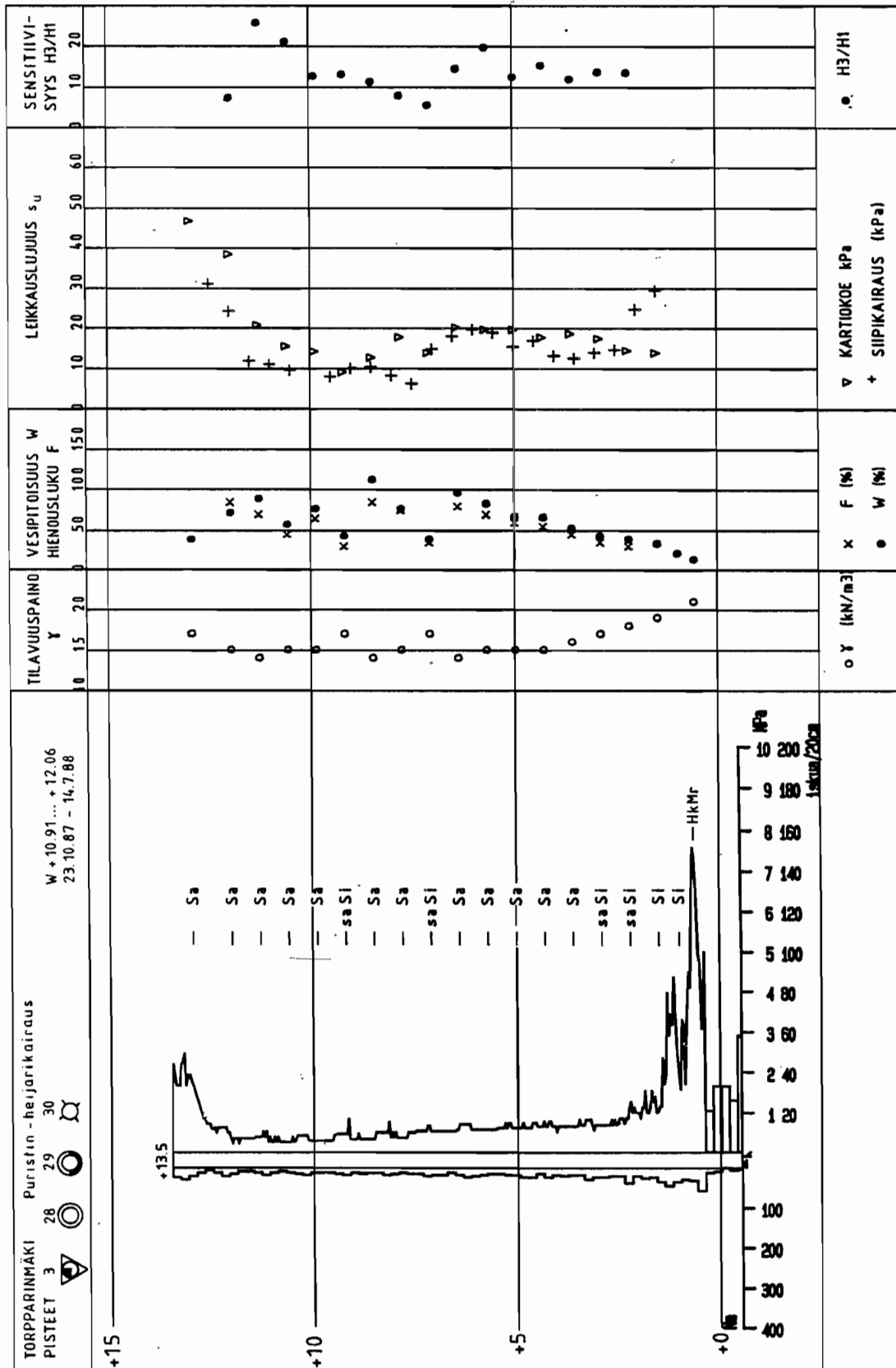
Koealueella ($15 \times 15 \text{ m}^2$) otettiin häiriintymättömät näyt-
teet jatkuvana ST- II-tyyppisellä mäntäkairalla 12.0 met-
rin syvyyteen asti. Tämän jälkeen häiriintyneet näytteet
otettiin pienoismäntäkairalla $\emptyset 26 \text{ mm}$ 12.9 metrin syvyy-
teen asti. Kairaukset tehtiin $2 \times 2 \text{ m}^2$ ruutuihin. Kahden
metrin etäisyys arvioitiin riittävän, jotta edellinen
kairaus ei olisi häirinnyt maaperää kairattavan pisteen
kohdalla. Alueella suoritettiin seuraavat kairaukset:

-1 moottoripainokairaus

-1 siipikairaus

-3 sähköistä puristinkairausta CPTU (kärkivastus +
huokosvedenpaine)

-18 puristin-heijarikairausta.



Kuva 6. Torpparinmäen (Helsinki) koealueen geotekniset ominaisuudet.

3.3. Mellunkylä

Mellunkylän koealue sijaitsee Itä-Helsingin alueella. Aikaisempien pohjatutkimusten mukaan alueella on useita silttikerroksia, joiden erottaminen on ollut vaikeata. Alueen geotekniset ominaisuudet esitetään kuvassa 7.

Koealueella (12 x 12m²) otettiin häiriintymättömät näytteet jatkuvana ST- II-tyyppisellä mäntäkairalla 6.7 metrin syvyyteen. Häiriintyneitä näytteitä otettiin 9.0 metrin syvyyteen pienoismäntäkairalla Ø 26 mm. Tästä eteenpäin häiriintyneet näytteet otettiin lusikkamäntäkairalla. Alueella suoritettiin seuraavat kairaukset 2 x 2 m² ruutuihin:

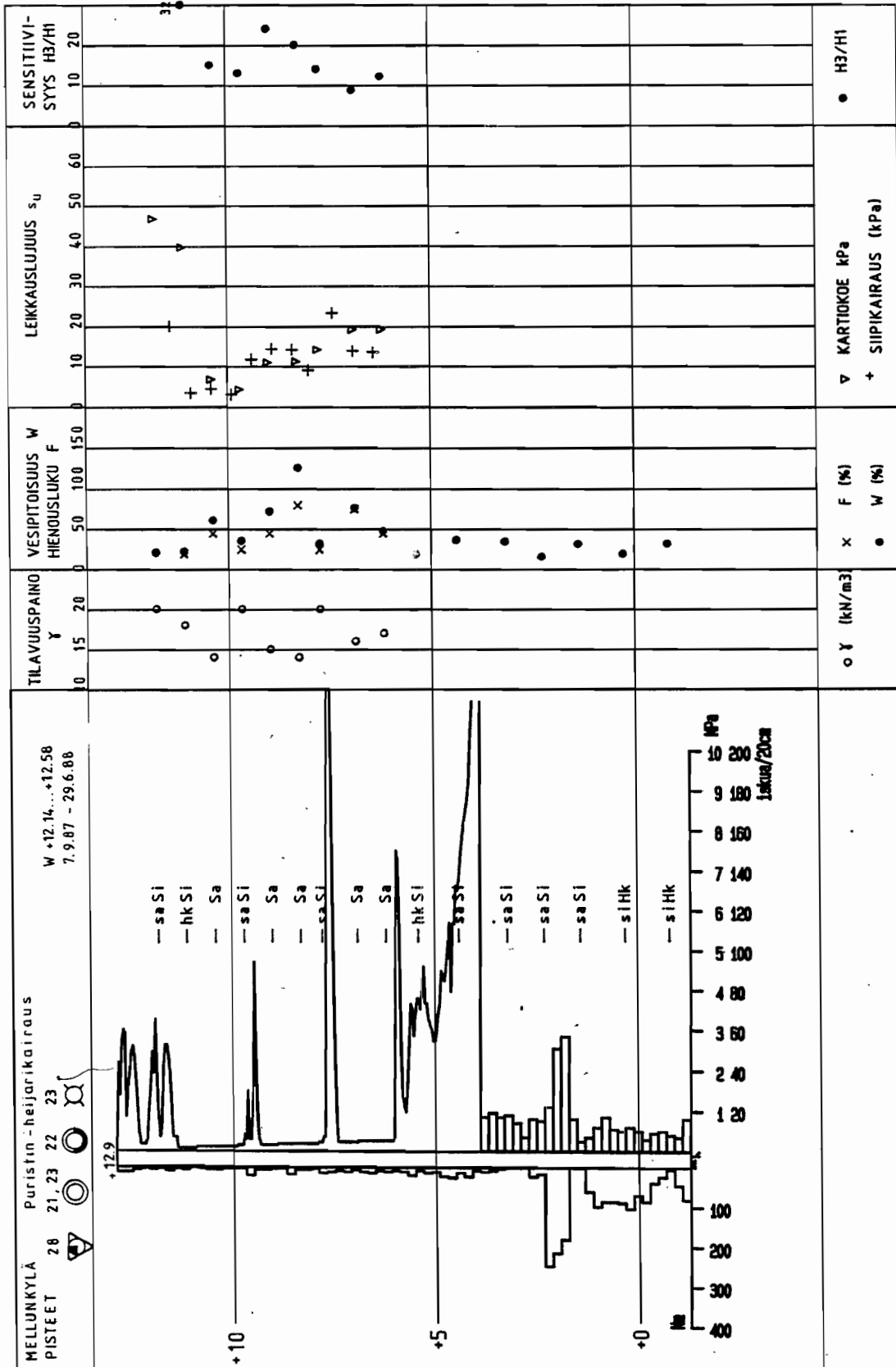
- 1 moottoripainokairaus
- 1 siipikairaus
- 2 sähköistä puristinkairausta CPTU (kärkivastus + huokosvedenpaine)
- 18 puristin-heijarikairausta.

3.4 Tapanila

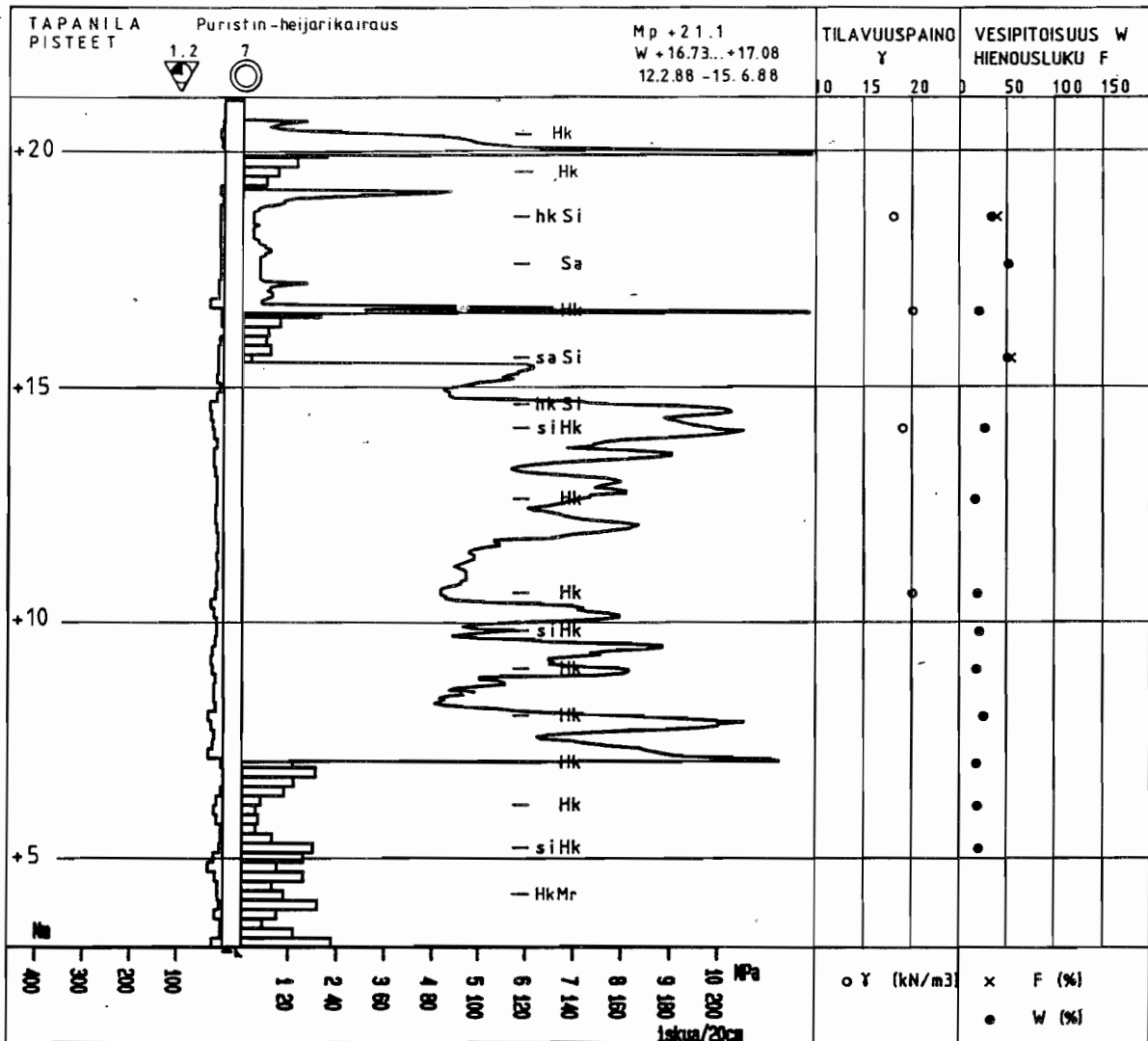
Tapanilan koealue sijaitsee Pohjois-Helsingissä. Koealueella on ohuiden koheesiomaakerrosten alla paksu hiekkakerros, jonka tiiviys vaihtelee. Maakerrosten geotekniset ominaisuudet esitetään kuvassa 8.

Koealueella (6 x 6 m²) otettiin vain häiriintyneitä näytteitä. Pienoismäntäkairalla Ø 26 otettiin 12 metrin syvyyteen, josta eteenpäin käytettiin lusikkamäntäkairaa. Alueella suoritettiin seuraavat kairaukset 2 x 2 m² ruutuihin:

- 1 moottoripainokairaus
- 1 yksisähköinen puristinkairaus CPTU (kärkivastus + huokosvedenpaine)
- 1 heijarikairaus
- 3 puristin-heijarikairausta.



Kuva 7. Mellunkylän (Helsinki) koealueen geotekniset ominaisuudet.



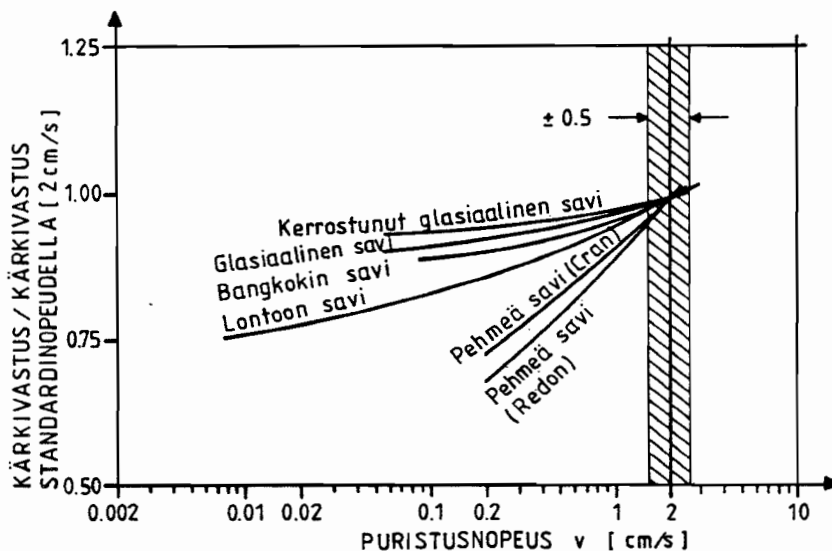
Kuva 8. Tapanilan (Helsinki) koealueen geotekniset ominaisuuudet.

4. PURISTUSNOPEUS

4.1 Puristusnopeuksien valinta

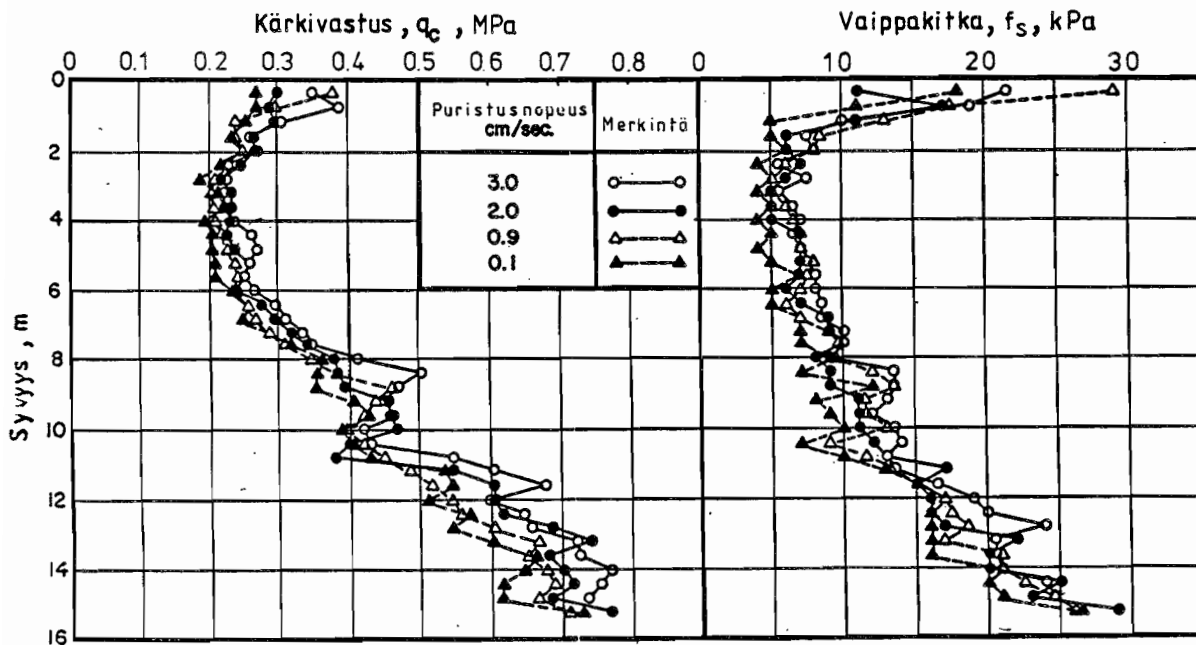
Käyttökelpoista puristusnopeutta määriteltäessä tärkeimmät valintatekijät ovat olleet maakerrosten erottelukyky ja tulosten stabiilisuus. Stabiilisuudella tarkoitetaan, että pienet nopeuden muutokset tavoitellusta nopeudesta eivät aiheuta merkittäviä muutoksia kairausvastuksessa. Suuri puristusnopeus nopeuttaa itse kairaustyötä, mutta tärkeintä on kuitenkin ehdottomasti tulosten luotettavuus.

Kuvasta 9 havaitaan, millainen on CPT-kairauksilla eri puristusnopeuksien vaikutus kärkivastukseen savissa. Tuloksista on havaittavissa, että nopeuden ollessa 1.5 - 2.5 cm/s ei kärkivastus juurikaan muutu savilaadusta riippumatta.



Kuva 9. Puristusnopeuksien vaikutus CPT:n kärkivastukseen erilaisilla savilla /23/.

Kuvassa 10 on kuvan 9 Bangkokin savesta yksityiskohtaisempi tarkastelu, jonka Brand et al ovat tehneet /9/. Bangkokin saven geotekniset ominaisuudet eivät poikkea kovinkaan paljon Helsingin alueen savista. Tutkituilla puristusnopeuksilla (0.1 - 3.0 cm/s) kärkivastuksen osalla ero oli suurimmillaan 35 % ja vaippakitkan osalla 100 %. Käytettäessä nopeutta 2 ± 0.5 cm/s ero kärkivastuksessa ja vaippakitkassa oli vain noin ± 4 %.



Kuva 10. Puristusnopeuksien vaikutus CPT:n kärkivastukseen ja vaippakitkaan Bangkokin savessa /9/.

Amar teki kokeita nopeuden vaikutuksista kärkivastukseen LPC-merkkisellä sähköisellä kärjellä /2/. Koenopeuksina olivat 2 mm/s ja 2 cm/s. Taulukossa 2 on koetulosten yhteenveto. Siitä havaitaan, että kärkivastus (ei tehty huokospainekorjauksia) vaihtelee nopeuden mukaan merkittävästi lukuunottamatta kuivaa hiekkamaata. Hienorakeisissa savimaissa kärkivastus kasvaa melkein 40 % nopeuden kasvaessa. Toisaalta silttimaissa tai kyllästyneessä löyhässä hiekkamaassa kärkivastus pienenee kun puristusnopeus kasvaa. Tämä voi johtua maan murtumisesta, jonka aiheuttaa huokospaineen kasvu. Vedellä kyllästetyssä silttisessä maassa voi tapahtua rakenteellinen murtuminen.

Powell ja Quarterman tekivät kokeita pienillä puristusnopeuksilla, jotka olivat 0.01 m/min, 0.1 m/min ja 1.0 m/min /27/. Saven vesipitoisuus oli pääasiallisesti alle 30 %. Puristusnopeuksilla 0.01 m/min ja 0.1 m/min kärkivastukset olivat lähes samansuuruisia, mutta ne olivat 10 - 20 % pienempiä kuin puristusnopeudella 1.0 m/min. Puristusnopeuden ja kärkivastuksen väliseen riippuvuuteen

havaittiin olevan yhteys vedenläpäisevyydellä (k) ja plastisuusluvulla (I_p). Kärkivastuksen riippuvuus puristusnopeudesta oli kuitenkin vähäistä, kun plastisuusluku oli pieni.

Taulukko 2. Puristusnopeuksien vaikutus kärkivastukseen LPC:n sähköisellä kärjellä (CPT). Kärkivastussuhde muodostuu puristusnopeuksien suhteesta (2 cm/s)/(2 mm/s) /2/.

Maalaji (Paikka)	Kärkivastus suhde
Pehmeä savi (Cran, Redon)	1.35 - 1.45
Kyllästetty siltti (Plancoet)	0.88
Siltti (Orly)	0.53
Kuiva hieno hiekkä (Rance)	1.08
Kyllästetty hieno hiekkä (Rance)	0.78

ISSMFE:n CPT-suosituksissa /23/ puristusnopeus on 1.2 m/min ± 25 %. Norjalaisten kiertopuristinkairauksessa käytetään nopeutta 3 m/min. Useimmissa ulkomaisissa viitteissä on tutkimukset tehty pienillä puristusnopeuksilla. Edellä mainittujen tekijöiden perusteella valittiin tässä työssä tutkittaviksi seuraavat puristusnopeudet:

- 1.2 m/min
- 2.0 m/min
- 3.0 m/min.

Tankoja pyöritettiin samanaikaisesti puristamisen yhteydessä. Pyöritysnopeus oli valittu siten, että tankojen kehänopeus oli sama kuin puristusnopeus. Yhteen tutkittavaan kehänopeuteen päädyttiin, koska kairauspisteiden lukumäärää haluttiin rajoittaa. Kokeet on tehty Torpparinmäessä ja Mellunkylässä.

4.2 Puristusnopeuksien vertailu

Tutkimuksessa käytetyt puristus- ja pyöritysnopeudet esitetään taulukossa 3.

Jokaiseen sarjaan sisältyy kolme samanlaista kairausta. Tällä pyrittiin vähentämään maan epähomogeenisuudesta johtuvia mahdollisia virhetekijöitä. Puristusnopeuksien vertailua varten kairauspisteiden lukumääräksi tuli yhdeksän kappaletta koealuetta kohden. Koealueita oli kaksi: Torpparinmäki ja Mellunkylä. Molemmissa kohteissa tehtiin täysin vastaavat kairaukset, joten lopulliseksi kairausten lukumääräksi tuli yhteensä 18 kappaletta.

Taulukko 3. Tutkitut puristus- ja pyöritysnopeudet Torpparinmäessä ja Mellunkylässä, Helsinki.

KOESARJA	NOPEUS	
	PURISTUS v (m/min)	PYÖRITYS R (r/min)
1	1.2	12
2	2.0	20
3	3.0	30

MELLUNKYLÄ

Jokaiseen sarjaan (taul. 3) kuuluu kolme samanlaista kairausta, joista on piirretty keskiarvot. Nämä Mellunkylän (Naulakallionpuisto) koetulokset ovat kuvissa 11, 12 ja 13. Liitteissä 1 ja 2 esitetään koealueen kairauspisteiden sijainnit.

Koetuloksista havaitaan yleiskuvana, että pienimmällä nopeudella (1.2 m/min) tunnistetaan parhaiten heikommät ja löyhemmät silttikerrokset. Kuvasta 11 (1.2 m/min) havaitaan selvästi syvyydellä 3.5 m oleva savinen silttikerros. Nopeudella 2.0 m/min ei ole havaittavissa minkäänlaista kerrosta ja nopeudella 3.0 m/min kerros voidaan havaita erittäin heikkona. Mitä suurempi puristusnopeus

on, sitä ohuemmilta ja terävimmiltä maakerrokset vaikuttavat. Erot eivät ole kuitenkaan kovin suuria.

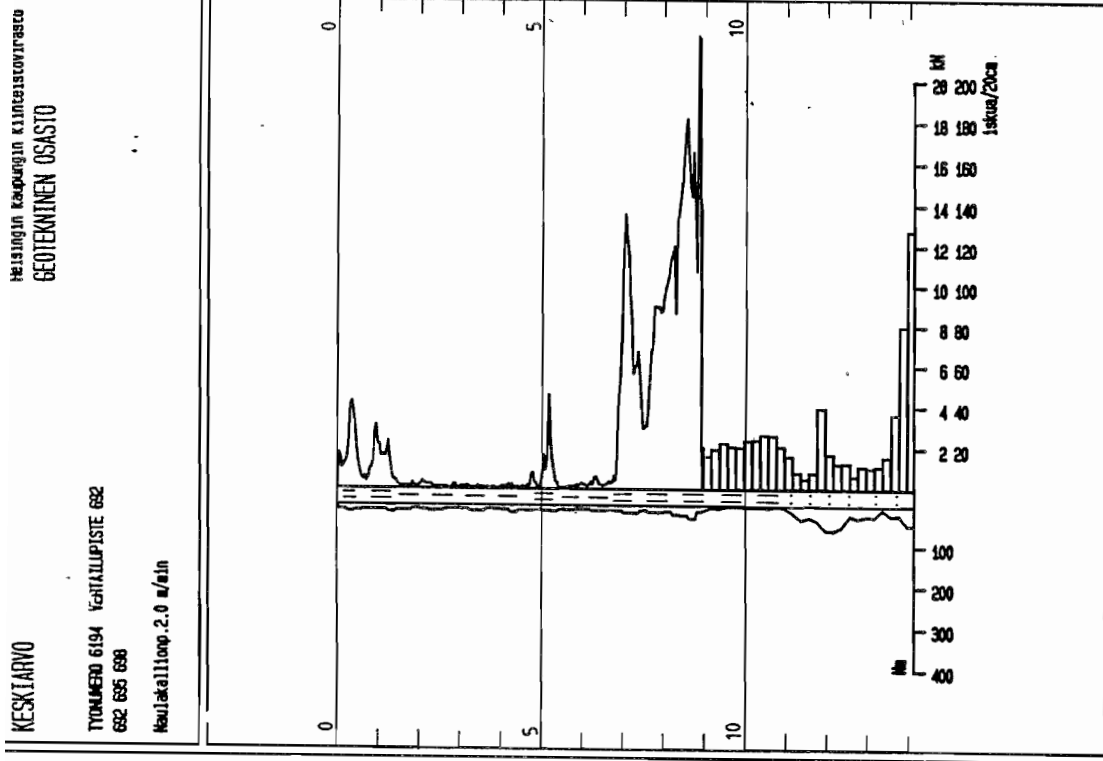
Puristusvaiheen tunkeutumisvyvyksissä nopeuksilla 1.2 m/min ja 2.0 m/min ei ole eroa, mutta 3.0 m/min tunkeutuu noin 0.5 metriä heikommin. Lisäksi suurimmalla nopeudella on jouduttu syvyydellä 5.0 metriä suorittamaan heijarikairausta. Syy tähän on todennäköisesti se, että suuresta puristusnopeudesta johtuen maassa huokospaine kasvaa enemmän ja maan murtuminen tapahtuu eri tavalla kuin pienillä nopeuksilla. Puristusvoiman suuruudessa ei ole juurikaan eroja paitsi syvyydestä 7 metriä alaspäin, jossa puristusvoima kasvaa nopeuden mukana. Tämäkin ero on pienimmällä ja suurimmalla nopeudella vain 1 - 2 kN eli noin 5 - 10 %.

TORPPARINMÄKI

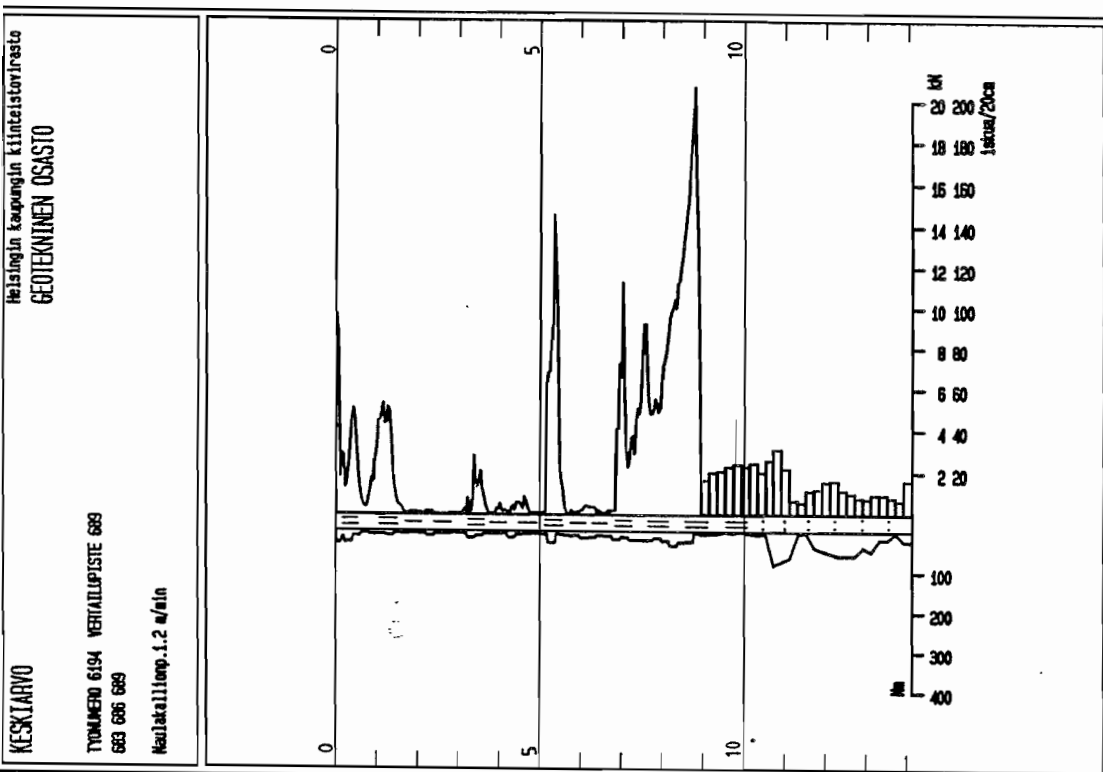
Torpparinmäen koetulokset ovat kuvissa 14, 15 ja 16. Jokaisessa kuvassa on esitetty kolmen kairauksen keskiarvo. Liitteissä 3 ja 4 esitetään koealueen kairauspisteiden sijainnit.

Nopeuksilla 1.2 m/min ja 2.0 m/min tehdyissä kairauksissa puristusvoimat ovat täysin samanlaisia. Suurimmalla nopeudella 3.0 m/min siltissä ja hiekkamoreenissa puristusvoima oli noin 1.0 kN (alle 30 %) suurempi kuin muilla nopeuksilla. Savessa nopeudella 3.0 m/min puristusvoima oli noin 0.2 kN (40 %) suurempi, mutta puristusvoiman mittauksen erottelukyvystä johtuen tulos ei ole merkittävä.

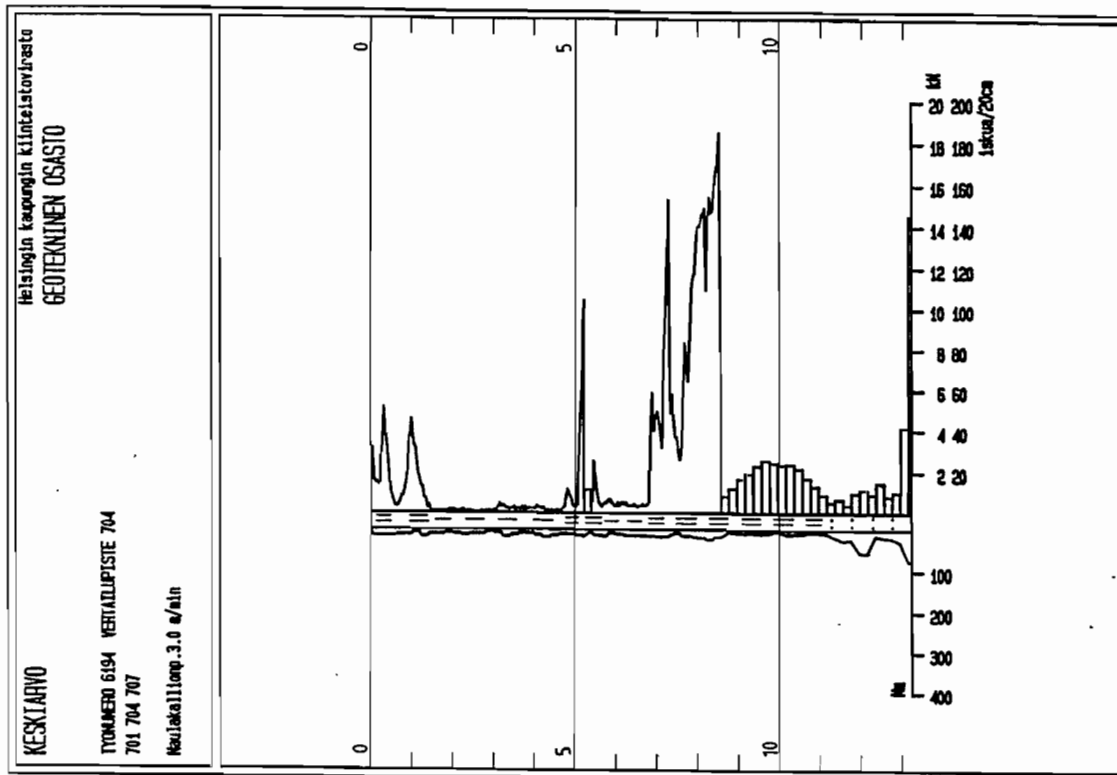
Jokaisella nopeudella kairatessa on havaittavissa, että tasan metrin välein on pieni puristusvoiman kasvu. Tämä aiheutuu lepokitkan vaikutuksesta lisättäessä metrin pituisia tankoja, tai se voi johtua myös kairamaston kelkan kitkasta. Puristusnopeuden lisääntyessä kasvaa myös puristusvoima tankojen vaihdon yhteydessä. Vääntömomentin osalla tilanne on vastaavanlainen (ks luku 5).



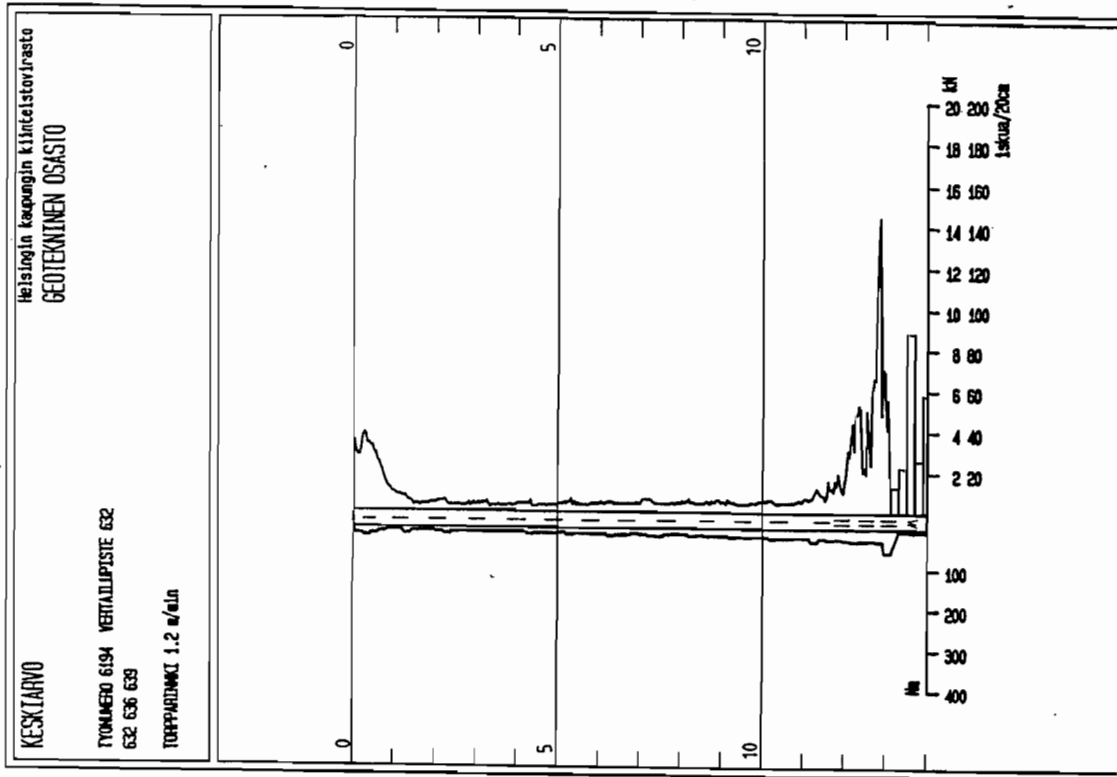
Kuva 12. Puristin-heijarikairaus ($v = 2.0$ m/min ja $R = 20$ r/min), jossa tankojen painoja ei ole huomioitu. Mellunkylä, Helsinki.



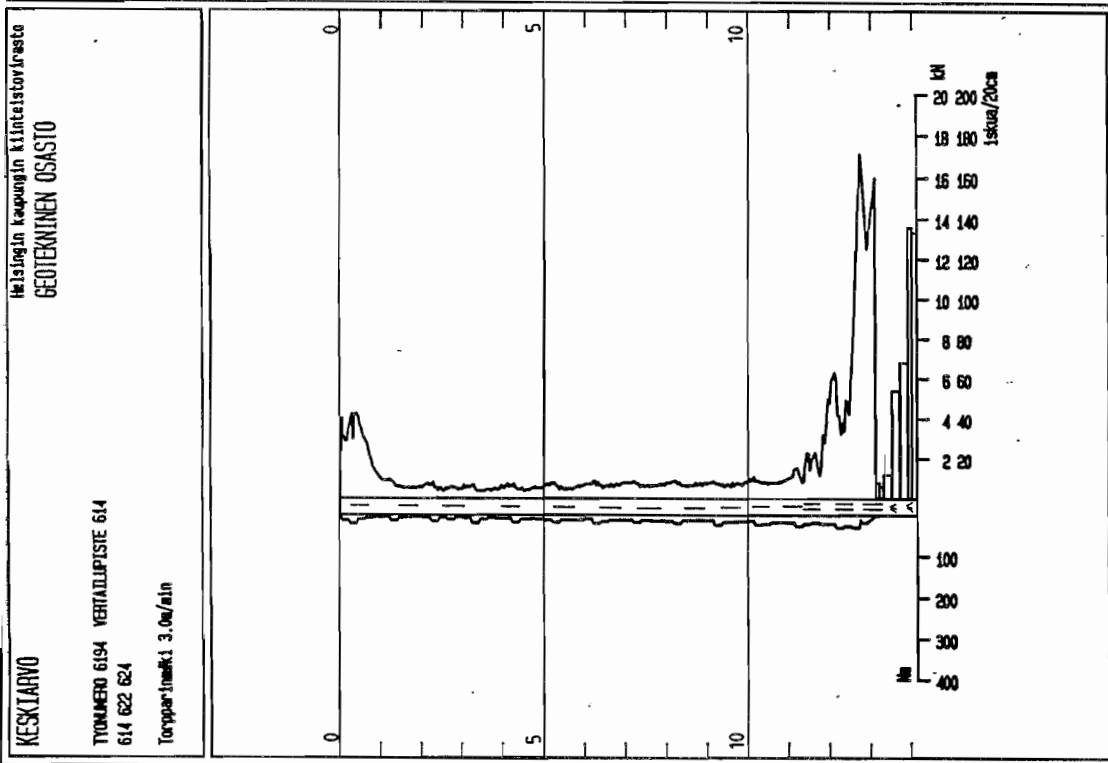
Kuva 11. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min), jossa esitetään puristusvoima, iskuluku ja vääntömomentti. Tankojen painoja ei ole huomioitu. Mellunkylä, Helsinki.



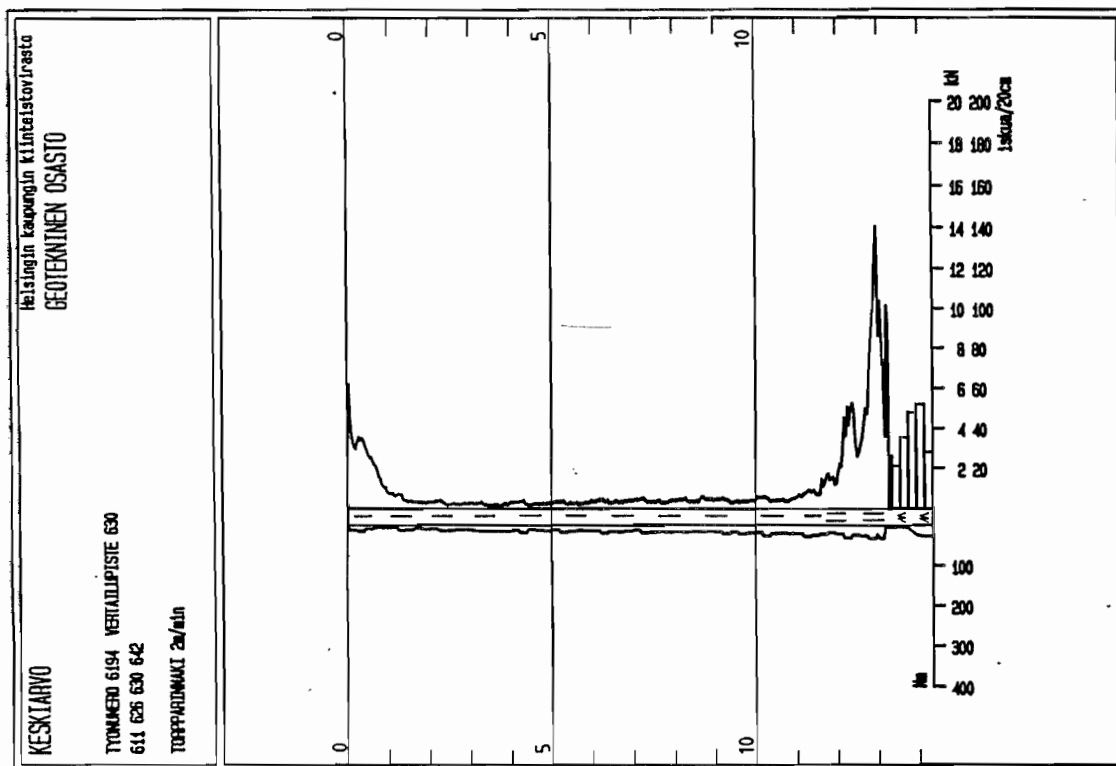
Kuva 13. Puristin-heijarikairaus ($v = 3.0$ m/min ja $R = 30$ r/min), jossa tankojen painoja ei ole huomioitu. Mellunkylä, Helsinki.



Kuva 14. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min), jossa tankojen painoja ei ole huomioitu. Torpparinkäki, Helsinki.



Kuva 16. Puristin-heijarikairaus ($v = 3.0$ m/min ja $R = 30$ r/min), jossa tankojen painoja ei ole huomioitu. Torpparimäki, Helsinki.



Kuva 15. Puristin-heijarikairaus ($v = 2.0$ m/min ja $R = 20$ r/min), jossa tankojen painoja ei ole huomioitu. Torpparimäki, Helsinki.

YHTEENVETO

Puristusnopeuksien vaikutus kairausvastukseen on riippuvainen maaperän laadusta. Tämän työn koealueilla ei puristusnopeuksilla ollut suurta vaikutusta. Herkkyys oli paras nopeudella 1.2 m/min. Tehtyjen kokeiden ja kirjallisuuden mukaan puristin-heijarikairan sopivin puristusnopeus on 1.2 $\pm$ 0.3 m/min eli sama kuin ulkomaisissa CPT-standardeissa.

5. TANKOJEN PYÖRITYS

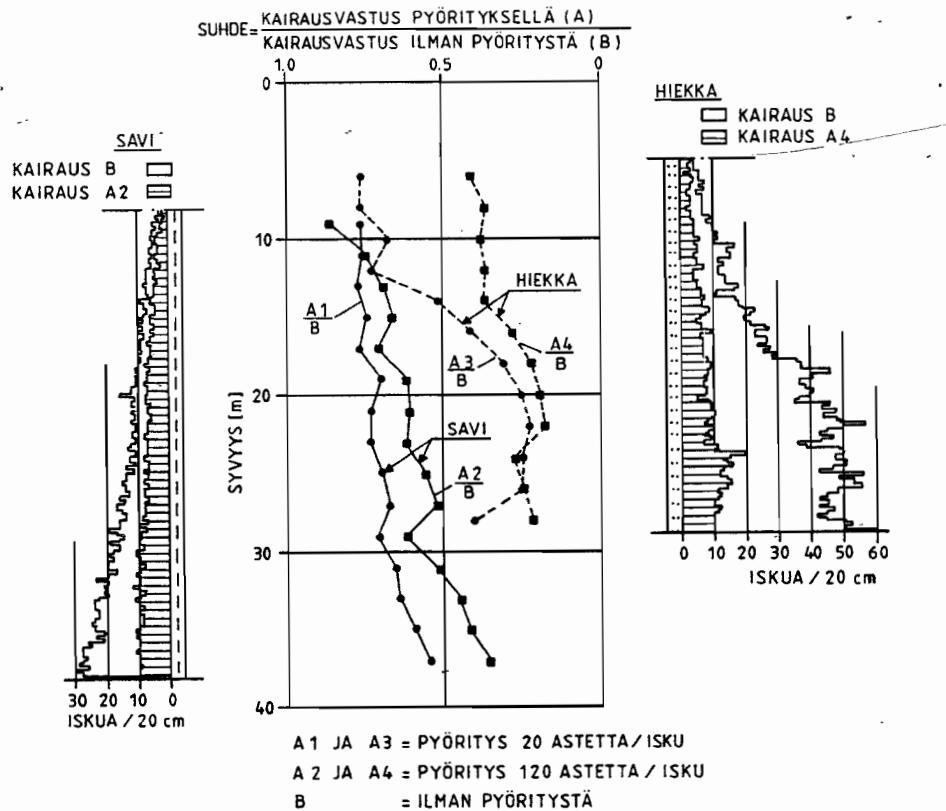
5.1 Pyöritysnopeuksien valinta

Puristinkairaus (CPT) standardien mukaisissa kairauksissa ei tankoja pyöritetä /23/. SGY:n kairausoppaan 1 mukaan heijarikairauksessa pyöritetään tankoja vähintään metrin tunkeumaväleihin. Jos kairausvyvyys on suurempi kuin 10 m, pyöritetään tankoja 0.2 m välein /30/. Dahlberg ja Bergdahl ovat tutkineet pyörityksen vaikutusta heijarikairaukseen /12/. Alte ja Johansson ovat puolestaan selvittäneet pyörityksen vaikutusta totaalikairaukseen /1/.

Alten ja Johanssonin /1/ totaalikairalla tekemässä tutkimuksessa puristusnopeus oli 3.6 m/min eli kolminkertainen nopeus verrattuna puristin-heijarikairalla tehtyihin kokeisiin. Kärkikappaleina oli käytössä mm. pyöreä kärki ($d = 54 \text{ mm}$, $h = 45 + 40 \text{ mm}$) ja neliskanttinen kärki ($d = 45 \text{ mm}$, $h = 75 + 35 \text{ mm}$). Kokeet tehtiin pyöritysnopeuksilla 0 r/min, 15 r/min ja 30 r/min. Informaatiota ei juurikaan menetetty, vaikka tankoja pyöritettiin.

Tulokset osoittivat, että lisääntyvä pyöritys antoi pienemmän puristusvoiman ja suuremman vääntömomentin. Savessa pyörityksellä oli pienempi vaikutus puristusvoimaan kuin siltillä ja hiekalla. Pyöritysnopeudet 15 r/min ja 30 r/min antoivat maakerroksista samanlaisen kuvan.

Dahlberg ja Bergdahl /12/ tutkivat heijarikairauksessa (Swedish ram sounding) tapahtuvaa tankojen pyöritystä. Kuvasta 17 havaitaan, että tankojen pyörityksen merkitys on huomattavampaa hiekassa kuin savessa ja tankojen pyöritys 20 astetta/isku on merkittävä vähentämään kairausvastusta. Hiekassa kairausvastus voi olla jopa viisinkertainen, jos pyöritystä ei suoriteta.



Kuva 17. Tankojen pyörityksen vaikutus heijarikairauksen kairausvastukseen savessa ja hiekassa /12/.

Tässä työssä tutkittaviksi pyöritysnopeuksiksi valittiin neljä eri nopeutta:

- 0 r/min
- 12 r/min
- 20 r/min
- 30 r/min.

5.2 Pyöritysnopeuksien vertailu

Taulukosta 4 selviää käytetyt pyöritysnopeudet, koepaikat ja kokeiden lukumäärät. Mellunkylässä ja Torpparinmäessä jokaista pyöritysnopeusvaihtoehtoa tehtiin kolme kappaletta (paitsi Torpparinmäki 12 r/min), jotta mahdollisen virheiden osuus olisi pieni ja tuloksista saataisiin keskiarvot. Tapanilassa tehtiin vain kaksi koetta Mellunkylän ja Torpparinmäen tulosten analysoinnin jälkeen. Lopulliseksi kairauspistemääräksi tuli 27 kappaletta.

Taulukko 4. Pyöritysnopeuskokeiden koepaikat ja kairaus-
ten lukumäärät.

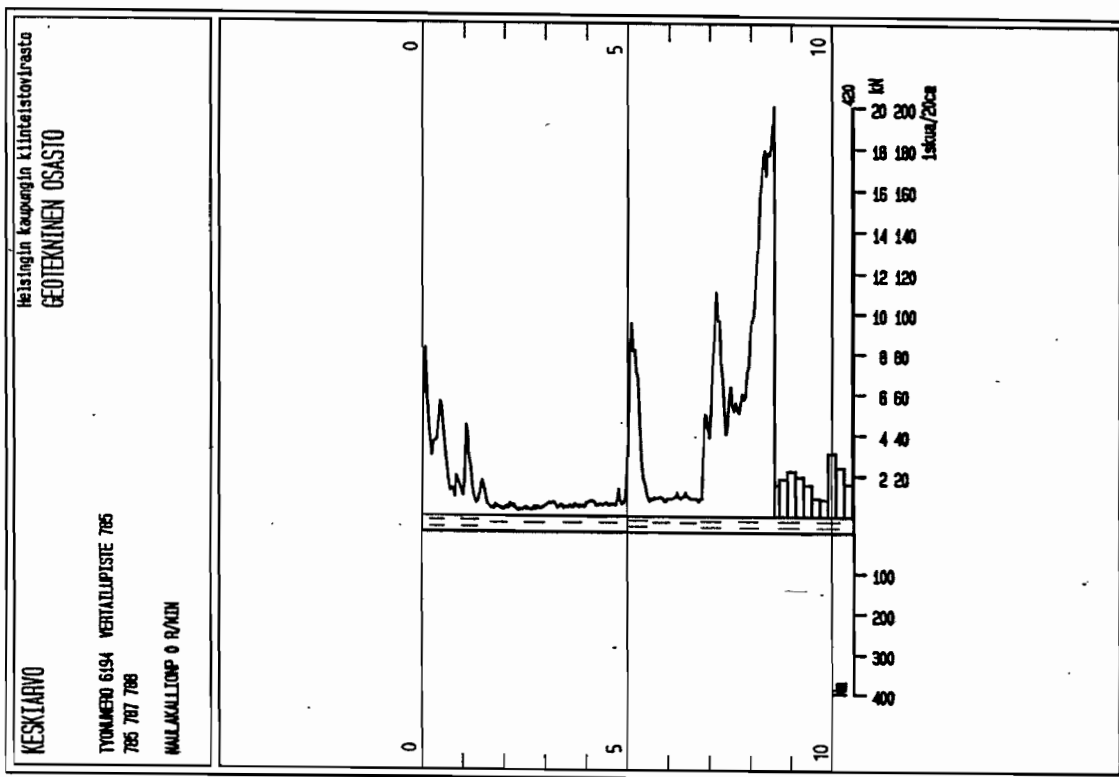
PYÖRITYSNOPEUS R (r/min)	KAIRAUSTEN LUKUMÄÄRÄ		
	MELLUNKYLÄ	TORPPARINMÄKI	TAPANILA
0	3	3	
12	3	4	1
20	3	3	1
30	3	3	
yht.	12	13	2

MELLUNKYLÄ

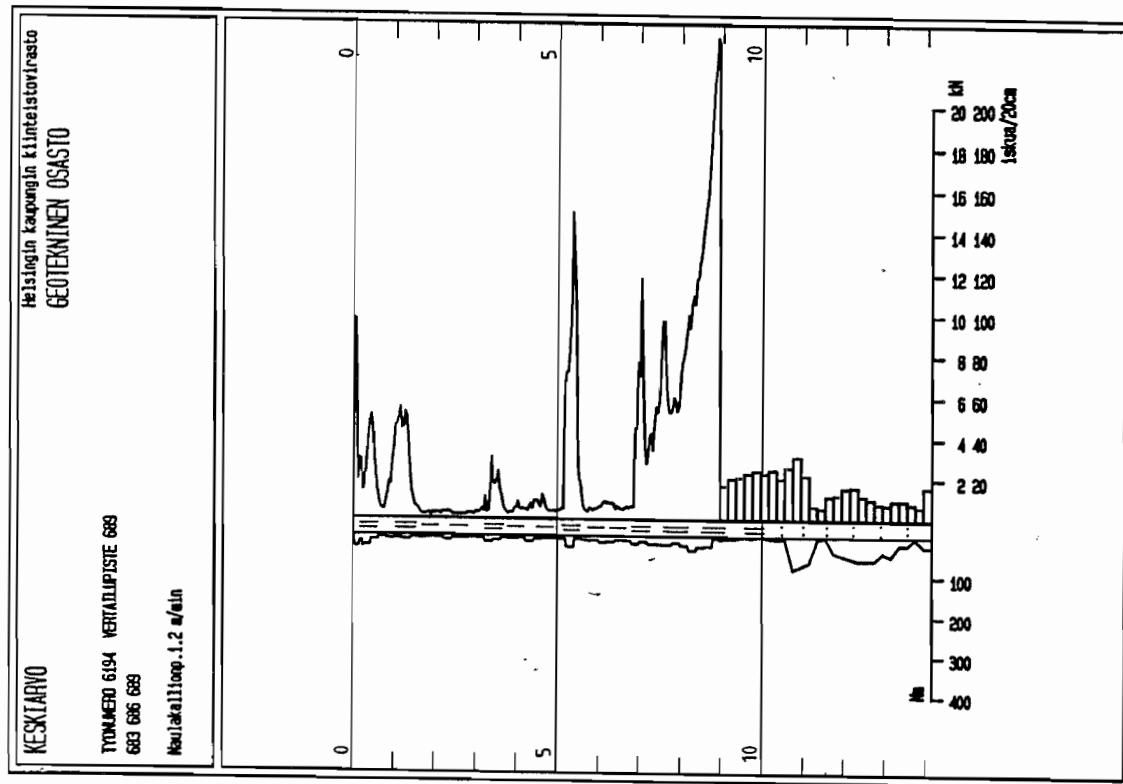
Mellunkylän koetulokset esitetään kuvissa 18, 19, 20 ja 21. Kairauskuvissa on esitetty kolmen kairauksen keskiarvo. Liitteistä 1 ja 2 selviää pisteiden sijoittuminen koalueella.

Ohuet ja heikot saviset silttikerrokset, jotka sijaitsevat syvyysvälillä 2 - 4.5 m, eivät ilmene pyöritysnopeudella 0 r/min. Sen sijaan pyöritysnopeuksilla 12 r/min ja 20 r/min kerrokset ovat selvästi havaittavissa. Suurimmalla pyöritysnopeudella (30 r/min) kerrokset voidaan havaita, mutta huomattavasti heikommin. Yllättävää on, että nopeudella 0 r/min ei havaita näitä kerroksia. Mahdollisuus, että kyseiset kerrokset puuttuvat juuri näiden kairauspisteiden kohdalta, on erittäin epätodennäköistä, koska kairauspisteiden väliset etäisyydet ovat hyvin pieniä.

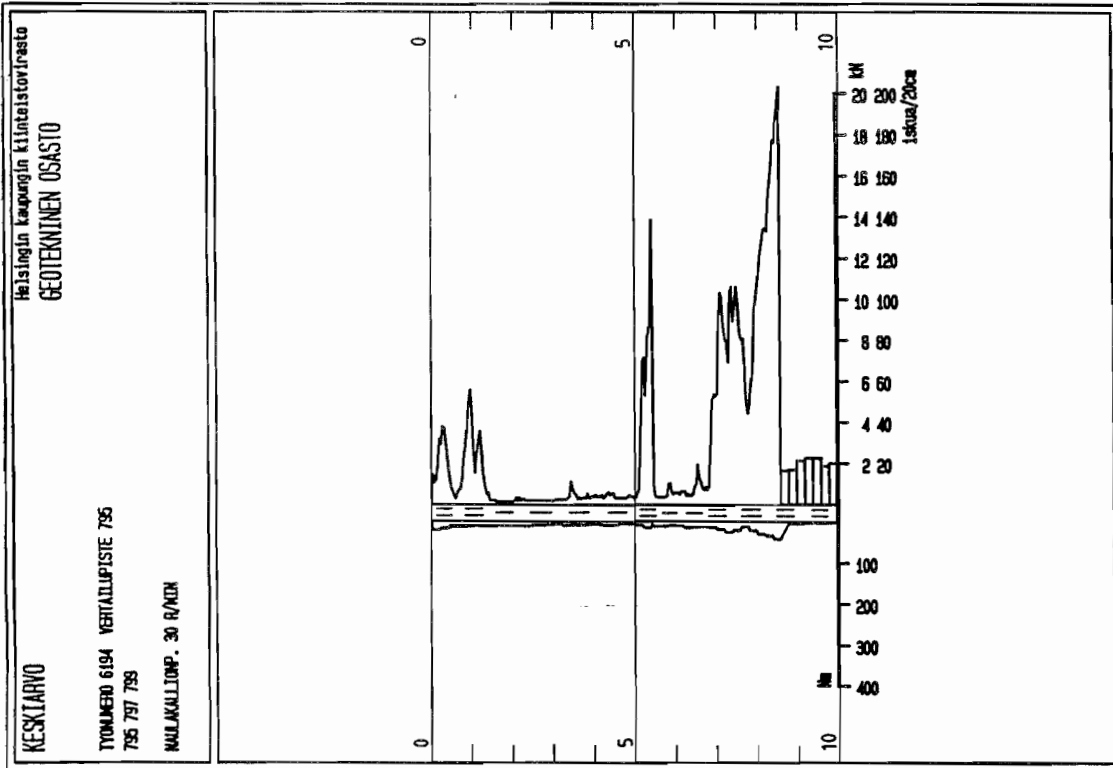
Kuvassa 22 esitetään pyöritysnopeuksien vaikutus puristusvoimaan, kun vertailu pyöritysnopeutena on 12 r/min. Suurin puristusvoima on pyörittäessä tehdyissä kairauksissa lukuunottamatta niitä silttikerroksia, joita ei ole edes havaittu. Suurin nopeus 30 r/min antaa puristusvoimalle 0 - 30 % pienemmän arvon kuin nopeus 12 r/min. Suuret vaihtelut nopeuksilla 0 r/min ja 20 r/min aiheutuvat siitä, että kairauspisteiden sijaintipoikkeamien takia silttikerrokset ovat hieman eri syvyyksillä.



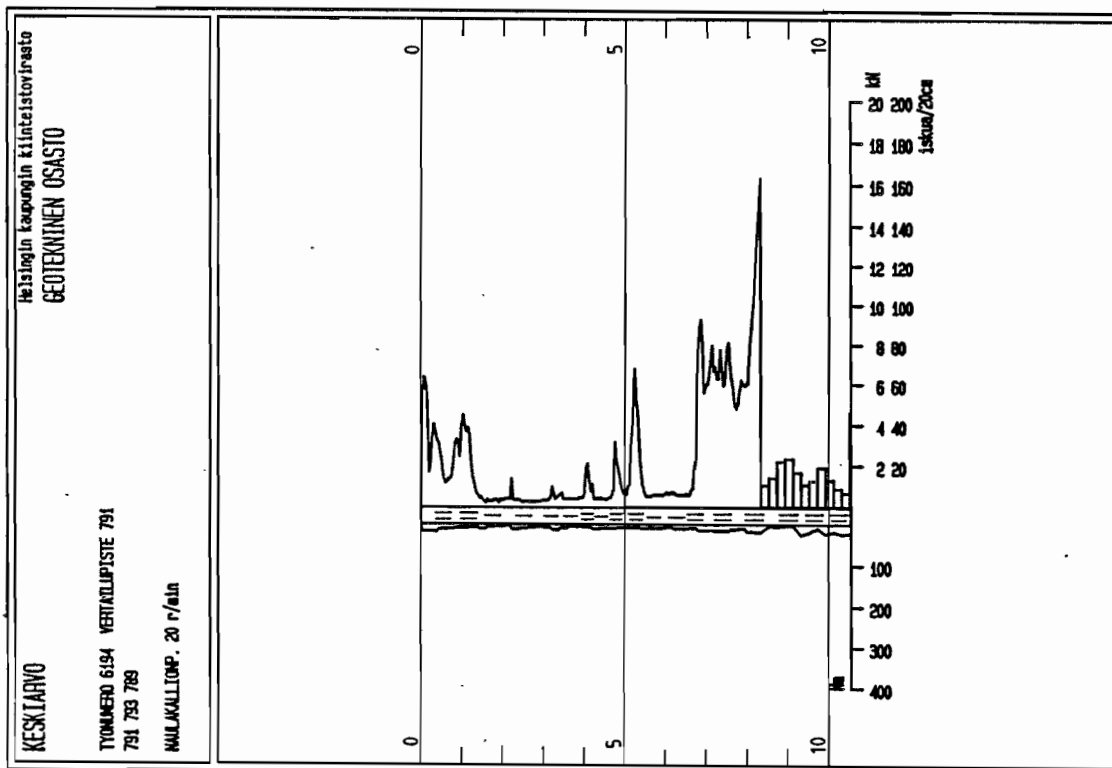
Kuva 18. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 0$ r/min). Mellunkylä, Helsinki.



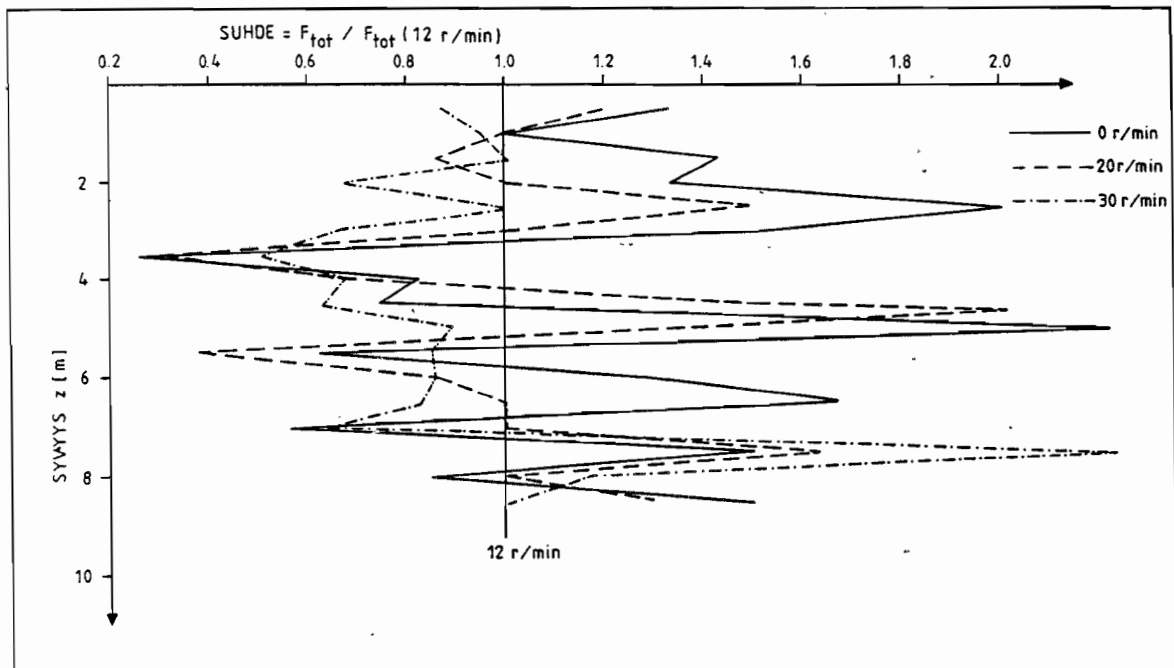
Kuva 19. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min). Mellunkylä, Helsinki.



Kuva 21. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 30$ r/min). Mellunkylä, Helsinki.



Kuva 20. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 20$ r/min). Mellunkylä, Helsinki.



Kuva 22. Pyöritysnopeuksien vaikutus puristusvoimaan. Vertailupyöritysnopeus on 12 r/min. Mellunkylä, Helsinki.

Heijarikairausvaiheista ei kairausvastuksista voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä, sillä heijarikairausta on vain noin kaksi metriä kallion pinnan läheisyyden vuoksi. Pyöritysnopeuksien 12 r/min kairauspisteiden sijainnin vuoksi kallion pinta on selvästi syvemmällä kuin muissa kairauksissa.

Vääntömomentit ovat melko pieniä. Maksimi vääntömomentti 44 Nm on nopeudella 30 r/min. Momenttien keskiarvot laskettuna 0.20 metriä kohden ovat seuraavat:

- 12 r/min, $M = 15.4 \text{ Nm}$
- 20 r/min, $M = 11.6 \text{ Nm}$
- 30 r/min, $M = 14.1 \text{ Nm}$.

Koska vääntömomentin erottelukyky on 3 Nm, niin keskiarvoilla ei ole merkittäviä eroja. Kuvassa 19 tasan metrin välein tapahtuva momentin pieni kasvu johtuu tankojen vaihdosta, tai se voi johtua myös kairamaston kelkan kitkasta. Kytkettäessä pyöritys päälle joudutaan ylittämään lepokitka, jolloin momentti hetkellisesti kasvaa. Muissa Mellunkylän kuvissa keskiarvo on kompensoinut tankojen vaihdot.

Tunkeutumissyvyydet ovat taulukossa 5. Puristusvaiheessa ei ole eroja. Heijarivaiheessa pyörittämällä päästään jonkin verran syvemmälle kuin ilman pyöritystä. Tulos ei ole kuitenkaan merkittävä vaihtelevista pohjaolosuhteista johtuen.

Taulukko 5. Tunkeutumissyvyydet eri pyöritysnopeuksilla.
Mellunkylä, Helsinki

PYÖRITYSNOPEUS R (r/min)	MELLUNKYLÄ		
	KAIRAUSVAIHE		YHTEENSÄ s(m)
	KESK.ARVO PURISTUS s(m)	KESK.ARVO HEIJARI s(m)	
0	8.5	1.7	10.2
12	8.9	4.5	13.4
20	8.5	2.4	10.9
30	8.6	2.1	10.7

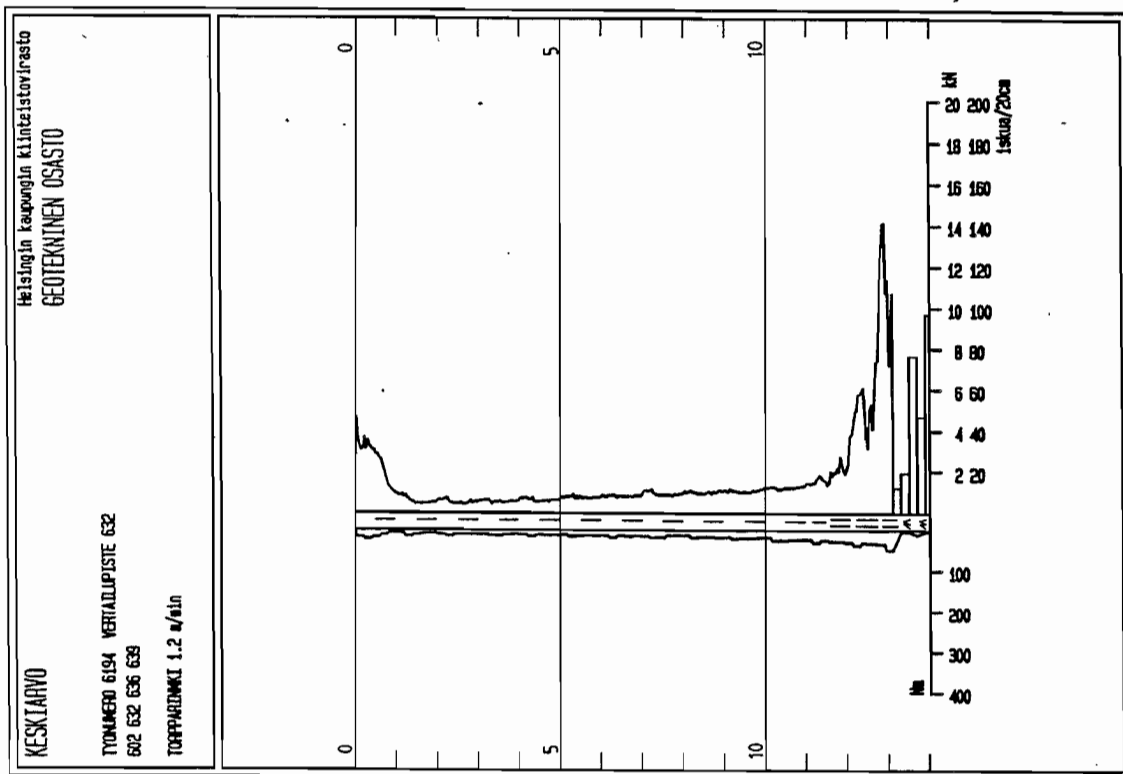
Mellunkylässä pyöritysnopeus 12 r/min osoittautui parhaimmaksi pyöritysnopeudeksi. Pyöritysnopeus 20 r/min oli lähes yhtä hyvä, mutta muut vaihtoehdot olivat huonompia.

TORPPARINMÄKI

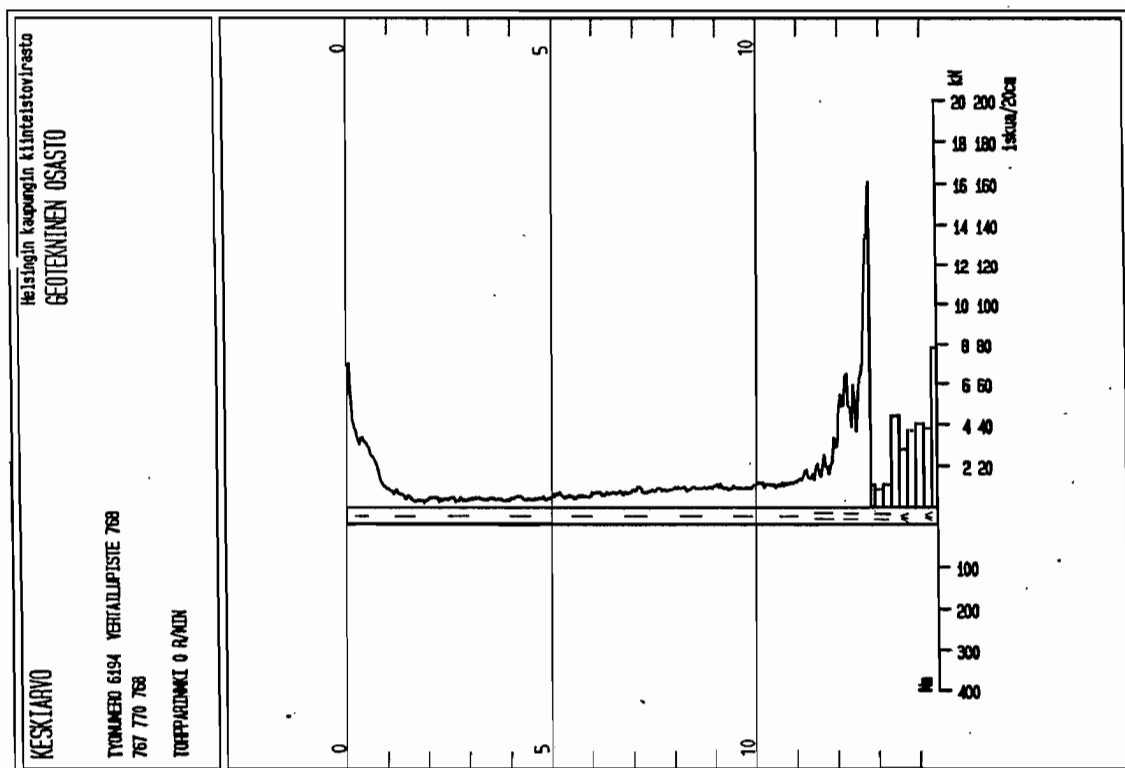
Torpparinmäen koetulokset ovat kuvissa 23, 24, 25 ja 26. Kairausdiagrammeissa on esitetty kolmen kairauksen keskiarvo. Liitteistä 3 ja 4 selviää pisteiden sijoittuminen koealueella.

Torpparinmäki on maaperältään tasaista savikkoa noin 11 metrin syvyyteen saakka. Häiritseviä (havaittavia) kerroksia ei ole ja kairausvastusten arvioiminen on helpompaa kuin Mellunkylässä. Kuivakuoressa kairausvastus kasvaa pyöritysnopeuden kasvaessa. Pyörittämättä tehty kairaus sijoittuu nopeuksien 12 r/min ja 20 r/min väliin.

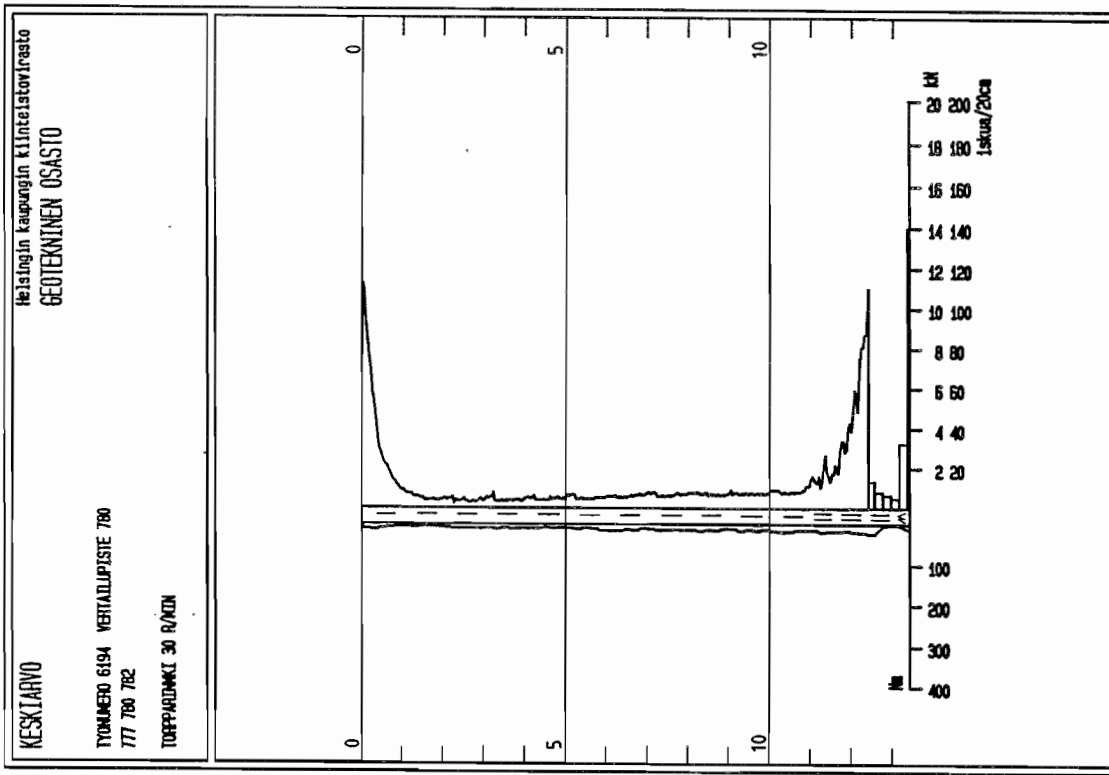
Kuvasta 27 on havaittavissa, että pyöritettäessä nopeammin kuin 12 r/min, tarvittava puristusvoima pienenee. Heijarikairauksesta ei voida lyhyen heijausmatkan vuoksi tehdä luotettavia johtopäätöksiä.



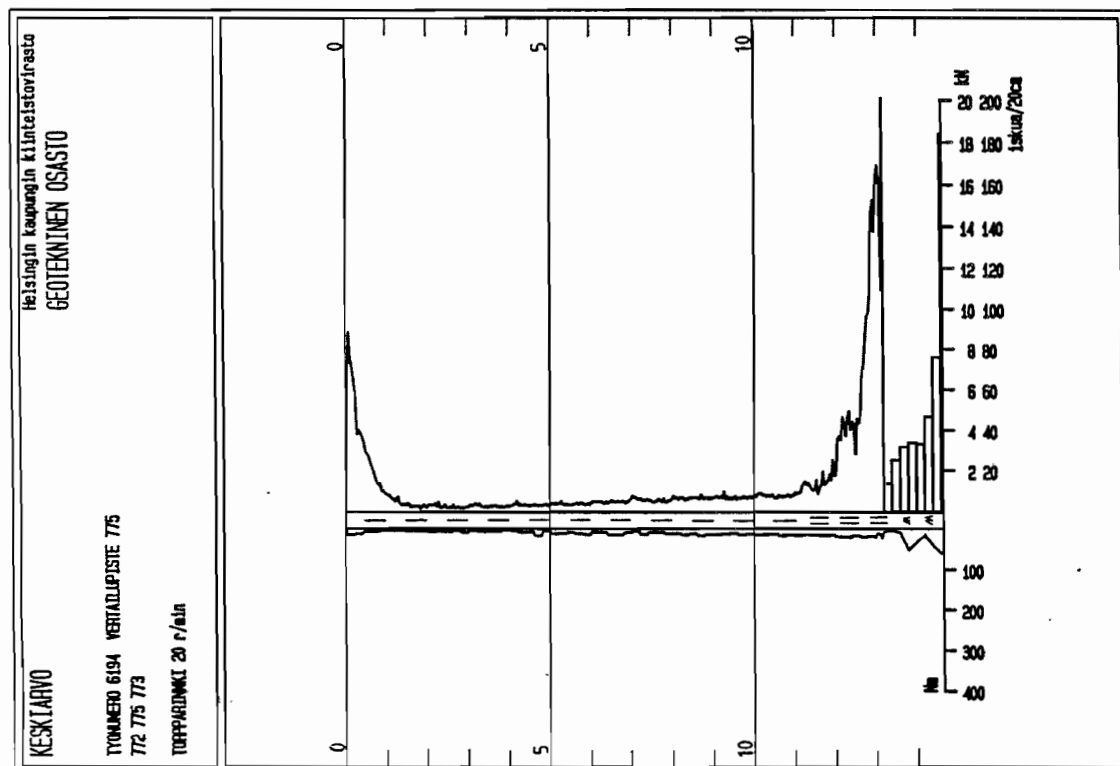
Kuva 24. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min) Torpparinmäki, Helsinki.



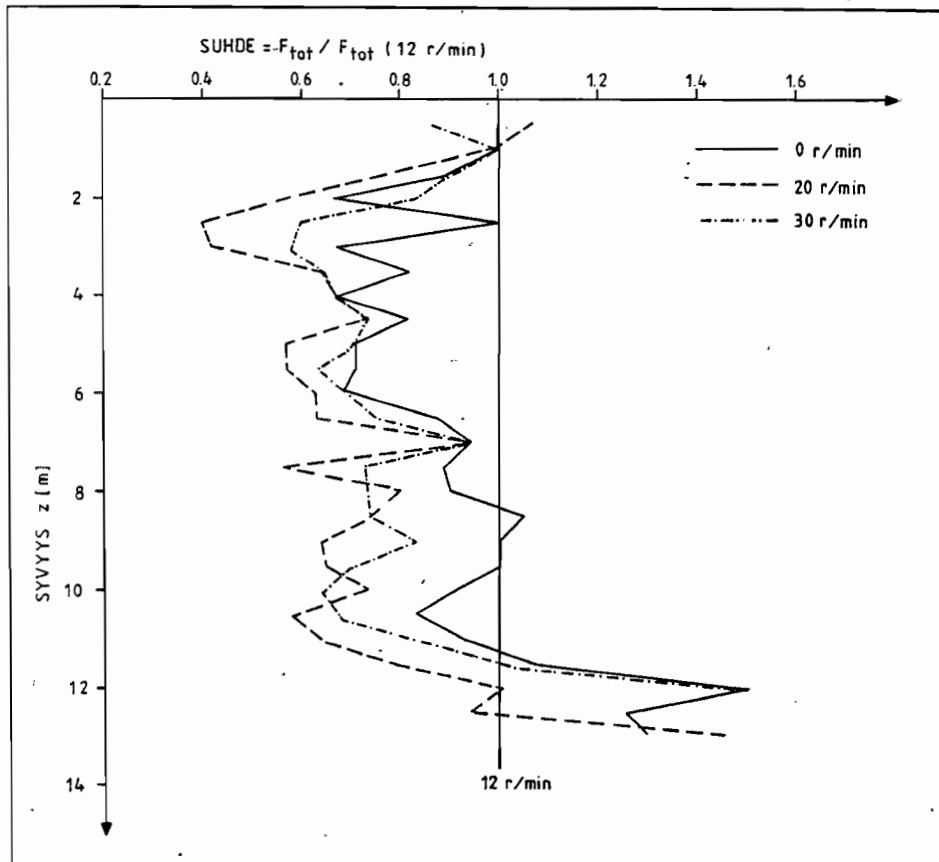
Kuva 23. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 0$ r/min) Torpparinmäki, Helsinki.



Kuva 26. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 30$ r/min) Torpparinmäki, Helsinki.



Kuva 25. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 20$ r/min) Torpparinmäki, Helsinki.



Kuva 27. Pyöritysnopeuksien vaikutus puristusvoimaan. Vertailupyöritysnopeus on 12 r/min. Torpparinmäki, Helsinki.

Vääntömomenttien keskiarvot laskettuna 0.20 metriä kohden ovat seuraavat:

- 12 r/min, $M = 17.4 \text{ Nm}$
- 20 r/min, $M = 12.7 \text{ Nm}$
- 30 r/min, $M = 14.0 \text{ Nm}$.

Torpparinmäessä vääntömomentit ovat noin 10 % suurempia kuin Mellunkylässä (lukuunottamatta nopeutta 30 r/min). Torpparinmäen kairaukset ovat noin 40 % pidempiä kuin Mellunkylässä, jossa tiivimpien maakerrosten paksuus on suurempi. Yllättävää on, että suurin momentti molemmissa kohteissa oli pyöritysnopeudella 12 r/min ja pienin momentti pyöritysnopeudella 20 r/min. Syy tämän kaltaiseen tulokseen on jokin seuraavista:

- kalibrointi tai nolla-asetus ei ole oikea
- pyöritysnopeudella 20 r/min kärki ei ole pyörinyt tankojen mukana ja muilla nopeuksilla on
- pyöritysnopeus 12 r/min ei riitä saamaan savea täysin plastiseen tilaan.

Tunkeutumissyvyyydet ovat taulukossa 6. Puristusvaiheessa ei ole eroja. Heijarista ei voida tehdä päätelmiä lyhyen heijausmatkan vuoksi.

Taulukko 6. Tunkeutumissyvyyydet eri pyöritysnopeuksilla. Torpparinmäki, Helsinki.

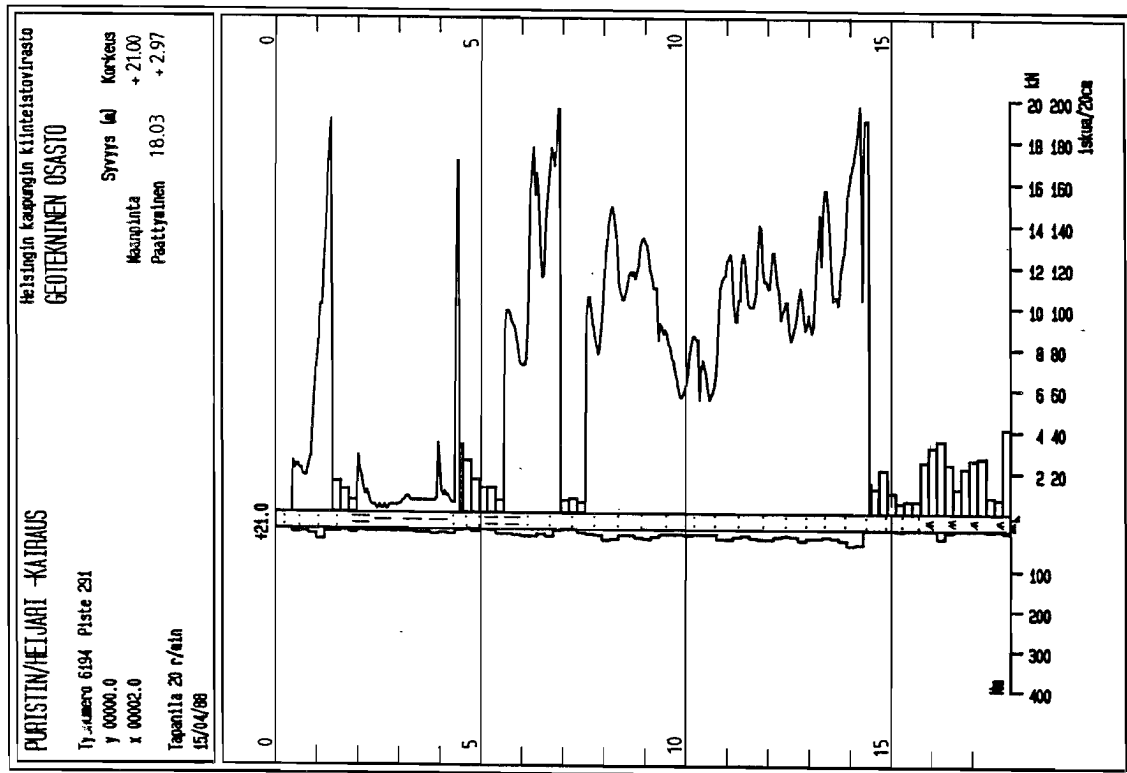
PYÖRITYSNOPEUS R (r/min)	TORPPARINMÄKI KAIRAUSVAIHE		YHTEENSÄ s(m)
	KESK.ARVO PURISTUS s(m)	KESK.ARVO HEIJARI s(m)	
0	12.9	1.7	14.6
12	13.0	0.9	13.9
20	13.1	1.5	14.6
30	12.7	0.6	13.3

Torpparinmäessä eri pyöritysnopeuksilla on selvästi pienempi vaikutus puristusvoimaan kuin Mellunkylässä. Erottelukyvyn suhteen paras pyöritysnopeus on 12 r/min. Perusteena on kärkivastuksen samankaltaisuus verrattuna CPTU:n, josta lisää luvussa 8.3.

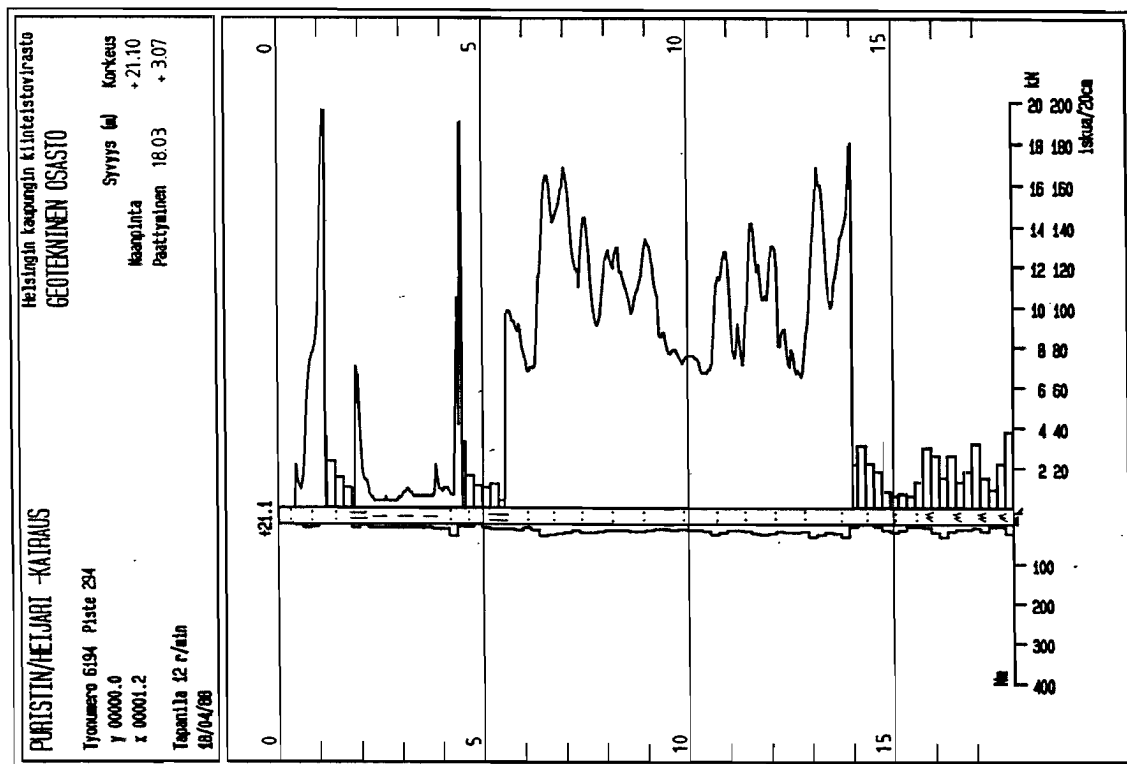
TAPANILA

Tapanilan koetulokset ovat kuvissa 28 ja 29. Liitteistä 5 ja 6 selviää pisteiden sijoittuminen koealueella.

Tapanilassa tehtiin kaksi pyöritysnopeuskoetta: 12 r/min ja 20 r/min. Molemmilla pyöritysnopeuksilla erottuvat maakerrokset samalla tavalla ja puristusvoimat ovat pääpiirteissään samanlaiset. Nopeuksilla on hetkellisenä vaihteluerona -22 - +40 %. Tämä ero on pieni, sillä kahdella täysin samanlaisella nopeudella hiekkamaassa tehdyissä kokeissa ei päästä juurikaan pienempiin eroihin.



Kuva 29. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 20$ r/min) Tapanila, Helsinki.



Kuva 28. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min) Tapanila, Helsinki.

Heijariosalla viimeisen 3.4 metrin matkalla iskuluku oli 302 lyöntiä/3.4 m kun pyöritysnopeus oli 12 r/min, ja 318 lyöntiä/3.4 m kun pyöritysnopeus oli 20 r/min. Eroa näillä kahdella on 5 %. Pyöritysnopeudella ei ole merkitystä ainakaan Tapanilassa. Tunkeutumissyvyyydet ovat molemmissa kairauksissa lähes yhtä suuret (eroa 0,03 m).

Vääntömomentin keskiarvot 0.20 metriä kohden ovat seuraavat:

- 12 r/min, M = 16.0 Nm
- 20 r/min, M = 14.0 Nm.

Koetulokset olivat molemmilla pyöritysnopeuksilla lähes samanlaisia, joten näiden tutkimusten perusteella ei paremmuutta voida määritellä.

YHTEENVETO

Savisten silttikerrosten havaittavuus lisääntyy pyörittämällä tankoja, mikä johtuu kärkeen ja tankoihin kohdistuvasta vaippakitkasta. Pyöritysnopeus 30 r/min on kuitenkin liian suuri. Paksuissa savikerroksissa pyöritysnopeuden kasvaessa 12 r/min:sta 20 r/min:iin tai 30 r/min:iin puristusvoima pienenee 0 - 30 %. Pyörittämättä tehdyssä kairauksessa puristusvoima oli poikkeuksellisesti Torpparinmäen savessa 0 - 30 % pienempi kuin pyöritysnopeudella 12 r/min. Silteissä ja hiekoissa ei pyörityksellä ollut juurikaan merkitystä kairausvastukseen. Mellunkylässä ja Torpparinmäessä vääntömomentti oli pyöritysnopeudella 20 r/min keskimäärin 25 % pienempi kuin pyöritysnopeudella 12 r/min. Ero johtunee saven plastisoitumisesta. Näillä koealueilla pyöritysnopeuksilla ei ollut mainittavaa vaikutusta tunkeutumissyvyysiin. Havainnollisin ja tarkin kaikista vaihtoehdoista on pyöritysnopeus 12 r/min. Tästä luvusta eteenpäin tehdyissä tutkimuksissa käytetään puristusnopeutena 1.2 m/min ja pyöritysnopeutena 12 r/min.

6. PURISTUSVOIMA

6.1 Laitteiston asettamat rajoitukset

Puristin-heijarikairalla saadaan puristusvaiheesta huomattavasti enemmän informaatiota kuin heijarivaiheesta. Käytössä oleva laitteisto asettaa kuitenkin rajoituksen suurimmalle puristusvoimalle. Puristin-heijarikairan puristusteho ja kokonaispaino ovat tärkeimmät tekijät, jotka rajoittavat maksimaalista puristusvoimaa.

Puristin-heijarikairausyksikön paino ja painopisteen sijainti ratkaisivat yleensä suurimman puristusvoiman. Alustan paino vaihtelee tela-alustalla nykyisin noin 1500 - 4000 kg ja traktorialustalla noin 2500 - 3500 kg. Lisäksi kairamasto painaa noin 500 kg ja muut varusteet myös noin 500 kg. Kokonaisuudessaan laitteiston massa on noin 4000 - 5000 kg riippuen alustoista ja varusteista. Tällöin suurin mahdollinen puristusvoima on noin 18 - 25 kN ilman ankkurointia (lukuunottamatta kevyitä tela-alustoja). Maa-ankkureita käytettäessä päästään yli 30 kN puristusvoimiin. Puristusvoimaa voidaan myös lisätä, jos kairausyksikössä on tukijalat painopisteen siirtoa varten. Lisäksi kairaajat voivat seistä painona tätä varten tehdyllä erikoisvalmisteisella astinlaudalla. On erittäin tärkeää, että haluttu puristusvoima voidaan välittää tankoihin riippumatta olosuhteista.

6.2 Tuloksien havainnollisuus

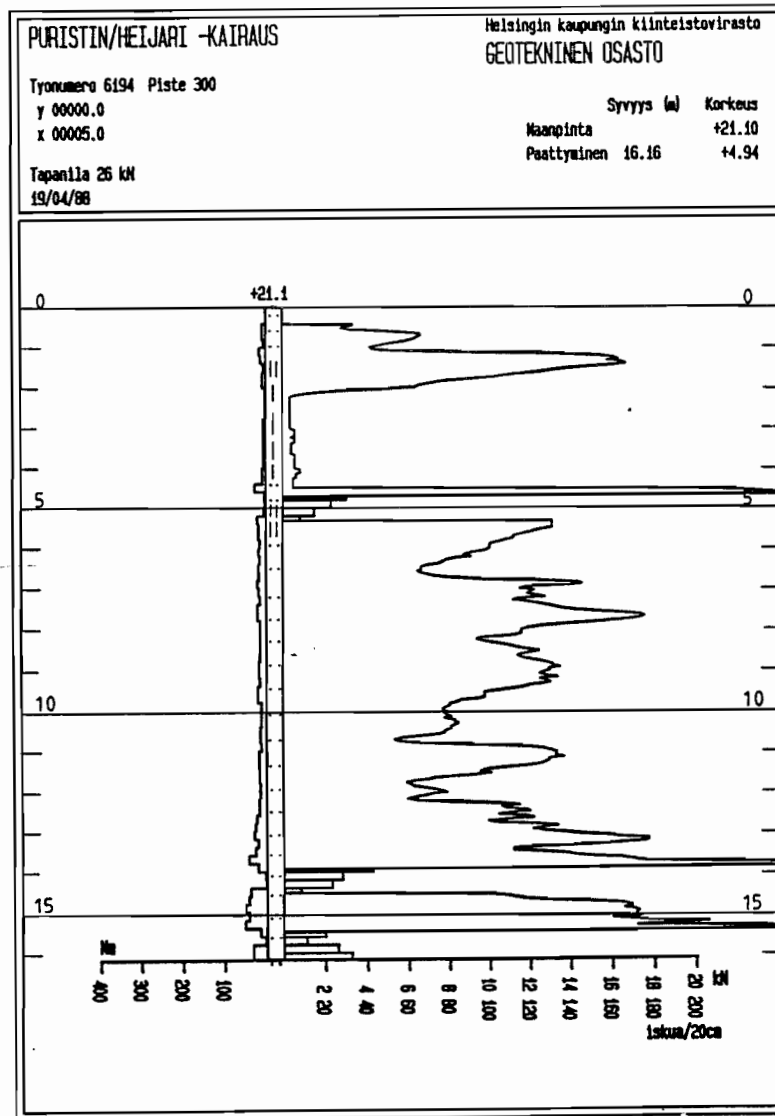
Vaadittavan maksimipuristusvoiman tulee olla riittävän suuri, jotta koheesiomaakerrokset ja löyhät kitkamaakerrokset voidaan kairata puristamalla. Käyttökelpoisuutta ja taloudellisuutta ei kuitenkaan pidä unohtaa. Jossakin vaiheessa saavutetaan kuitenkin rajatilanne, jossa puristusvoiman kasvu ei lisää informaation määrää samassa suhteessa.

Ennen tätä tutkimusta tehdyissä Helsingin kaupungin puristin-heijarikairauksissa puristusvoima (F_{tot}) on vaihdellut 13 - 20 kN. Tässä tutkimuksessa F_{tot} on normaalisti ollut 18 - 20 kN. Tapanilassa tehtiin yksi kairaus, jossa F_{tot} oli 26 kN.

Kuvassa 30 on Tapanilassa tehty puristin-heijarikairaus, jossa maksimipuristusvoima oli noin 26 kN. Mikäli maksimipuristusvoima olisi ollut 18 kN, olisi yhteenlaskettu puristusmatka vähentynyt noin 0,65 metrillä. Puristusvoimalla 26 kN olisi saatu pientä lisähyötyä ainoastaan 15 m syvyydellä. Kun puristinkairauksesta siirrytään heijarikairaukseen, menetetään puristusvoiman mittausta ja myös vääntömomentin suuruus muuttuu. Ainakin käytetyllä rekisteröintilaitteistolla mitattu vääntömomentti putoaa heijarikairauksessa hyvin lähelle nollaa, mikäli kivet eivät hankaa tankoihin ja kärkeen tai maaperä ole huomattavan tiivistä. Vaikka tässä kohteessa käytettiin normaalia suurempaa puristusvoimaa, ei maalajitulkinta eikä maan tiiviyn arvioiminen ollut helpompaa.

Kaikissa tässä työssä käsiteltävissä kohteissa on savi- ja useimmat silttikerrokset on onnistuttu puristamaan normaalilla puristusvoimalla $F_{tot} = 18 - 20$ kN. Normaalisti silttikerroksen alla oleva kovempi kerros tulee kairatessa vastaan niin nopeasti, että suuremmasta puristusvoimasta ei ole käytännössä hyötyä. Tämä koskee varsinkin sellaisia kohteita, joissa silttikerros on ohut ja välittömästi sen alapuolella on moreenia. Paksussa ja tiiviissä hiekkakerroksessa suuremmasta puristusvoimasta voi olla enemmänkin hyötyä, jolloin kairausdiagrammista saadaan jatkuva, eikä siinä ole mahdollisia ohuita heijarikairauskerroksia. Tällöin tarvittavaa suurinta puristusvoimaa ei kuitenkaan voida määrittää tämän työn aineiston pohjalta. Kun kairataan maksimipuristuskapasiteetin rajoissa, syntyy ongelmia puristus- ja heijarikairauksien vaihdosta. Jos ohut tiivis kerros joudutaan heijarikairaamaan, paluu takaisin puristinkairaukseen saat-
taa kairaajalta jäädä tekemättä. Kuitenkin yleensä tulisi

välttää useita kairaustapoja lyhyillä kairausmatkoilla, sillä tulkinta vaikeutuu huomattavasti.



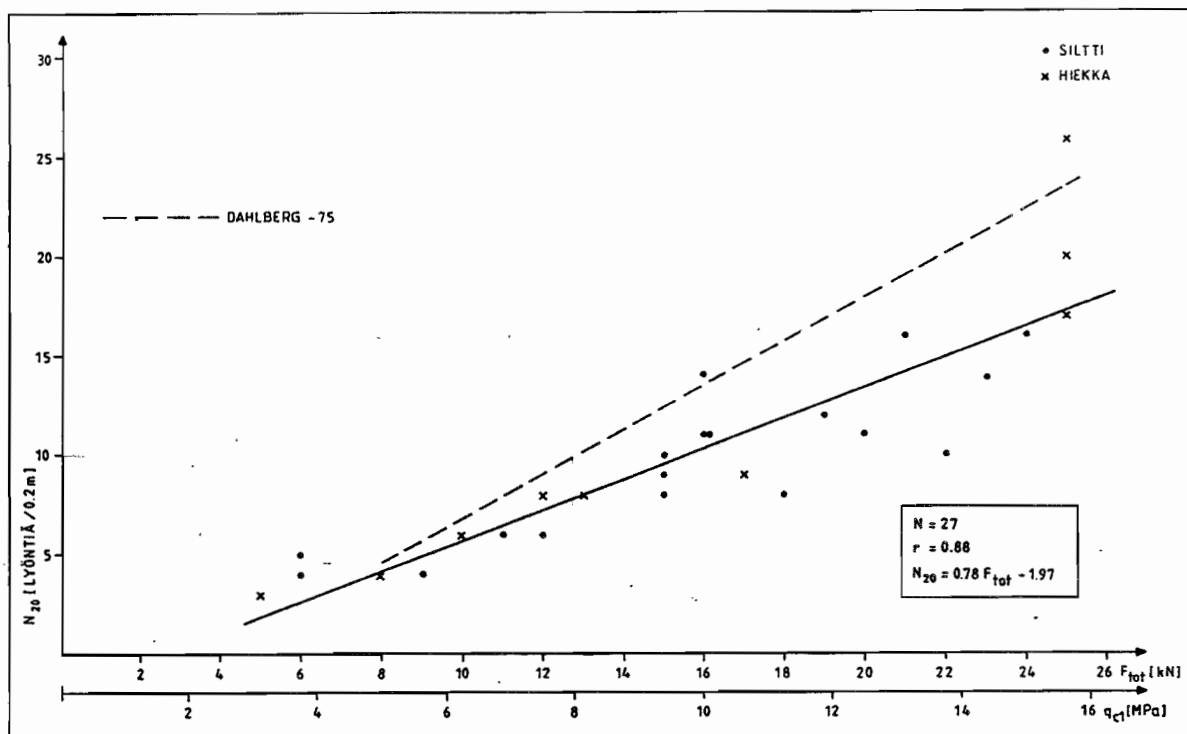
Kuva 30. Puristin-heijarikairaus ($v = 1.2$ m/min ja $R = 12$ r/min), jossa puristusvoima on 26 kN. Tapanila, Helsinki.

Maksimi puristusvoiman pitäisi puristin-heijarikairalla olla vähintään 16 kN. Tällä voimalla voidaan riittävän hyvin selvittää maakerrosrajat ja haluttaessa tiiviyskin. Koska maksimipuristusvoiman tulee olla mahdollisimman stabiili koko kairauksen ajan, on suositeltavaa, että puristin-heijarikairalla pitäisi pystyä puristamaan 20 kN ilman ankkurointia. Suuremmasta puristuskapasiteetista on etua, mutta se ei ole välttämätöntä ainakaan Helsingin kaupungin tapaisilla maaperillä.

6.3 Puristusvoiman ja iskuluvun vastaavuus

Puristinkairauksesta heijarikairaukseen siirryttäessä kairaustulosten tulkinta vaikeutuu. Tulosten esitystavasta johtuen tiiviissäkin maakerroksessa tehdyn heijarikairausdiagrammin leveys saattaa olla huomattavasti puristinkairausdiagrammia pienempi. Tällöin menetelmää tuntematon saattaa tulkita heijarikairauksen samanlaiseksi tai jopa heikommaksi kuin edellä tehty puristinkairaus (esim. kuva 30).

Kuvassa 31 on esitetty puristusvoiman ja iskuluvun vastaavuus tämän työn aineiston pohjalta. Kuvaajalle laskettu korrelaatiokerroin (r) on 0,882. Kuvassa esitetään vertailun vuoksi Dahlbergin /7/ kuvaaja (CPT ja heijarikairaus), mutta on huomattava, että tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä tässä työssä on heijarikairauksessa käytetty jatkuvaa pyöritysnopeutta 12 r/min.



Kuva 31. Puristin-heijarikairan puristusvoiman tai kärkivastuksen (q_{c1}) ja iskuluvun vastaavuus.

Tämän aineiston pohjalta kaikki hiekkapistteet ovat erittäin lähellä regressiosuoraa paitsi yksi, jossa N_{20} on 26. Mellunkylän silttikerroksissa iskusuhte on noin 20 % suurempi kuin Tapanilan silteissä. Iskusuhte (Blow Ratio, BR) on esitetty kaavassa (1).

$$BR = N_{20}/q_c \quad (1)$$

N_{20} on iskuluku
 q_c kärkivastus.

Eroja on siis samoilla maalajeillakin, mutta ne ovat melko pieniä. Tapanilassa silttikerroksissa BR on hieman suurempi kuin hiekkakerroksissa. Tämä johtunee siitä, että lyönnin aikana siltissä ehtii kehittyä huokosylipainetta enemmän kuin hiekassa, jossa sitä ei välttämättä kehity lainkaan.

Jollei käytössä ole kuvaa 31, voidaan arvioida, että BR on yksi. Tämä arvio pitää paikkansa 10 % tarkkuudella (verrattuna regressiosuoraan) kun $6,5 < q_c < 12,5$ MPa.

Bromsin /10/ mukaan karkeissa kitkamaissa (karkea hiekka ja sora) kairausvastus on dynaamisessa kairauksessa pienempi kuin staattisessa kairauksessa. Päinvastainen tilanne on hienoilla kitkamailla (siltti ja hieno hiekka). Staattisen ja dynaamisen kairauksen vastusten suhde on riippuvainen raekoosta. Puristin-heijarikairalla ei tämän aineiston pohjalta havaita tällaista riippuvuutta.

Puristusvoiman ja iskuluvun vastaavuutta tarvitaan seuraavissa tapauksissa:

- useita kairauspisteitä on lähekkäin ja joissakin on puristaminen onnistunut, mutta ei kaikissa
- kärki on löyhässä hiekassa kohdannut pienen kiven, jonka vuoksi on siirrytty heijarikairaukseen mutta ei palatakaan takaisin puristinkairaukseen, vaikka se olisi mahdollista

- lyhyellä matkalla pitäisi kairaustapaa vaihtaa useita kertoja, mutta sitä ei kuitenkaan tehdä.
- halutaan soveltaa puristusvaiheen tulkintamalleja heijarivaiheeseen.

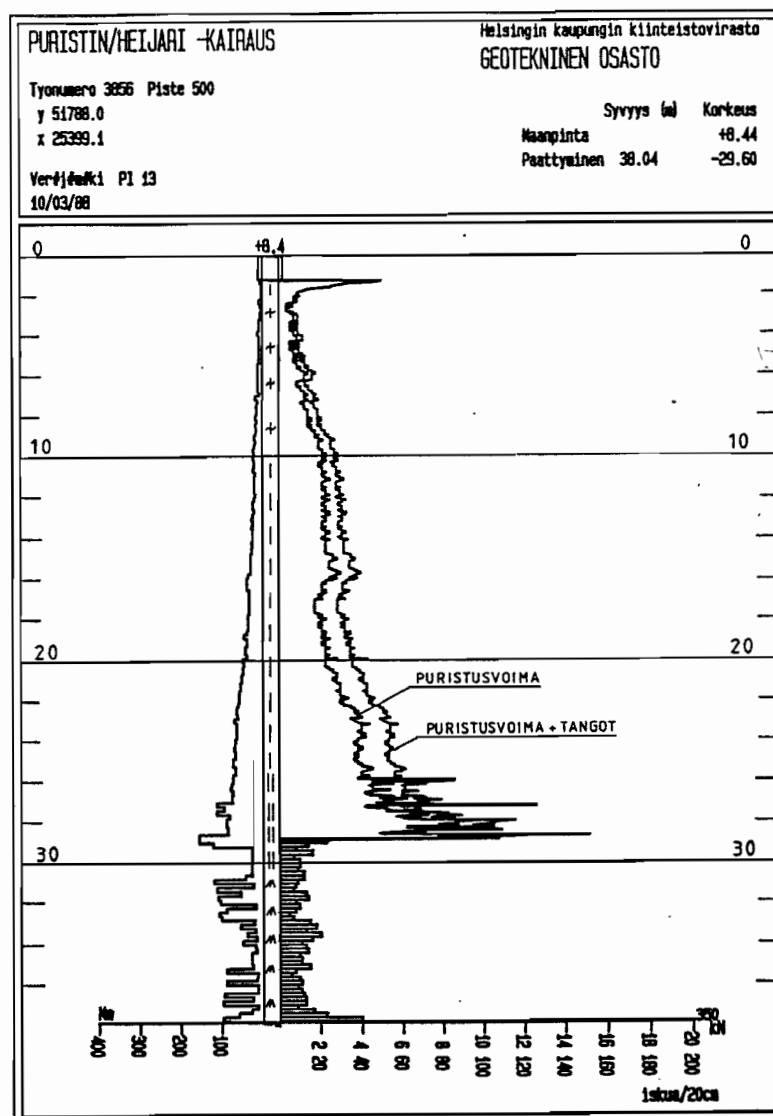
6.4 Tankojen vaikutus

Painokairauksessa ja mekaanisessa CPT-kairauksessa ei oteta tankojen painoa huomioon. Sähköisesti kärjestä mitattavissa CPT-kairauksissa ei tankojen painoilla ole luonnollisestikaan mitään merkitystä. Kuitenkin kairauksissa, joissa mitataan tankojen yläpäästä puristusvoima tai iskujen lukumäärä, on tankojen painoilla merkitystä. Esimerkiksi painokairatessa 10 metrin syvyydessä täysillä painoilla (100 kg) todellisuudessa painoa on 125 kg, vaikka veden nostekin olisi otettu täysin huomioon. Toisaalta on katsottu, että jättämällä tankojen paino huomioidatta, kompensoidaan vaippahankauksen vaikutusta kairausvastukseen. Menetelmä on näin kuitenkin epämääräinen.

Puristin-heijarikairauksessa tulokset voidaan esittää kokonaisvastuksen sijasta myös ns. suhteellisena kärkivastuksena (q_c). Luvussa 8.3 osoitetaan, että kärkivastuksen suuruus on oikeaa luokkaa, kun tankojen paino lasketaan mukaan. Tämän työn aikana ei ole ilmennyt syytä, jonka takia tankojen painoa ei huomioitaisi. Kuvassa 32 esitetään tankojen painon vaikutus kärkivastusta laskettaessa.

Puristin-heijarikairan tangon halkaisija on Ø32 mm ja pituus 1,0 m (tässä työssä). Yhden tangon massa on noin 6 kg. Tankojen painot lisättiin puristinkairausvaiheessa automaattisesti tietokoneella samalla, kun siihen purettiin tiedot. Lisäys tapahtuu siten, että kairan kärjen ollessa maanpinnassa on jo yksi tanko huomioitu. Sen jälkeen aina tasan metrin välein lisätään yksi tanko. Esimerkiksi syvyydessä 1,1 metriä on huomioitu kaksi tankoa eli yhteensä 12 kg. Veden aiheuttama noste tankoa kohden

on 0,8 kg, joka on 13 % 6 kg:sta. Kokonaisuudessa nosteen merkitys on hyvin pieni. Toisaalta savimaissa ei ole lainkaan selvää, että vesi täyttää kairareian ja aiheuttaisi täysimääräisen nosteen. Hiekkamaassa, joka läpäisee hyvin vettä, noste voi olla hyvin lähellä sen täyttää arvoa. Tässä työssä on kaikissa kairauskuviissa tankojen paino otettu huomioon ilman nostetta, jollei erikseen ole muuta mainittu.



Kuva 32. Tankojen painon vaikutus puristusvaiheen diagrammiin. Veräjämäki, Helsinki.

Vesistökairauksissa ei voida samalla tavalla huomioida tankojen painoja. Mikäli ns. alkukairausta on vedessä useita metrejä, otetaan tankojen noste huomioon alkukai-

rauksen osuudella. Jos maaperä on tiivistä, joudutaan tankoja puristamaan ja tällöin voidaan tankojen painot ottaa heti huomioon. Maaperän ollessa pehmeää savea tai muuta löyhää maata voidaan tankoja joutua jopa kannattelemaan, jotta tunkeutumisnopeus ei olisi liian suuri. Tällaisessa tapauksessa kannatteluvoima olisi tunnettava, jotta voitaisiin huomioida tankojen painot oikein. Jokainen vesistökairus on aina oma tapaus ja harkinnan mukaan pitää ratkaista tankojen painon huomioonotto.

Lyhyissä kairausrei'issä (alle 7 m) ja kitkamaaperässä tankojen vaikutus on vähäinen. Jos kairausreikä on syvä, syntyy heijarikairauksessa pientä virhettä, koska tankojen painoja ei huomioida. Heijarikairausvaiheessa virhettä aiheuttaa myös tukikehikon paino, joka välittyy tankoihin.

7. TULOSTEN TULKINTA

7.1 Kärkivastus

Kairausvastus on tärkein informaatio, joka kairauksesta saadaan. Tuloksissa ilmoitettava kairausvastus voi olla jokin seuraavista:

- kokonaisvastus (F_{tot})
- kärkivastus (q_c)
- vaippavastus (f_s).

Perinteisissä kairaustavoissa (esim. paino- ja heijari-kairaus) on käytetty kokonaisvastusta. Geoteknistä suunnittelijaa kiinnostaa eniten kärkivastus, sillä se kertoo kairausvastuksen juuri sillä kohdalla, missä kärki on. Vaippavastusta tarvitaan esim. maalajimäärittelyyn, johon käytetään ns. kitka-suhdetta $(FR)/28/$, kaava (2).

$$FR = f_s/q_c \times 100 \% \quad (2)$$

f_s on vaippakitka
 q_c kärkivastus

Puristin-heijarikairan kärki- ja vaippavastuksen mittaus-tapa poikkeaa puristinkairan sähköisistä kärjistä, joissa kärkivastus (ja mahdollisesti vaippakitka) taltioituu voima-antureiden avulla kärkeen. Vaihtoehtoisesti tiedot voidaan välittää myös kaapelin avulla tai akustisesti maan pinnalle. Puristin-heijarikairassa joudutaan vastukset mittaamaan kärkeen ja tankoihin kohdistuvasta kokonaispuristusvoimasta sekä vääntömomentista tangoston yläpäässä.

CPT:n standardikärjen halkaisija (d) on 36 mm. Puristin-heijarikairalla d on 45 mm. De Beerin /7,36/ mukaan ainakin tiiviissä savessa kärkivastus pinta-alaa kohden pienenee kärjen halkaisijan kasvaessa. Kärkivastus pienenee 14 %, jos kärjen halkaisija kasvaa Ø 36 mm:sta Ø 50 mm:iin.

Puristin-heijarikairalla kärkivastus voidaan arvioida kahdella eri tavalla. Vertailukohtana on tässä työssä pidetty CPTU-kairauksilla saatuja kärkivastuksen arvoja. Tavallisesti käytettävän kärkivastuksen (q_{c1}) määrittäminen on seuraavanlainen:

$$q_{c1} = F_{tot}/A_c \quad (3)$$

F_{tot} on puristusvoima (lisättynä tankojen painot)

A_c kärjen pinta-ala

Vähemmän käytetty kärkivastuksen (q_{c2}) määrittämistapa ottaa vääntömomentin huomioon:

$$q_{c2} = (F_{tot} - F_s)/A_c \quad (4)$$

F_s on pyörityksen voima

$$F_s = M/r_c \quad (5)$$

M on vääntömomentti

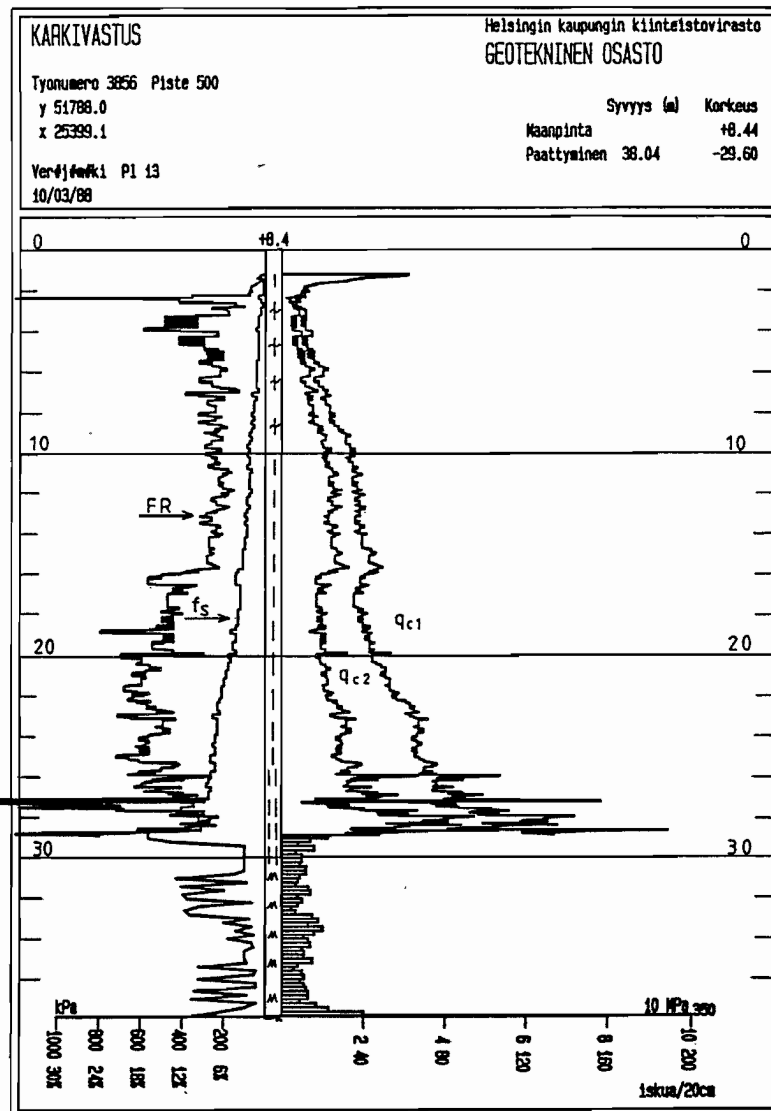
r_c kärjen säde

Kaava (4) perustuu siihen olettamukseen, että pyörittämiseen tarvittava voima (F_s) on yhtä suuri kuin puristamisen yhteydessä tankoihin ja kärjen vaippaan kohdistuva kitkavoima.

Kärkivastus q_{c1} korvataan q_{c2} :lla, jos jokin seuraavista vaihtoehtoista toteutuu:

- täyte aiheuttaa suuren vääntömomentin
- vääntömomentin suuri kasvu kesken kairauksen
- puristusvaiheen kairaussyvyys ylittää 20 m
- liejuisissa savissa varauksin.

Kuvassa 33 esitetään kärkivastukset q_{c1} ja q_{c2} kohteessa, jossa on käytettävä q_{c2} :ta, koska vääntömomentti kasvaa huomattavasti kesken kairauksen. Jos täytemaa aiheuttaa suuren vääntömomentin vain täytteenosuudelle, ei käytetä q_{c2} :ta.



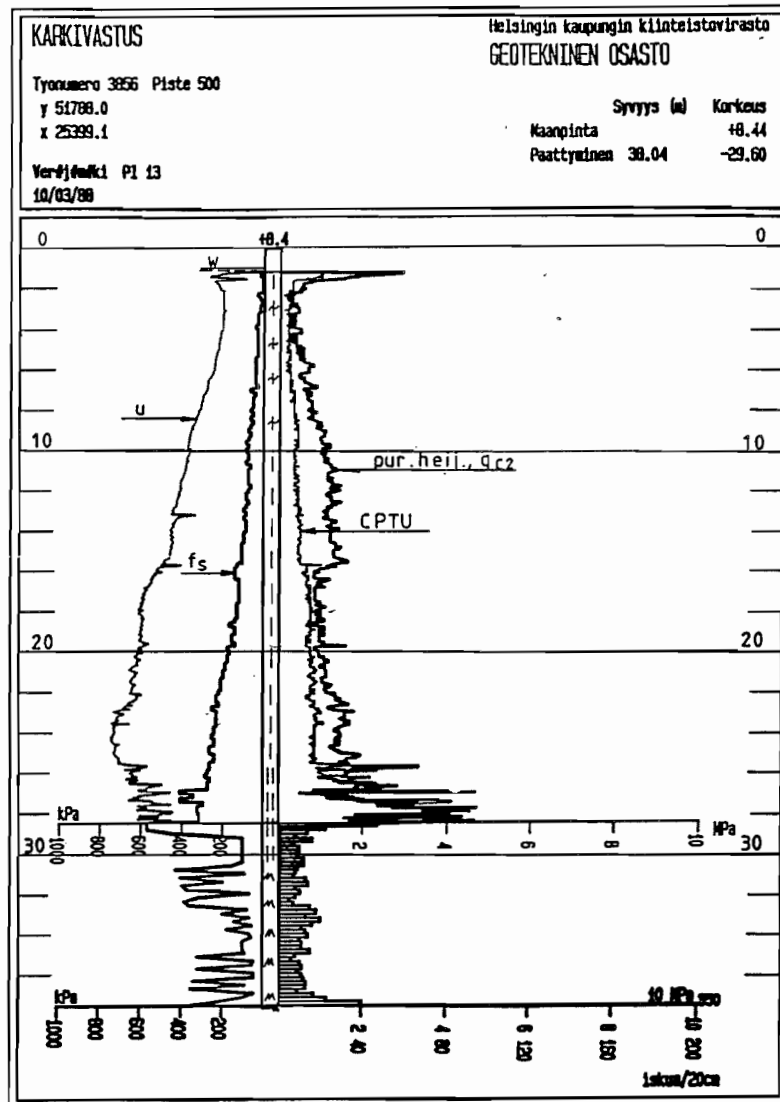
Kuva 33. Puristin-heijarikairaus, jossa on määritetty q_{c1} ja q_{c2} . Diagrammissa ilmenee myös kitkasuhde FR ($= f_s/q_{c2} \times 100 \%$) ja vaippakitka f_s . Veräjämäki, Helsinki.

Tämän työn aineiston pohjalta voidaan kärkeivastuksena käyttää yleensä q_{C1} :tä, sillä puristin-heijarikairan kärkeivastus pinta-alaa kohden on pienempi kuin CPT:llä suuren kärkeivastuksen vuoksi /7,36/. Lisäksi tankojen vaippakitka on vähäinen, koska tankojen halkaisija on huomattavasti pienempi kuin kärkeivastuksen.

Veräjänmäessä kuvassa 32 sivulla 45 vääntömomentin kasvu (ΔM) on poikkeuksellisen suuri savessa (syvyydellä 17 - 29 metriä). ΔM on keskimäärin 5.22 Nm/m. Savessa keskimääräinen ΔM on ollut tämän työn kohteissa normaalisti 1.5 - 3.5 Nm/m. Syvyydestä 16 metriä alaspäin puristin-heijarikairan kärkeivastus (q_{C2}) ja CPTU:n kärkeivastus ovat samaa suuruusluokkaa mutta 16 metristä ylöspäin puristin-heijarikaira näyttää kolminkertaisesti liian suurta kärkeivastusta (kuva 34). Puristin-heijarikairalla määritetty kärkeivastus saattaa olla liian suuri liejuisessa savessa ja liejussa. Tämän ainoan pisteen perusteella ei voida tehdä luotettavaa johtopäätöstä. Liejuisiin maaperiin on kuitenkin suhtauduttava varauksin.

Suurissa kairaussyvyyksissä vääntömomentti kasvaa helposti lähelle 100 Nm. Tällöin tankoihin kohdistuvan vaippakitkan vuoksi on määritettävä kärkeivastus q_{C2} . Karkeana sääntönä voidaan pitää siirtymistä q_{C2} :n määrittämiseen, kun kairaussyvyys ylittää 20 m. Kärkeivastuksen määrittämistä tulee kuitenkin aina määrittää tapauskohtaisesti.

Meighin /23/ mukaan kärki reagoi maaperän muutoksiin 5 - 10 kertaa kärkeivastuksen halkaisijan etäisyyden verran kärkeivastuksen ylä- ja alapuolella. Etäisyys kasvaa maan tiiviyyden kasvessa. Tästä seuraa, että kärkeivastus ei saavuta täyttä arvoaan esim. alle 0,7 metrin paksuisessa hiekkakerroksessa, joka on savessa.



Kuva 34. CPTU- ja puristin-heijarikairaus samassa kuvas-
sa. Puristin-heijarikairalla on määritetty q_{c2} ja f_s .
CPTU:n huokosvedenpaineen 0-taso on 100 kPa. Veräjämäki,
Helsinki.

7.2 Vaippavastus

Vaippavastuksen määrittäminen puristusvaiheessa poikkeaa muista puristinkairauksien (CPT) menetelmistä. Puristin-heijarikairalla se määritetään vääntömomentista. On huomattava, että tulokseksi saatava vaippavastus ei ole todellinen. Se on oikeammin laskennallinen vertailuluku, jota käytetään maalajien määrittämiseen (luku 7.3). Vaippavastusta laskettaessa oletetaan tässä työssä, että

vääntömomentti aiheutuu pelkästään kärjestä (paikallinen vaippavastus). Tankoihin kohdistuu kuitenkin lisääntyvää kitkaa ja koheesiota kairausvyöhykkeen kasvaessa. Suuri osa vääntömomentista syntyy siltiltä kärjestä, sillä esimerkiksi Mellunkylän kohteissa momentti kasvaa väliaikaisesti ohuissa silttikerroksissa. Kun kärki on ohittanut silttikerroksen, laskee momentti välittömästi alkuperäiseen arvoon. Kärki pyörii siis tankojen mukana, vaikka se onkin irttonainen. Vaippavastus määritetään kaavan (6) avulla.

$$f_s = F_s/A_s \quad (6)$$

F_s on pyörityksen voima (kaava 5 sivu 48)

A_s kärjen vaipan pinta-ala ($1.27 \times 10^{-2} \text{ m}^2$)

Taulukossa 7 ilmenee CPT:lle annettu vaippakitkan ja kärkivastuksen välinen yhteys /28/. Tämän työn aineiston perusteella puristin-heijarikairalla on koheesiomaissa liikipitäen samanlaiset riippuvuudet. Kitkamaissa puristin-heijarikairalla saadaan useimmiten pienempiä vaippakitkan arvoja.

Taulukko 7. Vaippakitkan (f_s) ja kärkivastuksen (q_c) välinen yhteys CPT:llä /28/.

MAALAJI	VAIPPAKITKA
SAVI JA TURVE	$q_c/30 < f_s < q_c/10$
SAVI	$q_c/25 < f_s < 2q_c/25$
SAVI, SILTTI, HIEKKA	$q_c/100 < f_s < q_c/25$
HIEKKA	$q_c/100 < f_s < 2q_c/25$
KARKEA HIEKKA, SORA	$f_s < q_c/150$

Dahlberg ja Bergdahl /12/ ovat määrittäneet heijarikairaukselle iskuluvun N_{skin} , joka vastaa vaippakitkan aiheuttamaa vastusta. Keskimääräinen vaippakitka τ_{av} tankojen ja maan välillä määritetään kaavalla (7). Lähtöolettamuksena täytyy τ_{av} :n olla horisontaalisesti ja vertikaalisesti yhtä suuria.

$$\tau_{av} = \frac{2 M}{L \pi D^2} \quad (7)$$

M on vääntömomentti

L tankojen pituus

D tankojen halkaisija

Vaippakitkan ylittämiseen tarvittava energia E_{skin} selviää kaavasta (8).

$$E_{skin} = \tau_{av} \pi D L e \quad (8)$$

e on tunkeutumisväli (0.20 m)

Sijoitetaan kaava (7) kaavaan (8), niin saadaan

$$E_{skin} = \frac{2 M e}{D} \quad (9)$$

Järkäleen aiheuttaman yhden iskun energia E_{blow} on

$$E_{blow} = m_0 g \alpha h \quad (10)$$

$$h' = h \alpha \quad (11)$$

m_0 on järkäleen massa (63.5 kg)

g kiihtyvyys

α tehokkuuskerroin

(vapaapudotusheijarilla 1.0)

h nimellinen pudotuskorkeus

h' tehokas pudotuskorkeus

Yhdistetään kaavat (10) ja (11).

$$E_{\text{blow}} = m_0 g h' \quad (12)$$

Nyt saadaan vaippakitkan iskuluku N_{skin} kaavojen (9) ja (12) suhteesta.

$$N_{\text{skin}} = E_{\text{skin}}/E_{\text{blow}} = 2 M e / (D m_0 g h') \quad (13)$$

Sijoitetaan lukuarvot kaavaan (13).

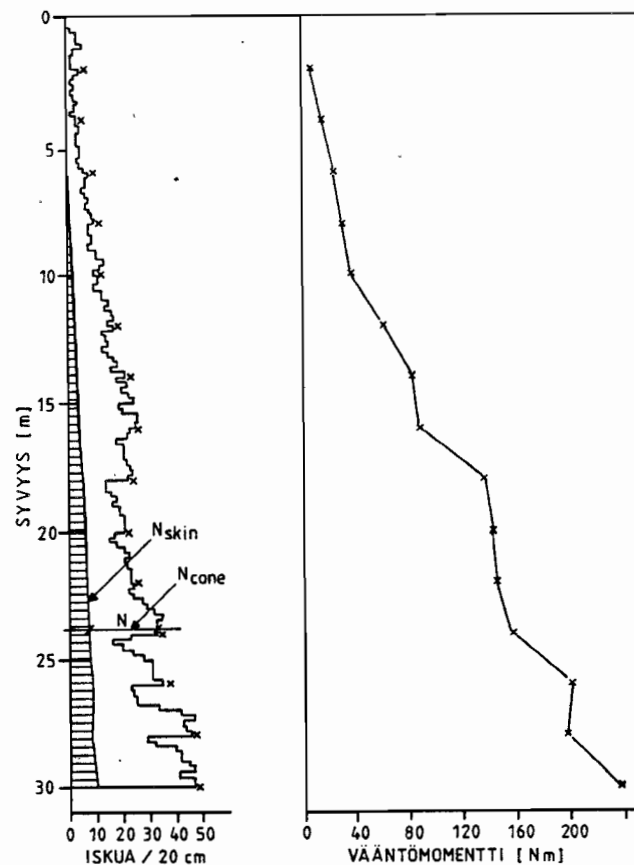
$$N_{\text{skin}} = \frac{2 \times M \times 0.2}{0.032 \times 63.5 \times 9.81 \times 1.0 \times 0.50}$$

$$N_{\text{skin}} = 0.040 M$$

Käytössä olleen puristin-heijarikairan kärkivastuksen iskuluku (N_{cone}) on siten

$$\begin{aligned} N_{\text{cone}} &= N_{20} - N_{\text{skin}} \\ &= N_{20} - 0.04 M \end{aligned} \quad (14)$$

Kokonaisvastusiskuluvun (N_{20}) korvaaminen N_{cone} :lla tulostusdiagrammeissa ei ole käytännöllistä, jotta pysyttäisiin SGY:n heijarikairaussuosituksen tuntumassa. Puristin-heijarikairan heijariosuus poikkeaa suosituksesta jatkuvan pyörityksen vuoksi. Jos vielä käytettäisiin iskulukuna N_{cone} , eivät tavalliset heijarikairaukset olisi vertailukelpoisia puristin-heijarikairan kanssa, jonka iskuluku saattaisi olla jopa 50 % pienempi kuin tavallisessa heijarikairauksessa. Kuitenkin N_{cone} :a on syytä käyttää harkinnan mukaan geoteknisessä suunnittelussa (esim. kuvassa 35). Jos suuri vääntömomentti johtuu tankojen vääntymisestä, N_{cone} :a ei voida käyttää. Tuloksena olisi liian pieni arvo.



Kuva 35. Heijarikairauksessa tankojen pyörittämiseen tarvittavan vääntömomentin huomioiminen iskulukua laskettaessa. N_{skin} on vaippavastus ja N_{cone} kärkivastus /12/.

7.3 Maakerrokset ja maalajit

Tärkeimmät ominaisuudet, joita pohjatutkimisvälineiltä yleensä vaaditaan, ovat maakerrosten ja maalajien tunnistaminen. Vasta näiden jälkeen tulee mahdollisuuksien mukaan erilaisten parametrien määrittäminen.

Kitkamaakerroksissa puristusvaiheen kärkivastuksen vaihtelu aiheutuu useimmiten maakerrosten tiiviyyden muutoksista ja /tai maalajin rakeisuuden muutoksista. Koheesio- maakerroksissa kärkivastuksen muuttuminen havaitaan selvimmin leikkauslujuuksien muutoksia seuraten.

Maalajien tunnistaminen tehdään normaalisti CPT- ja puristinheijarikairauksissa kärkevastuksesta. Parempaan tarkkuuteen päästään, jos otetaan huomioon kitkasuhde FR (Friction Ratio) /28/, kaava (2 bis). CPTU-kairauksilla saadaan paras maalajitulkinta, sillä huokospaine antaa paremman ja varmemman kuvan silteistä ja hiekoista.

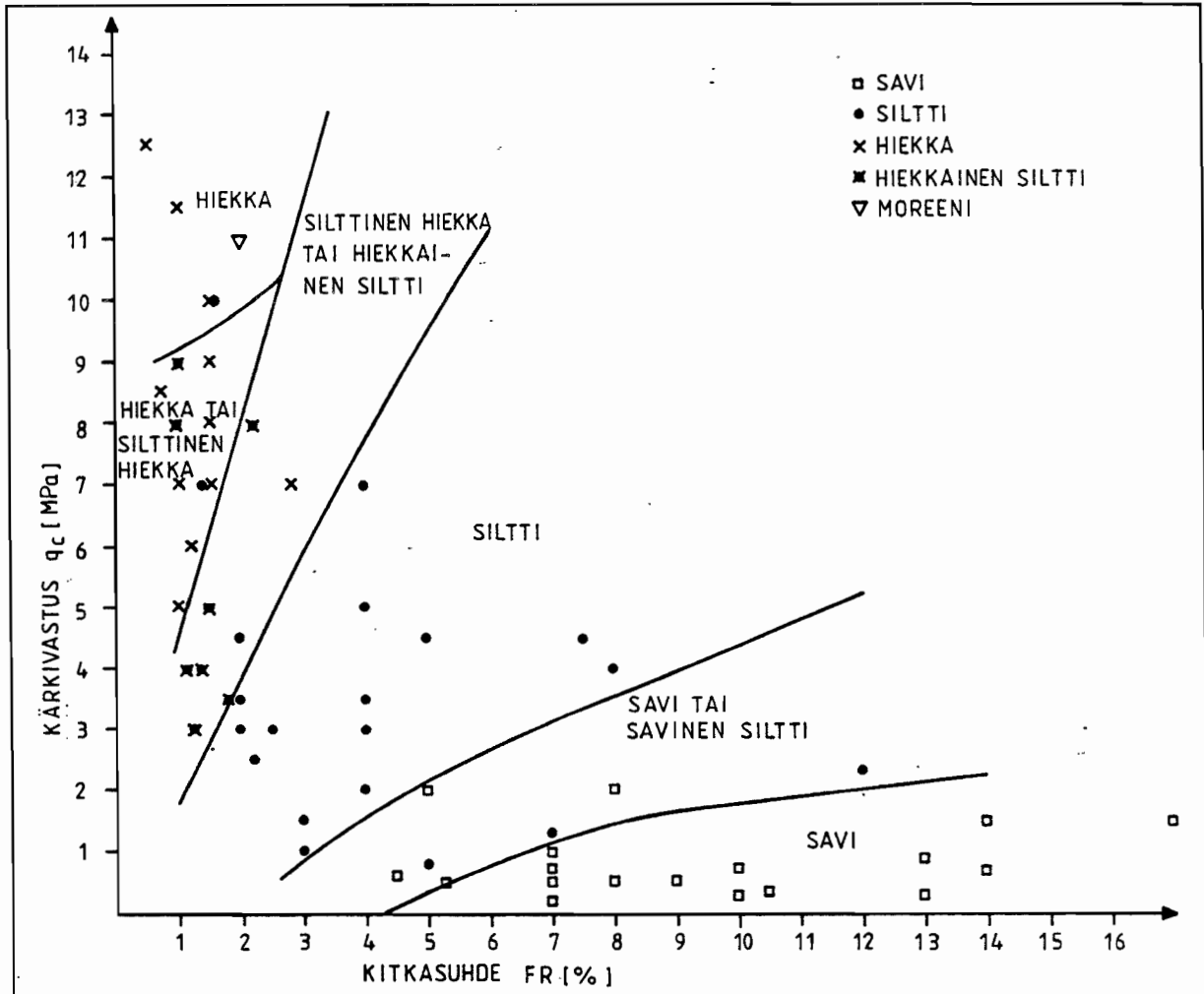
$$FR = f_s/q_c \times 100 \% \quad (2 \text{ bis})$$

Puristin-heijarikairan puristusvaiheelle laadittu maalajitulkinta tämän työn aineiston pohjalta esitetään kuvassa 36. Maalajinmääritykset perustuvat 17 erilaiseen näytetepisteen ja puristin-heijarikairaustulosten vertailuun Helsingin alueella. Maalajimääritykset (kuvat 36 ja 37) tehtiin areometrikokeiden, seulomisten ja visuaalisten havaintojen perusteella. Tuloksentekijän heikkoutena on vaippakitkan mittaaminen, sillä mittausvirheet välittyvät suoraan kitkasuhteeseen. Kuivakuorisavissa ei tätä tulkintaa ole syytä käyttää, koska kitkasuhde pienenee oleellisesti. Maalajiksi tulisi usein siltti. Pieni kärkevastuksen arvo aiheuttaa epätarkkuutta kitkasuhteeseen. Jos q_c on alle 0.5 MPa, voi FR:ssä olla noin 25 % virhe. Tähän on syynä puristusvoiman erottelukyky.

Maakerrosten määrittämiseksi olisi kairausten lisäksi suositeltavaa ottaa tutkimusalueelta ainakin yksi näyte tulkittua maalajikerrosta kohden. Haittana voi olla näytteen epäjatkuvuus, jolloin pienet maalajivaihtelut saattavat jäädä huomioimatta. Kairaajat eivät siis tee maalajitulkintoja kairauksen yhteydessä. Tulokinnat tehdään kairausvastusten ja näytteiden perusteella.

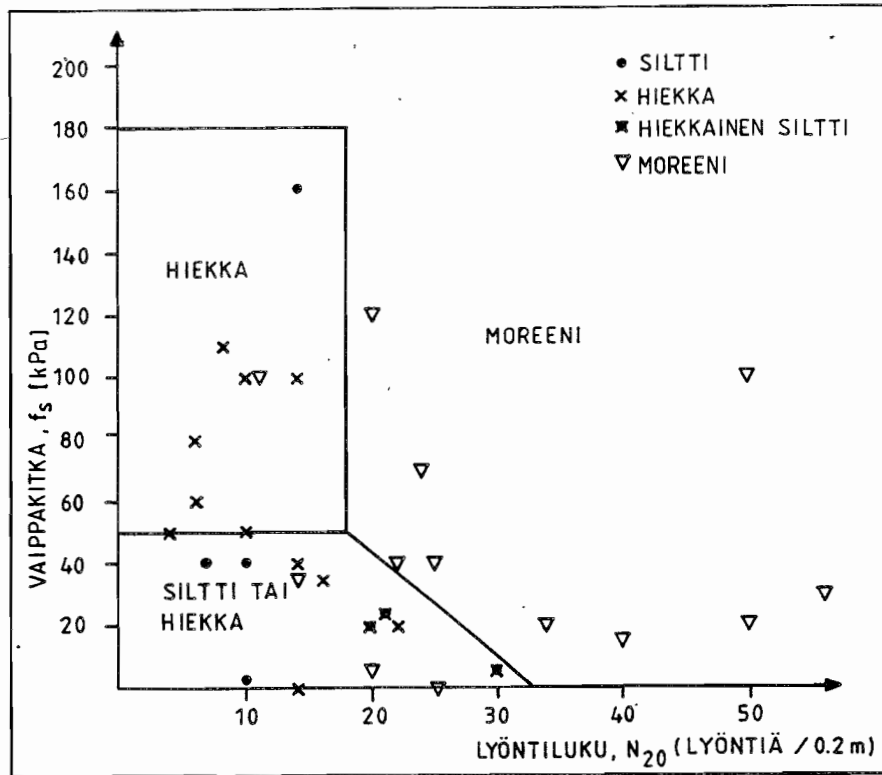
Heijarivaiheen kairauksia on huomattavasti vaikeampi tulkita kuin puristusvaihetta. Kuvassa 37 esitetään ainoastaan maalajitulkinta karkeille maalajeille. Ainakaan toistaiseksi ei ole syytä mennä tarkempaan määritykseen. Tietoutta pitäisi etenkin heijarivaiheen kairauksista kerätä huomattavasti lisää, ennen kuin on mahdollista päästä tarkempaan tulokseen. Kivien hankaus tankoihin ja kär-

keen sekä momentin rekisteröinti ovat suurimpia ongelmia heijarikairausvaiheessa.

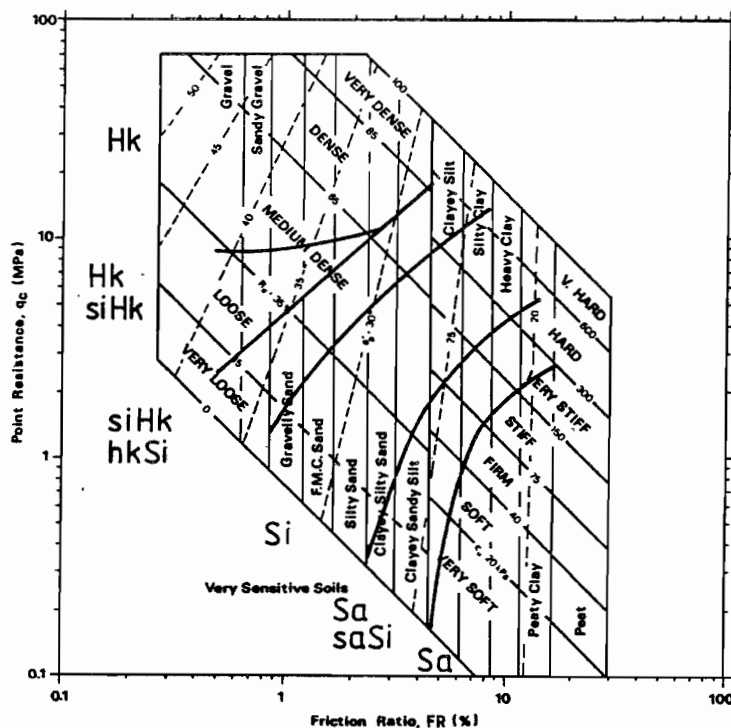


Kuva 36. Puristin-heijarikairauksen puristusvaiheen maalaajan tulkinta.

Maalajitulkintoja, jotka perustuvat kitkasuhteeseen, ovat tehneet mm. Begemann (1965), Schmertmann (1969) ja Searle (1979) /29/. Tulkinnot ovat yleensäkin hieman epävarmoja maalajien rajoilla. Kokonaisuutena ne ovat kuitenkin osoittautuneet käytännöllisiksi. Kuvassa 38 on Searlen tekemä maan tulkintadiagrammi mekaaniselle Dutch-kärjelle. Samaan kuvaan on piirretty myös puristin-heijarikairan maalajien tulkinnot. Searle on erittäin tarkoin eritellyt erilaiset ominaisuudet. Puristin-heijarikairalla ei ole mahdollista päästä näin tarkkaan tulkintaan ainaakaan nyt käytössä olevalla laitteistolla.



Kuva 37. Puristin-heijarikairauksen heijarivaiheen maala-
jin tulkinta. Käytettävä varauksin.



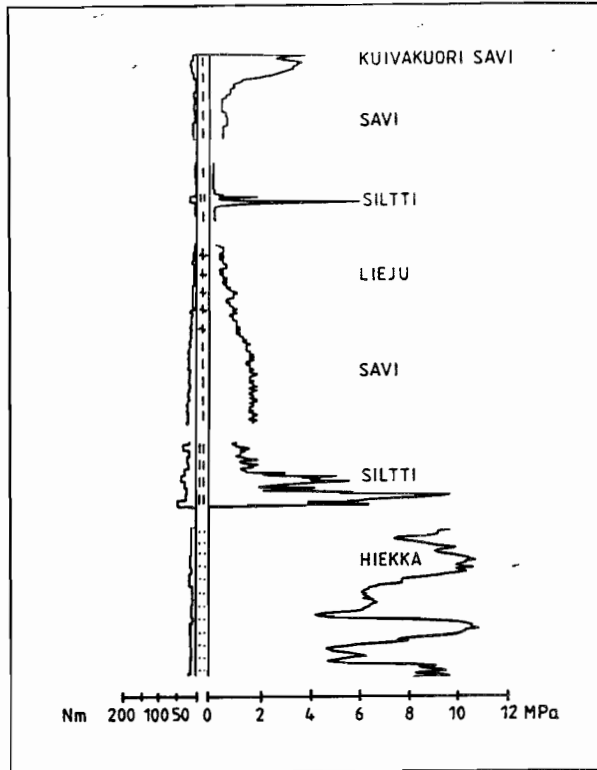
Kuva 38. Puristin-heijarikairauksen ja Searlen /29/
CPT:lle määrittämä tulkintadiagrammi.

Puristin-heijarikairan maalajimäärityksessä saadaan hienorakeisempia maalajeja kuin Searlen määrityksellä, kun kärkivastus on 1 - 10 MPa ja kitkasuhde on alle 1.5 %. Jos kärkivastus on yli 3 MPa ja kitkasuhde yli 6 %, puristin-heijarikairan maalajimääritys osoittaa karkeampia maalajeja kuin Searlen määrityksessä. Molemmissa määrityksissä savi on lähes samalla alueella. Muilla maalajeilla vastaavuudet ovat tyydyttäviä, kun kärkivastus on yli 3 MPa. Kun kärkivastus on 1 - 3 MPa, maalajivastavuudet ovat välttäviä.

Edellä esitettyjen tulkintojen lisäksi voidaan tulkinnaissa käyttää helpottavia mallikuvia. Saven, siltin ja hiekan tyypilliset kairausvastuksen sekä vääntömomentin kuvaajat ovat kuvassa 39. Savelle on tyypillistä tasainen tai lievästi nouseva kairausvastus ja momentti. Savinen lieju erottuu savesta normaalisti pienempänä kärkivastuksena. Liejua ei voida määrittää pelkästään kärkivastuksen absoluuttisena arvona, vaan nimenomaan kärkivastuksen kasvuna. Yhdellä näytteenotolla on syytä varmistua, että alueella on liejua. Ohuet silttikerrokset ilmenevät piikkinä ja useimmiten selvänä momentin kasvuna juuri kerroksen kohdalla. Paksummissa silttikerroksissa kärkivastus tekee terävää liikettä ja momentti on suurempi kuin savella. Momentissa on useimmiten vielä jatkuvaa pientä vaihtelua. Hiekassa kärkivastuksen muutokset ovat paljon loivempia kuin silteillä. Kivettömässä hiekassa momentti voi olla hyvin saven kaltainen, mutta kivisessä maaperässä ovat suuretkin vaihtelut mahdollisia. Siltin ja hiekan kärkivastuksen muodon ero johtuu raekoosta ja huokospaineen vaihtelusta.

Siltin ja hiekan erottaminen heijariosuudesta on vaikeampaa kuin puristusosuudesta. Kivettömässä hiekassa lyöntiluku (N_{20}) on suhteellisen tasainen. Se on hyvin samanlainen kuin siltillä, mutta siltissä momentti on useimmiten tasaisempi. Moreenin erottaa normaalisti hiekasta selvästi lyöntiluvun kasvusta. Momentissa tapahtuu myös tavallisesti suuria vaihteluja. Momentin mittausvälinä on

käytetty 20 cm, joka on liian harva. Mittausvälin pitäisi olla noin 5 cm, jotta saataisiin riittävä tarkkuus.



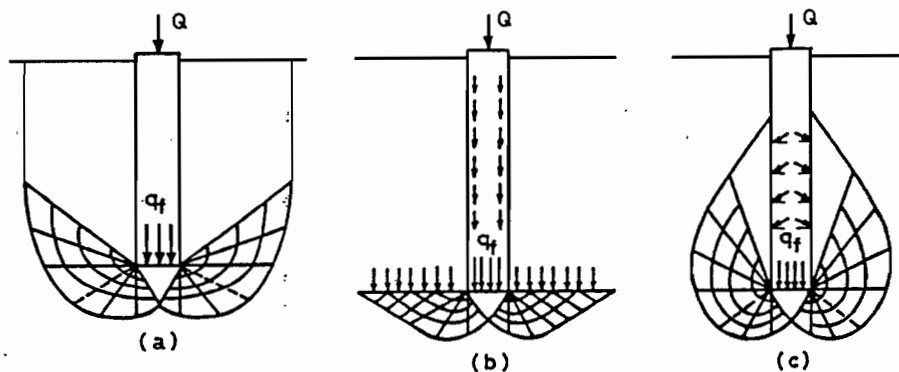
Kuva 39. Eri maalajien aiheuttamat tyypilliset kairausvastukset puristin-heijarikairalle.

7.4 Leikkauslujuus

Monissa ulkomaisissa tutkimuksissa on löydetty yhteys siipikairalla mitattavan suljetun leikkauslujuuden (s_u) ja kärkivastuksen (q_c) välillä /7/. Kaavat ja menetelmät ovat usein teoreettisesti määriteltyjä. Aina tarvitaan kuitenkin kenttäkokeita ja tutkimuksia, jotta päästään parempaan tarkkuuteen, koska kärkivastuksen ja leikkauslujuuden välinen yhteys riippuu savityypistä /13/. Käytökelpoisimmat leikkauslujuuden määrittäytävät perustuvatkin pääosin kenttäkokeiden tuomiin tuloksiin.

Durgunoglu ja Mitchell /14/ ovat tehneet erilaisia mallikokeita (mm. kärkikulman arvoilla). Kokeiden tuloksena

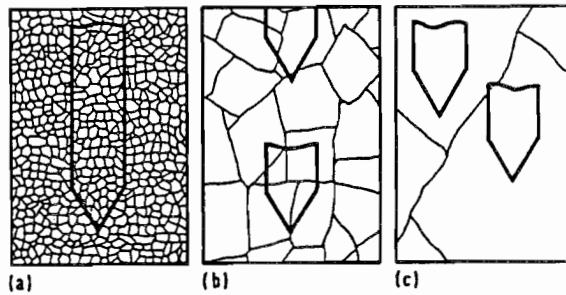
esitetään murtokuvio kuvassa 40. Samassa kuvassa on murtokuvio Meyerhofin mukaan lähellä maanpintaa ja syvällä maassa /32/. Durgunoglun ja Mitchellin mukaan Meyerhofin murtomekanismi ei vastaa täysin todellisuutta, vaan ainakin lähellä maanpintaa heidän murtokuvionsa on oikea.



Kuva 40. Puristinkairan (CPT) kärjen aiheuttamia murtokuvioita /32/.

- a) Murtomekanismi, Durgunoglu ja Mitchell.
- b) Murtomekanismi lähellä maanpintaa, Meyerhof.
- c) Murtomekanismi syvällä maassa, Meyerhof.

Maan makrorakenteella on vaikutus leikkauslujuuden ja kärkevyyden väliseen suhteeseen. Ylikonsolidoituneissa savissa tällä on normaalia suurempi merkitys, mikä tekee leikkauslujuuden arvioimisen kärkevyydestä vaikeammaksi ja epävarmemmaksi kuin normaalikonsolidoituneilla saviilla /23/. Makrorakenteen vaikutus riippuu halkeamien tiheydestä ja koosta sekä muista epäjatkuvuuskohdista. Kuvassa 41 esitetään kolme esimerkkiä erilaisista makrorakenteista. Kun epäjatkuvuuskohdat ovat lähekkäin ja niitä on paljon, murtuminen kärjen ympärillä tapahtuu ainoastaan pitkin epäjatkuvuuskohtia, kuva 41 a. Kun epäjatkuvuuskohtia on vähän, kärkevyys koostuu saven sisäisestä lujuudesta, kuva 41 c. Näiden molempien yhdistelmä on kuvassa 41 b. Halkeamat ja epäjatkuvuuskohdat vaihtuvat tiiviin saven maastoprofiilissa melko nopeasti.



Kuva 41. Ylikonsolidoituneen saven halkeamien makrorakenteita. Epäjatkuvuuskohtia paljon a), jonkin verran b) tai vähän c) /22/.

Kriittistä syvyyttä ovat tutkineet mm. De Beer (1963), Vesic (1967), sekä Biarez ja Gresillon (1972). Kriittinen syvyys $(z/B)_{cr}$ on saavutettu, kun kärkivastuksen kasvu hidastuu tai pysähtyy kokonaan. Muutos murtomekanismissa kärjen alueella leikkauksesta kokonpuristuvuuteen saattaa aiheuttaa tämän muutoksen /14/. Taulukossa 8 on esitetty erilaisia kriittisen syvyyden arvoja. Durgunoglu ja Mitchellin sekä Biarezin ja Gresillonin arvot ovat saman suuruisia ja vaikuttavat luotettavimmilta.

Taulukko 8. Puristinkairauksessa kriittisen syvyyden arvot kitkakulman funktiona /14/.

KITKA- KULMA Ø	KRIITTINEN SYVYYS $(z/B)_{cr}$			
	de Beer	Durgunoglu Mitchell	Biarez Gresillon	Vesic
25	6.8	1.3	1.8	10
30	10.6	2.3	2.9	10
35	17.3	4.0	4.8	10
40	29.9	7.4	9.4	20
45	55.9	14.5	23.0	20

Puristinkairauksella (CPT) voidaan määrittää leikkauslujuus, kaava (15) /35/, jota voidaan soveltaa myös puristin-heijarikairaukseen.

$$s_u = (q_c - \sigma_{vo}) / N_c \quad (15)$$

σ_{vo} on vallitseva jännitys
 N_c kantavuuskerroin

Vallitseva jännitys on useimmiten lähes merkityksetön verrattuna kärkivastukseen. Esimerkiksi Helsingin löyhissä savissa virhe on alle 10 %, jos vallitseva jännitys jätetään huomioimatta. Siksi voidaankin käyttää kaavaa (16).

$$s_u = q_c / N_c \quad (16)$$

Toinen vaihtoehto on määrittää siipikairauksella jonkin alueen kärkivastuksen ja leikkauslujuuden välinen yhteys. Heikkoutena on työsuorituksen kasvu siipikairausten vuoksi, ja tähän ei ole aina mahdollisuuksia. On myös muistettava, että puristinkairauksessa maa murtuu eri tavalla kuin siipikairauksessa. Puristamalla maa murtuu noin 100 kertaa nopeammin kuin siipikairalla. Murtumissuunnatkin ovat toisistaan poikkeavia.

Monissa tutkimuksissa on N_c :lle määritetty likiarvoja. N_c vaihteavat normaalisti välillä 10 - 35. Kun N_c on alle 15, pidetään savea normaalisti konsolidoituneena ja yli 15 ylikonsolidoituneena /23/. Suurimmat N_c arvot saattavat olla jopa 70 ja pienimmät 5. Tekijöitä, jotka vaikuttavat N_c :hen ovat mm:

- saven tiiviys
- muodonmuutosmoduuli, E
- kitkakulma/leikkauslujuus
- ylikonsolidoitumisaste
- kärjen muoto ja koko
- tunkeutumisnopeus
- puristinkairauksen jatkuvuus/epäjatkuvuus.

Taulukossa 9 esitetään esimerkkejä, miten suljettu leikkauslujuus määritetään muualla puristinkairauksen kärkivastuksesta.

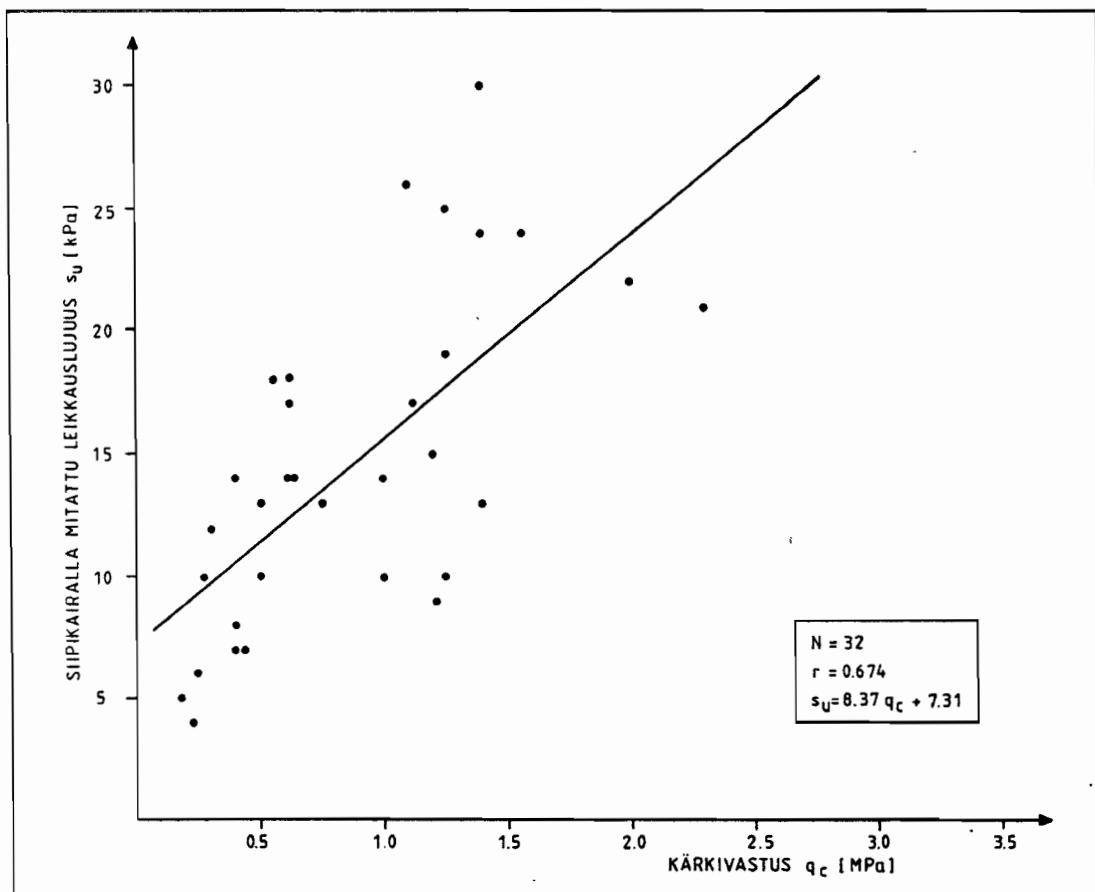
Taulukko 9. Leikkauslujuuden ja puristinkairan (CPT) kärkivastuksen välinen yhteys muutamissa maissa /4/.

MAA	LEIKKAUSLUJUUS s_u
BELGIA	$s_u \geq q_c/15$ pehmeät savet
HOLLANTI	$s_u = q_c/10$
ITALIA	$(q_c - \sigma'_{vo})/25 < s_u < (q_c - \sigma'_{vo})/15$
JAPANI	$s_u = q_c/10 \dots 20$
KANADA	$s_u = q_c/10$
KREIKKA	$s_u = q_c/15 \dots 18$
RUOTSI	$q_c/30 < s_u < q_c/15$
ETELÄ-AFRIKKA	$s_u = q_c/12$ kun $q_c < 1.5 \text{ MPa}$
	$s_u = q_c/37$ kun $q_c = 5.0 \text{ MPa}$

Törnqvistin mukaan /34/ mm. Pietarsaaren savissa puristinkairalla tehdyissä kokeissa saatiin suhteeksi q_c/s_u 5...25. Siipikairausleikkauslujuuden ollessa alle 20 kN/m² ei kärkivastuksen arvoa voitu kuitenkaan käyttää leikkauslujuuden määrittämiseen. Toikan /32/ Lahden alueella tekemässä tutkimuksessa N_c on myös 5...25.

Kuvassa 42 esitetään tämän työn aineiston pohjalta puristin-heijarikairan kärkivastuksen ja suljetun leikkauslujuuden välinen vuorosuhde. Korrelaatiokerroin on 0.674, joten tulos ei ole kovin hyvä. Kerroin on kuitenkin riittävän suuri, jotta tulosta voidaan käyttää hyväksi tiettyin varauksin. Kantavuuskerroin vaihtelee välillä 40 - 80. Se on huomattavasti suurempi, mitä muut ovat saaneet. On kuitenkin huomioitava, että kairausmenetelmä ja koealueet poikkeavat muiden tekemistä kokeista. Kuvaa 42 ei ole syytä käyttää ainakaan Helsingin ulkopuolella, jollei erikseen tehdä vertailevia siipikairauksia. Koska

puristin-heijarikairan kärkivastus on lähellä puristin-kairan kärkivastusta, voidaan varovaisesti arvioiden käyttää N_C :nä 15 - 50 Helsingin ulkopuolella, jolloin erottelukyvystä johtuen leikkauslujuuden tarkkuus on $\pm 3 - 9$ kPa. Jos puristin-heijarikairalla määritettyä leikkauslujuutta käytetään geoteknisessä suunnittelussa, siipikairauksella on aina tarkistettava tulosten luotettavuus.



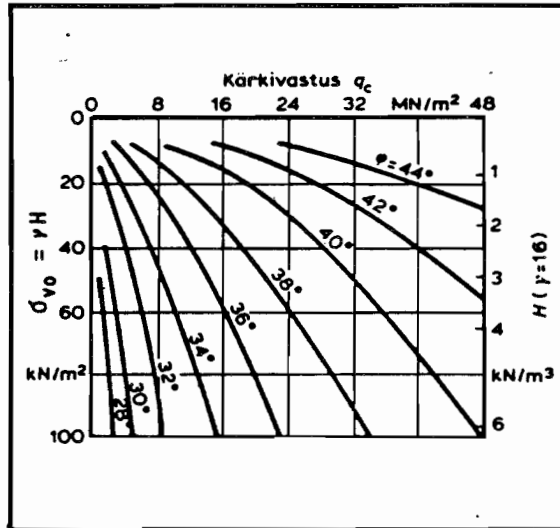
Kuva 42. Puristin-heijarikairan kärkivastuksen ja siipikairan leikkauslujuuden välinen vuorosuhde.

7.5 Muut parametrit

Tässä luvussa esitetyt parametrimääritykset perustuvat kirjallisuusviitteisiin, joiden käyttökelpoisuus perustuu siihen, että puristin-heijarikairalla saatu kärkivastus on oikeaa suuruusluokkaa verrattuna CPT:hen. Lisäksi puristin-heijarikairan maalajimääritysdiagrammi on lähellä

muita kansainvälisiä diagrammeja. Virheellisyyttä tuloksiin aiheutuu siitä, että useimmat kokeet ja määrittyskriteerit on tehty Suomesta poikkeavassa maaperässä. Jokaisella puristinkairatyypillä pitäisi olla myös lisäksi oma korjauskerroin kärkevastusta (ja vaippavastusta) varten. Seuraavassa esitetyt parametrien määrittystavat ovat ohjeellisia ja niistä saadut parametrit on tarkoitettu vain alustaviin laskelmiin.

Berezantzevin teoreettisen ja Jarochenkon kokeellisen tarkastelun /33/ tuloksena on kuvassa 43 kitkakulman määrittys hiekassa. Menetelmässä on huomioitu vallitseva jännitys, mitä ei kaikissa muissa menetelmissä ole huomioitu. Tämä kitkakulman määrittystapa antaa varovaisempia arvoja kuin esimerkiksi Meyerhofin esitys, joka perustuu useampien tutkijoiden saamiin tuloksiin /24/.



Kuva 43. Hiekan kitkakulman määrittys puristinkairan (CPT) kärkivastuksen perusteella /33/.

Kokoonpuristuvuusmoduuli saviille voidaan määrittää kaavalla (17) /23/.

$$M = \alpha q_c \quad (17)$$

M on kokoonpuristuvuusmoduuli
 α maalle ominainen suhteellisuuskerroin
 (taulukko 10)

Taulukko 10 perustuu Sangleratin kokeisiin /26/. α :lla on suuri vaihteluväli. Suositeltavaa olisi, että ensin määritetään ödometrillä M ja paikalliset vaihtelut selvitetään q_c :n sekä M:n korrelaationa.

Taulukko 10. Kokoonpuristuvuuskertoimen määrittämiseen tarvittavan suhteellisuuskerroimen arviointi /26/.

Maatyyppi (USCS-luokitus)		
Kohtalaisen plastinen savi (CL)	$q_c < 0,7 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 8$
	$0,7 < q_c < 2 \text{ "}$	$2 < \alpha < 5$
	$q_c > 2 \text{ "}$	$1 < \alpha < 2$
Vähän plastinen savi tai siltti (ML)	$q_c < 2 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 6$
	$q_c > 2 \text{ "}$	$1 < \alpha < 2$
Hyvin plastinen savi (OH, MH-OH)	$q_c < 2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 6$
	$q_c > 2 \text{ "}$	$1 < \alpha < 2$
Liejuinen siltti ja liejuinen savi	$q_c < 1,2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 8$
Turve ja lieju (Pt-OH)	$q_c < 0,7 \text{ MPa}$	
	$50 < W < 100$	$1,5 < \alpha < 4$
	$100 < W < 200$	$1 < \alpha < 1,5$
	$W > 300$	$\alpha < 0,4$
Hiekka	$q_c < 5 \text{ MPa}$	$\alpha = 2$
	$q_c > 10 \text{ "}$	$\alpha = 1,5$

Toikan tekemissä kokeissa puristinkairalla Lahden alueella saatiin melko hyvä korrelaatio lasketuille ja havaituille painumille /32/. Maaperä oli silttiä. Laskelmat tehtiin käyttämällä Terzaghi-Buismanin yhtälöä (18).

$$s = \frac{h}{C} \ln [1 + (\Delta \sigma / \sigma'_{vo})] \quad (18)$$

s on painuma

h painumakerroksen paksuus

C kokoonpuristuvuusvakio

$\Delta \sigma$ jännityksen lisäys maassa

σ'_{vo} tehokas jännitys

Kokoonpuristuvuusvakio määritetään Buismanin mukaan yhtälöllä (19) /32/.

$$C = 1.5 q_c / \sigma'_{vo} \quad (19)$$

Schmertmannin, Hartmanin ja Brownin laskentatapaa painumille pidetään ulkomailla parhaimpina hiekkamaille, yhtälö (20) /23/.

$$s = C_1 C_2 \Delta p \sum_1^n (I_z / x q_c) \Delta z \quad (20)$$

C_1	on korjauskerroin perustamissyvyydelle
C_2	korjauskerroin hiipumalle
Δp	lisäkuorma perustamissyvyydessä
n	maakerrosten lukumäärä
I_z	muodonmuutosten vaikutuskerroin keskeillä maakerrosta (kuva 44)
x	kerroin perustusten muodolle
q_c	keskimääräinen kärkivastus kerroksessa
Δz	maakerrosten paksuus

Neliöperustukselle x on 2.5 ja painuvan kerroksen syvyys on $2B$ perustamistasosta. Pitkänomaiselle perustukselle $L/B > 10$ x on 3.5 ja painuvan kerroksen syvyys on $4B$ perustamistasosta. Korjauskertoimet määritetään kaavoilla (21) ja (22).

$$C_1 = 1 - 0.5 (\sigma'_{vo} / \Delta p) \quad (21)$$

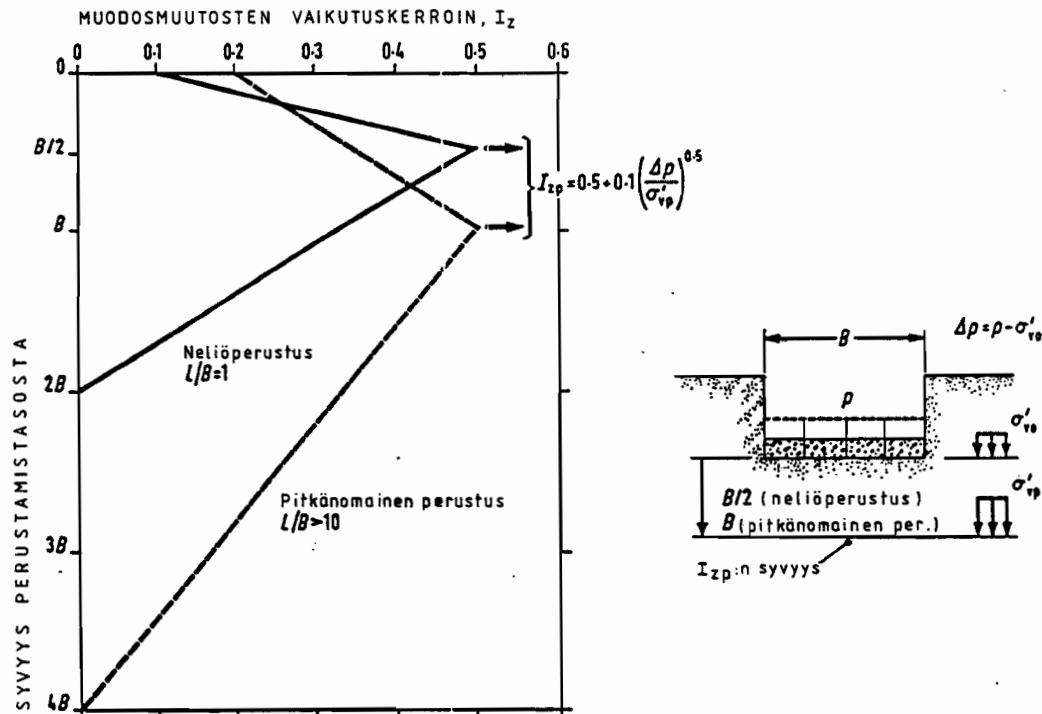
$$C_2 = 1 + 0.2 \lg (10 t) \quad (22)$$

t on aika vuosina

Yhtälöllä (23) joudutaan laskemaan I_{zp} ennen kuin kuvaa 44 voidaan käyttää hyväksi ja laskea I_z .

$$I_{zp} = 0.5 + 0.1 (\Delta p / \sigma'_{vp})^{0.5} \quad (23)$$

σ'_{vp} on tehokas jännitys neliöperustuksella syvyydellä $B/2$ perustamistasosta ja pitkänomaisella perustuksella syvyydellä B perustamistasosta.



Kuva 44. Muodonmuutosten vaikutuskertoimen (I_z) määrittämisen diagrammi /23/.

Kärkivastuksen ja painuman korrelaatio ei ole aina edes tyydyttävä. Baldin työryhmä ei saanut edes välttävää korrelaatiota homogeenisessä hiekassa muodonmuutosmoduulille ja kärkivastukselle /3/.

Ruotsissa (Statens geotekniska institut, SGI) on laadittu taulukko 11 maaparametrien suuruusluokkien arvioimiseksi /8/. Taulukkoon kuuluu muutamia selvennyksiä:

- 1) Siltissä ja hiekkaisessa siltissä tulee painokäiräusvastusta pienentää jakamalla se 1.3 ennen kitkakulman ja muodonmuutosmoduulin määrittämistä
- 2) Annetut kitkakulman arvot pätevät hiekalle. Silttiselle maalle tehdään 2° lisäys
- 3) SGI:n standardin mukaan
- 4) Arvo, josta vaippavastus on vähennetty

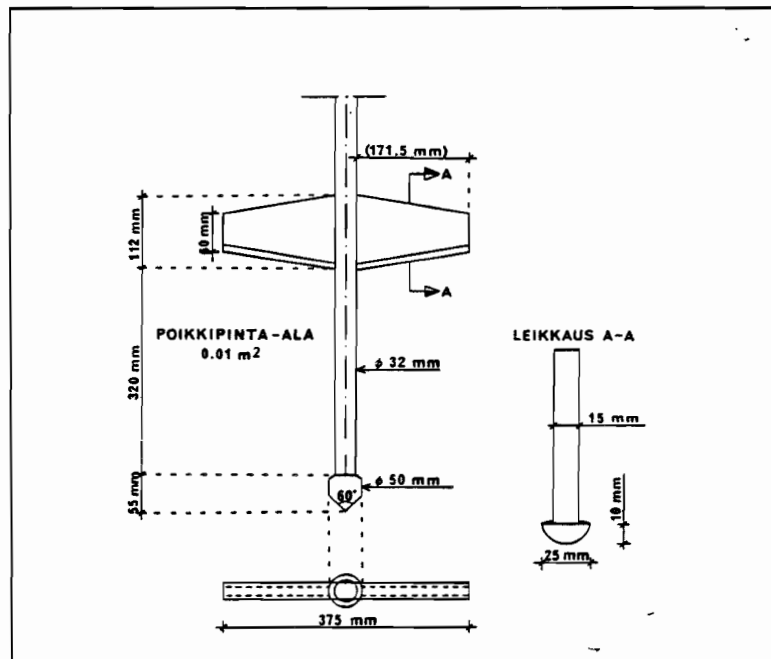
Taulukko 11. Kitkamaan jakaminen kiinteys (tiiviysluok-
kiin) kairausten perusteella sekä vastaavat kitkakulman
ja E-moduulin arvot /8/.

Suhteellinen kiinteys (tiiviys)	Puristinkairaus ³⁾ Kärkivastus q_c (MPa)	q_c -arvot vastaavat tavallisesti alla olevia paino- kairauksen ja heijarikairauksen arvoja ³⁾		$\phi^{2)}$ (°)	E (MPa)
		Painokairaus ¹⁾ pk/0,2 m	Heijarikairaus ⁴⁾ 1/0,2 m		
hyvin löysä	< 2,5	<10	<5	29-32	<10
löysä	2,5- 5,0	10- 30	5-10	32-35	10-20
keskikiinteä	5,0-10,0	20- 60	7-15	35-38	20-30
kiinteä	10,0-20,0	40-100	10-40	38-42	30-60
hyvin kiinteä	>20,0	>80	>30	>42	>60

7.6 Syvästabiloitujen pilarien valvontakairaukset

Tässä luvussa valvontakairauksilla tarkoitetaan puris-
tin-heijarikairausmenetelmällä tehtäviä tutkimuksia. Ai-
kaisemmin syvästabiloitujen pilarien sideaineena käytet-
tiin kalkkia (kalkkipilarit). Nykyään voidaan tehdä myös
esimerkiksi kalkki-sementti-, kipsikalkki- ja sementtipi-
lareita. Kaikista pilarityypeistä käytetään tässä nimi-
tystä syvästabilointi.

Valvontakairauksella tarkistetaan pilarin lujittuminen.
Pilarin lujittumista tutkitaan joko pilarikairalla tai
pilarisiipikairalla /20/. Molempien kairojen kärjet on
suunniteltu juuri pilarikairaukseen. Kuvassa 45 on Hel-
singin kaupungin käyttämä pilarikairan kärki. Siinä on
ohjainkärki, joka pitää kairan pilarin heikommassa keski-
osassa sekä siivet, joiden ansiosta kairausvastus edustaa
pilarin koko poikkileikkausta /16/. Muotoilulla on pyrit-
ty siihen, että siipien ja tankojen aiheuttama hankaus
olisi mahdollisimman pieni. Tankokoko on sama kuin nor-
maalissa puristin-heijarikairassa eli ϕ on 32 mm. Pilari-
kairaus poikkeaa puristin-heijarikairauksesta kärjen
osalta ja tankoja ei myöskään pyöritetä. Normaaliin ta-
paan puristetaan aina, kun se on mahdollista. Tarvittaes-
sa siirrytään heijarikairaukseen. Kuvassa 46 esitetään
pilarikairauksien tulostus.



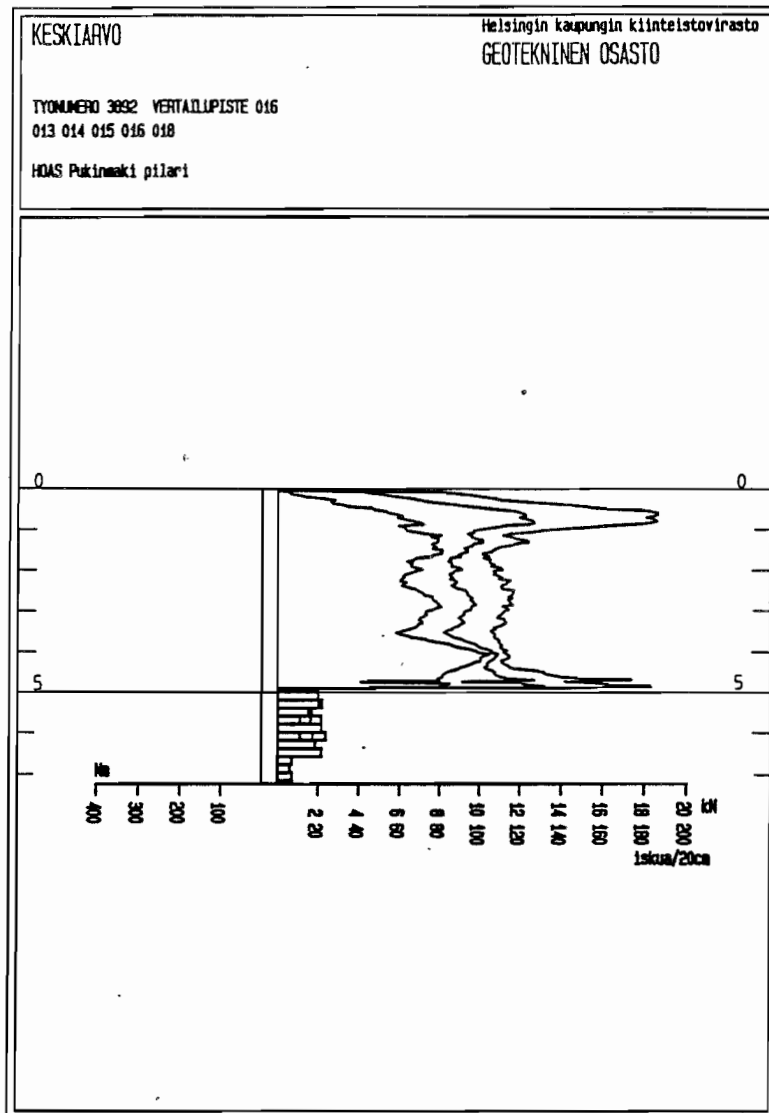
Kuva 45. Helsingin kaupungin käyttämä pilarikairan kärki /16/.

Pilari- ja siipikairauksella on kummallakin omat etunsa. Jälkimmäisellä saadaan tarkempia ja luotettavampia leikkauslujuuden arvoja. Pilarikairalla voidaan kuitenkin koestaa useampia pilareita verrattuna pilarisiipikaira. Tulokset ovat myös jatkuvia, ja stabilointiaineen mahdolliset syöttöhäiriöt voidaan helpommin havaita.

Kaavalla (24) saadaan likimääräinen arvio pilarin leikkauslujuudelle. Koska leikkauslujuuden määrittäminen on laskennallisesti epätarkkaa pilarikairan tuloksien perusteella, pitäisi leikkauslujuus määrittää kokeellisesti vertailemalla pilarisiipikairaustuloksiin. Menetelmät eroavat periaatteeltaan toisistaan, eivätkä esim. pilarin suhteelliset lujittumiskertoimet luonnolliseen saveen nähden ole keskenään vertailukelpoisia. Pilareita koestettaessa on suositeltavaa tehdä aina vähintään yksi pilarisiipikairaus, jotta vertailua voidaan tehdä. Pilarikairalla saadaan suhteellinen lujittuminen luotettavasti.

$$\tau_p = F/A \times k' \quad (24)$$

τ_p on pilarin likimääräinen leikkauslujuus
 F puristusvoima
 A kairan puristuspinta-ala (0.01 m²)
 k' kerroin, joka vaihtelee pilarissa
 0.06...0.12 %

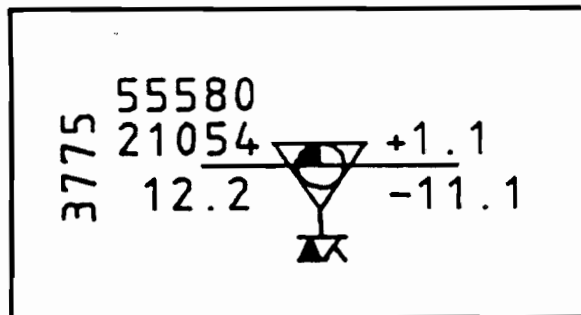


Kuva 46. Viiden pilarikairauksen keskiarvo sekä keskiha-jonnat. Pukimäki, Helsinki.

7.7 Tulosten esitystapa

Tulosten esitystapa riippuu paljon siitä, mihin ja minkälaisia tuloksia tarvitaan. Tavanomaisen esitystavan pitää olla selkeä, yksinkertainen ja varmaa tietoa. Epävarmat tulkinnot kuuluvat normaalista poikkeavaan esitystapaan, jolloin tarvitaan tietoa jatkotulkintaan/laskentaan.

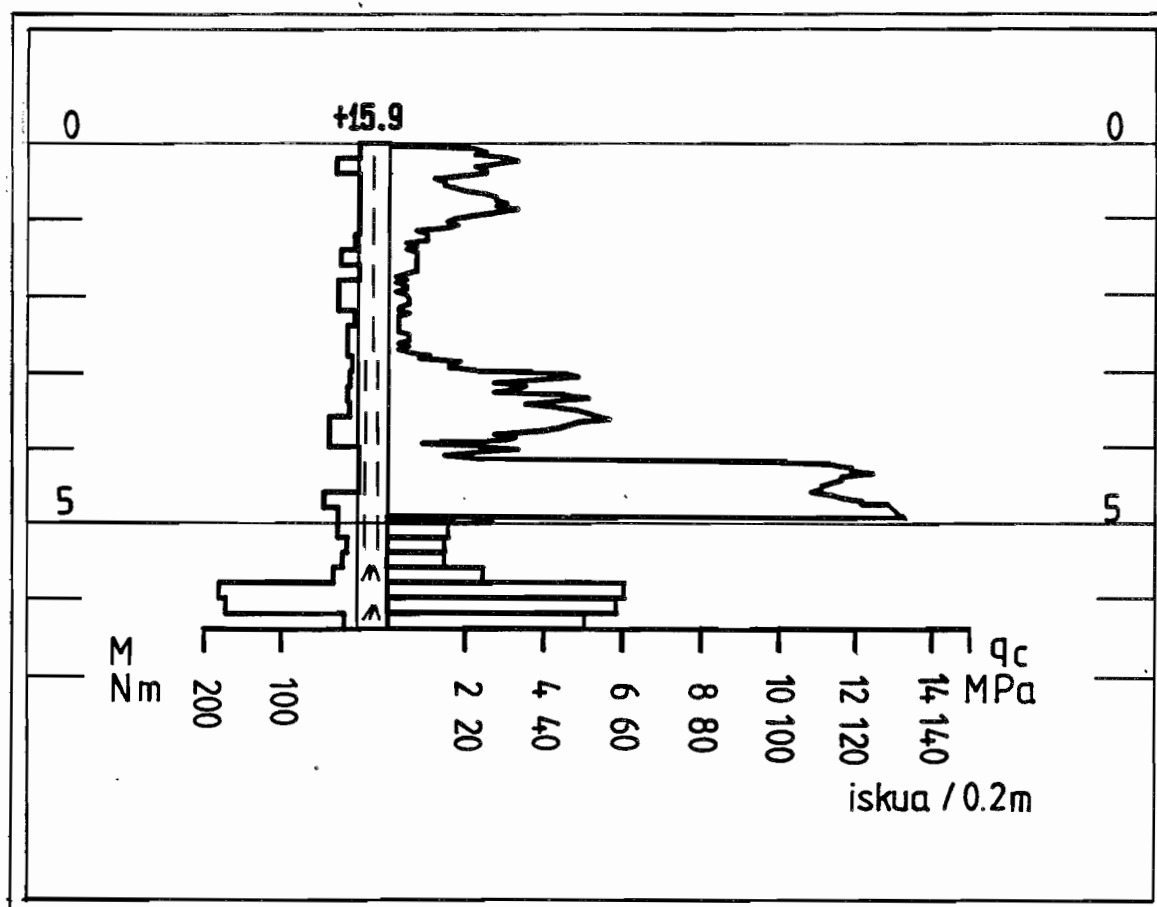
Kuvassa 47 on Helsingin kaupungin käyttämä puristin-heijarikairan karttamerkki. Merkki on puristin-heijarikairausmerkeistä yhdistetty (puristinkairausmerkki kuitenkin mustaamatta). Merkin yhteydessä on myös työnnumero, koordinaatit, maanpinnan korkeustaso, kairauksien päättymistaso, kairauksien syvyys ja kairauksien päättymistapa. Ainakin nämä on syytä aina merkitä.



Kuva 47. Puristin-heijarikairauksen karttamerkki, Helsingin kaupunki.

Leikkauksessa käytettävä diagrammi on kuvassa 48, jossa on voitava esittää ainakin 10 MPa kärkivastus ja 200 Nm vääntömomentti. Suositeltavaa kuitenkin on, että 13 - 15 MPa voitaisiin esittää. Heijarikairauslukuna on vähintään oltava 100 iskua/0.2 m. Vääntömomentiksi riittää 200 Nm. Sopiva skaala senttimetriä kohden on 2 MPa, 20 iskua/0.2 m ja 100 Nm.

Maalajitulkinnan yhtenä osana kannattaa käyttää diagrammia, jossa näkyy kärkivastus, vaippavastus ja kitkasuhde. Sokeata maalajitulkintaa, jossa tietokone tulostaa maalajin suoraan, ei kannata käyttää kuin omaan tulkintaan. Laboratoriotutkimustulosten yhteydessä voidaan esittää myös kitkasuhde.



Kuva 48. Puristin-heijarikairauksen diagrammin suositeltava esitystapa.

8. VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN

8.1 Painokaira

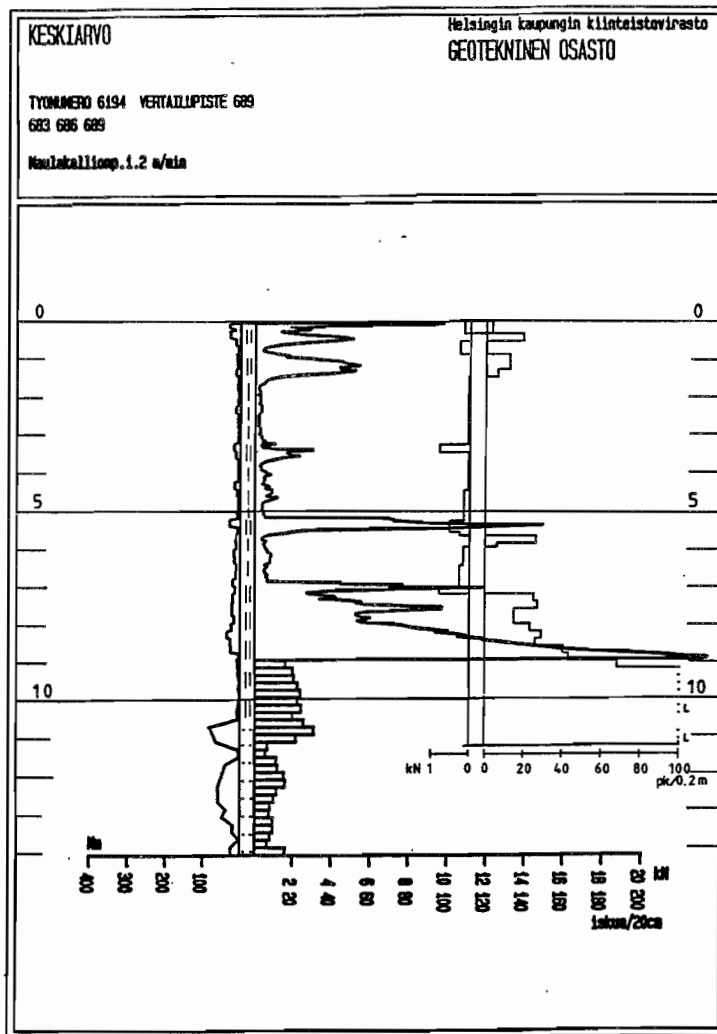
Painokaira on ollut jo pitkään eniten käytetty pohjatutkimusmenetelmä Suomessa. Myös Ruotsissa sen suosio on suuri. Painokairaa käytetään myös mm. Puolassa, Unkarissa, Tsekkoslovakiassa, Japanissa ja Algeriassa /6/. Menetelmä esiteltiin ensimmäisen kerran Ruotsissa 1917 /11/. Nykyään muut kairaukset lisäävät osuuttaan pohjatutkimusvälineenä painokairan kustannuksella, mutta sitä tuskin vielä vuosikymmeniin täysin syrjäytetään laitteiston edullisuuden takia.

Painokairan tankoina käytetään nykyisin Ø 22 ja Ø 25 umpitankoja. Aikaisemmin painokairaus suoritettiin täysin manuaalisesti ja miesvoimin (ns. punttikairauksena). Nykyisin käytetään pääasiassa kannettavia moottoripainokairoja sekä tela-alustaisia monitoimikairoja, jossa on painokaira. Laitteiden koneellistuessa työ helpottuu ja kevenee. Haittapuolena on kuulo- ja tuntohavaintojen menettäminen maalajitulkinnessa.

Tässä työssä vertailevat painokairaukset on tehty moottoripainokairalla. Jousivaakaa käyttämällä saatiin tulokset mahdollisimman tarkaksi. Painokairauksia suoritettiin Mellunkylässä, Torpparinmäessä ja Tapanilassa. Painokairausdiagrammit ovat kuvissa 49, 50 ja 51.

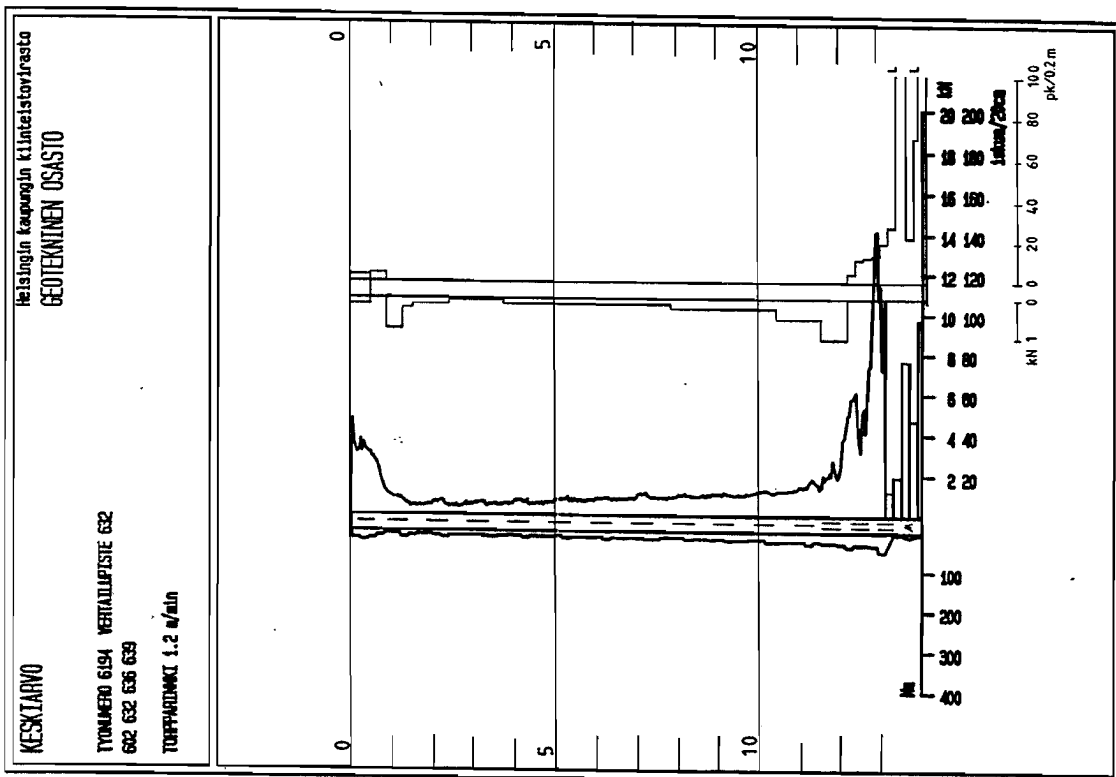
Puristin-heijarikaira antaa pehmeistä maakerroksista aina vähintään yhtä hyvän kuvan kerrosrajojen vaihtelusta kuin painokaira. Kitkamaassa puristin-heijarikairalla saadaan parempi kuva maan tiiviyydestä ja useimmiten myös kerrosrajoista. Painokairalla tunkeutumissyvyys on näissä koeolosuhteissa ollut hieman huonompi kuin puristin-heijarikairalla. Kuvasta 51 havaitaan painokairan yksi pahimmista heikkouksista. Syvyydellä 11 m painokairan kairausvastus kasvaa kaksinkertaiseksi, vaikka puristin-heijarikairalla maa on keskimäärin jopa löyhempää kuin yläpuolella oleva. Painokairan tankoihin kohdistuu huomattavasti

enemmän vaippakitkaa, joka johtuu maan kivisyydestä tai yleensä vain tiiviyydestä. Painokairaa lyötäessä hyvin tiiviissä maakerroksessa ei tiedetä, kuinka monta kertaa on jouduttu lyömään esim. 0,20 metriä kohden. Puristin-heijarikairalla tällainen tiiviys selviää paremmin.

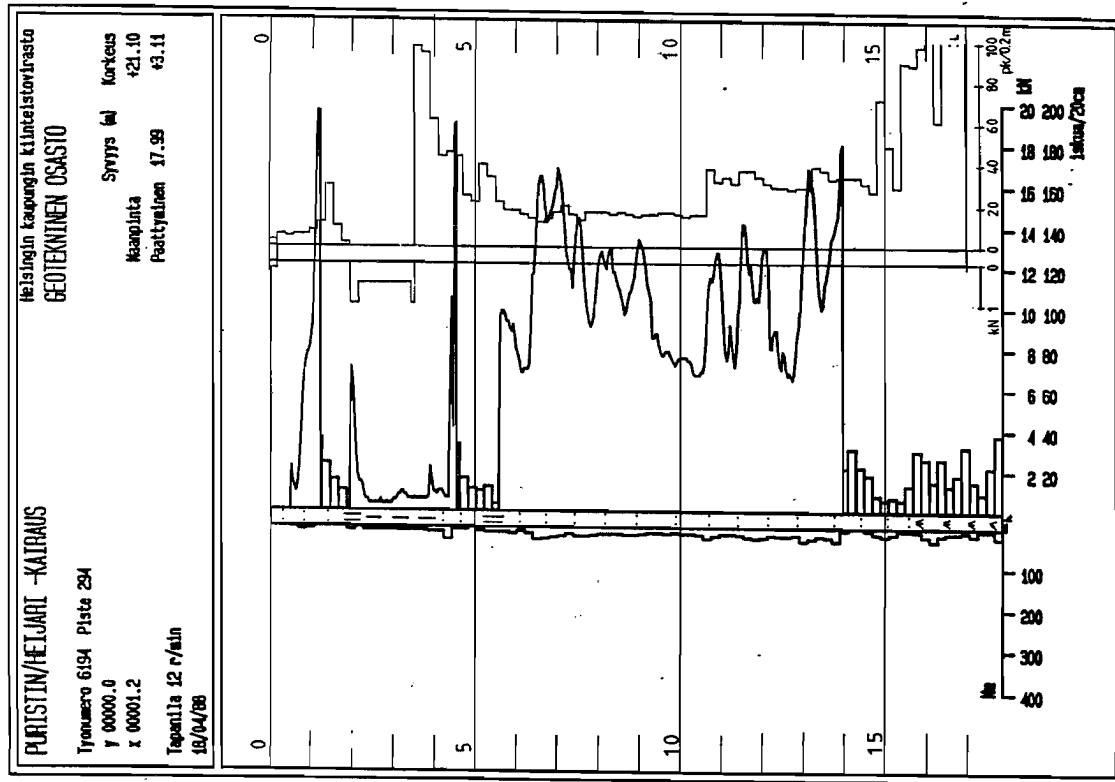


Kuva 49. Puristin-heijari- ja painokairaus Mellunkylässä, Helsinki.

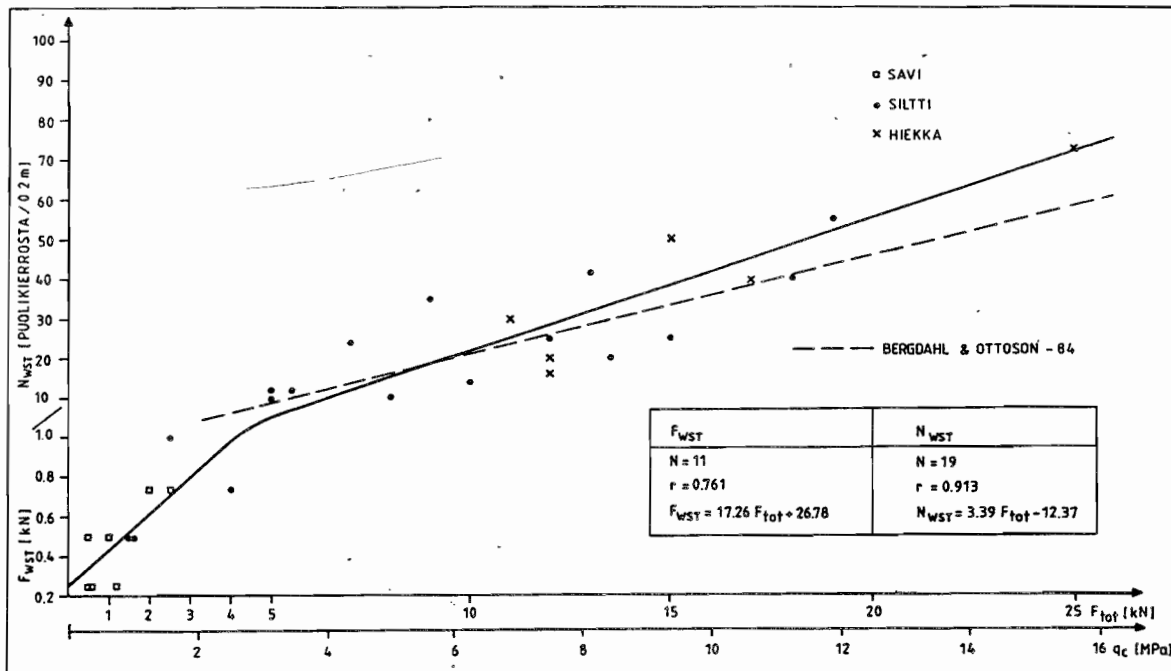
Kuvassa 52 esitetään tämän työn aineiston pohjalta painokairan ja puristin-heijarikairan puristusosuuden välinen yhteys. Käyrän alkuosa perustuu Mellunkylän, Torpparinmäen ja Tapanilan kokeisiin. Jatko-osa (kiertämällä tehty kairaus) perustuu myös muualla tehtyihin vertaileviin kairauksiin. Kuvassa näkyy myös Bergdahlin ja Ottosonin /8/ saama yhteys kärkipuristinkairaukselle (=CPT) ja painokairaukselle. Helenelund /18/ ja Muromachi sekä Kobayashi /25/ ovat saaneet lähes samanlaiset yhteydet, kuva 53.



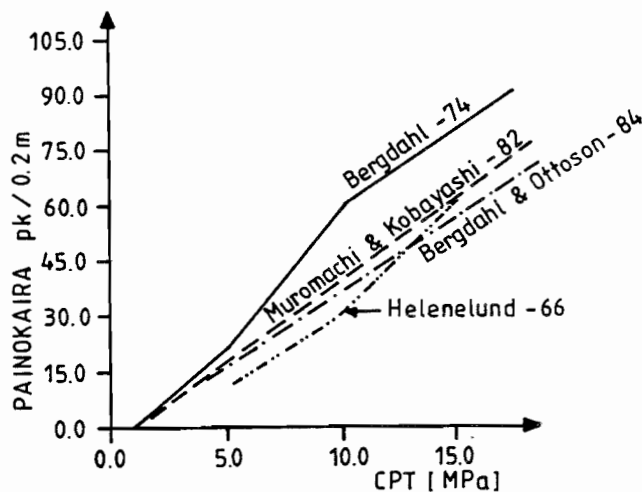
Kuva 50. Puristin-heijari- ja painokairaus Torpparinmäessä, Helsinki.



Kuva 51. Puristin-heijari- ja painokairaus Tapanilassa, Helsinki.



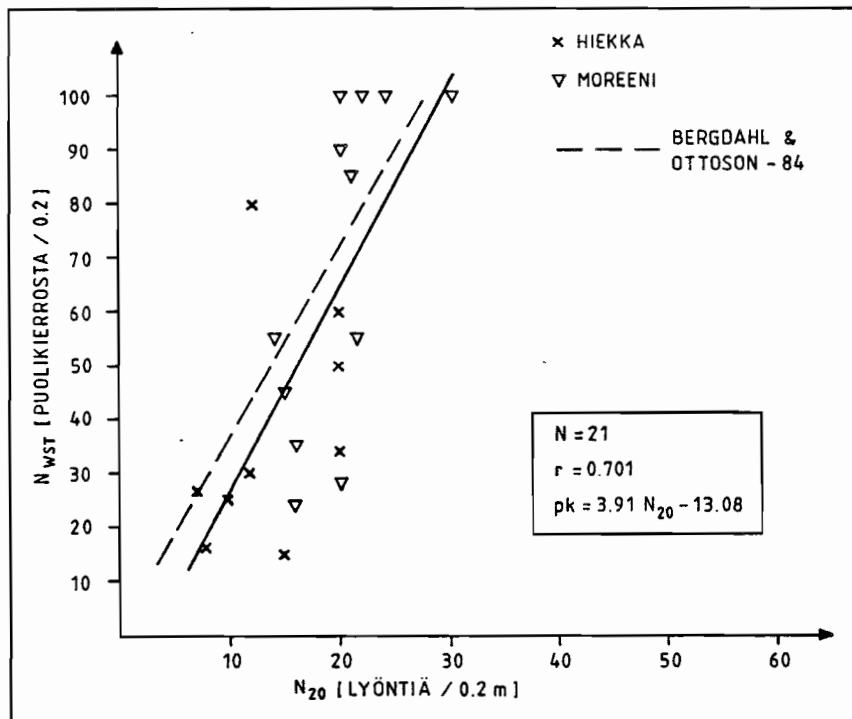
Kuva 52. Puristin-heijarikairauksen puristusosuuden ja painokairauksen välinen vuorosuhde.



Kuva 53. Painokairauksen ja puristinkairauksen (CPT) välinen vuorosuhde /8/.

Puristin-heijarikairan heijariosuuden ja painokairan välinen vertailu on kuvassa 54. Samassa kuvassa on myös Bergdahlin ja Ottosonin /8/ vertailu painokairalle ja varsinaiselle heijarikairaukselle. Bergdahlin ja Ottosonin heijarikairauksessa tankoja ei ole pyöritetty jatkuvasti. Sen vuoksi olisi olettanut, että tämän työn tulokset olisivat osoittaneet suurempia puolikierrosten luku-

määriä eikä päinvastoin. Maaperän kivisyys voi aiheuttaa suuria muutoksia kairausvastuksiin. Kun puolikierrosten lukumäärä on yli 60, maa on useinmiten moreenia tai tiivistä soraa/hiekkaa. Heijari- ja painokairauksen välinen yhteys on huomattavasti alttiimpi virheille kuin puristin- ja painokairauksen välinen yhteys.



Kuva 54. Puristin-heijarikairauksen heijariosuuden ja painokairauksen välinen vuorosuhde.

8.2 Heijarikaira

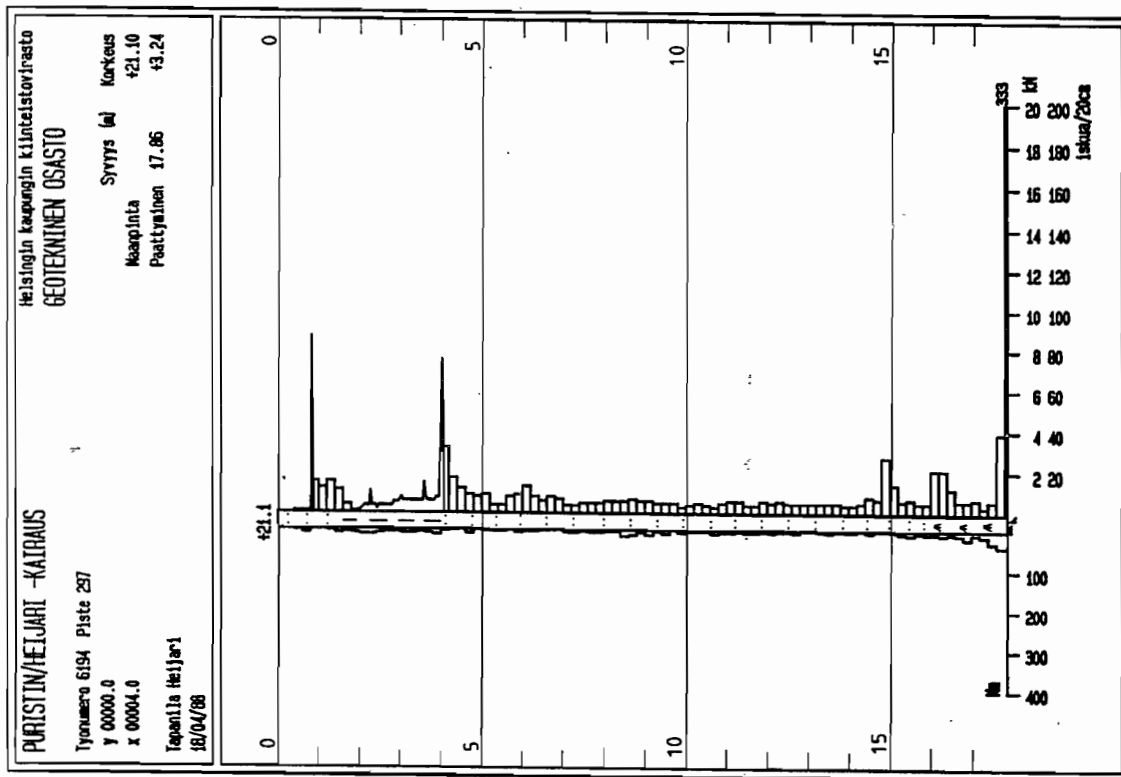
Kansainvälisesti heijarikairausta (Dynamic Probing, DP) jaetaan neljään ryhmään riippuen järkäleen painosta. Puristin-heijarikairauksen heijausvaihe vastaa superraskasta heijarikairausta (Dynamic Probing Superheavy, DPSH), joka on maailman eniten käytetty heijarikairausta /19/. Heijarikairauksen standardeista tai suosituksista riippuen kärjen halkaisija vaihtelee 43.7 - 62.5 mm ja pudotuskorkeus vaihtelee 40 - 75 cm. Erot ovat melkoisia, joten kairauksien tulosten vertailuja tehdessä on otettava huomioon kairausvälineet ja suoritustapa.

Suomessa on käytössä vapaapudotusheijari- ja heijaripukkikairaus. Näistä vapaapudotusheijarikairaus on suosituimpia, koska se on tuloksiltaan heijaripukkikairausta luotettavampi. Puristin-heijarikairan heijariosuus poikkeaa vapaapudotusheijarikairauksesta vain siten, että tankoja pyöritetään jatkuvasti. Suomen geoteknillisen yhdistyksen suosituksen mukaan heijarikairauksessa tankoja pyöritetään vähintään metrin välein tai yli 10 m syvyydessä 0,2 m välein /30/.

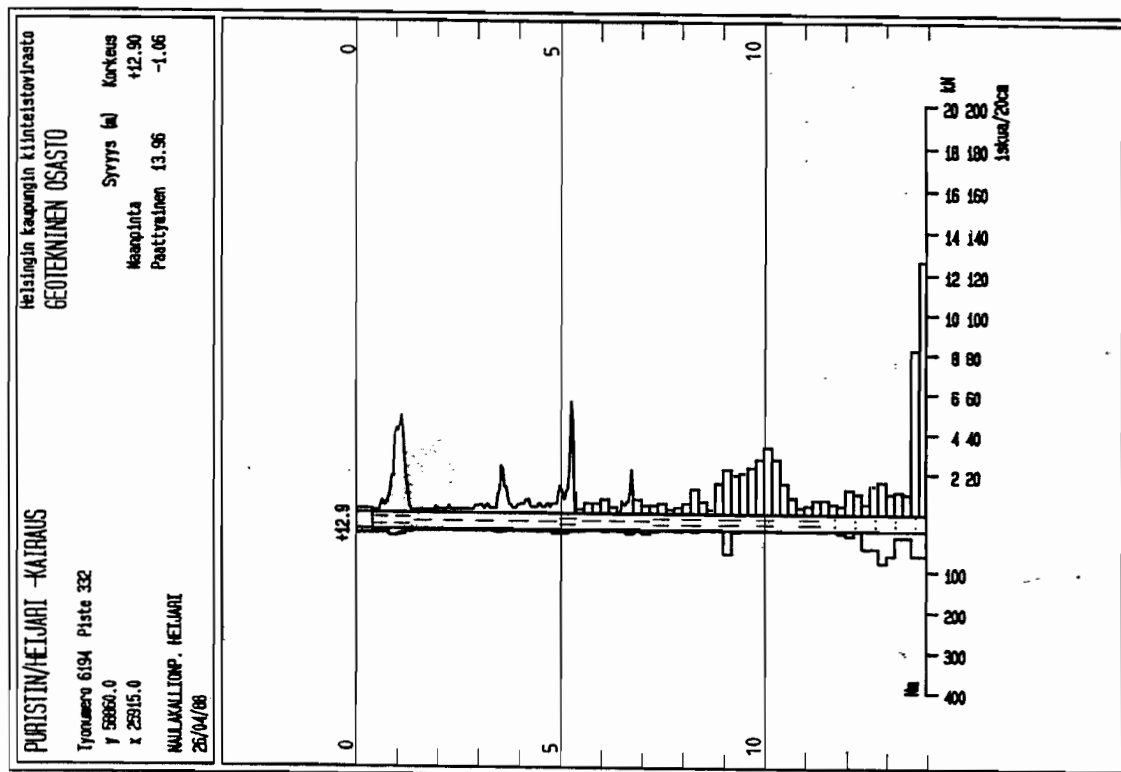
Tässä työssä ei ole suoritettu varsinaista SGY:n suosituksen mukaista vapaapudotusheijarikairausta. Sen vuoksi onkin turvauduttava myös muiden tekemiin tutkimuksiin. Tankojen pyörityksen merkitys kasvaa kairaussyvyyden kasvaessa. Kuvassa 17 sivulla 27 nähdään pyörityksen merkitys. Jatkuvan pyörityksen ja 0,2 m välein tehdyn pyörityksen eroa ei ole tutkittu. Voidaan arvioida, että jatkuvalla pyörityksellä kairausvastus on noin 10 - 15 % pienempi kuin 0,2 metrin välein tehdyllä pyörityksellä. Dahlbergin /7/ saama yhteys puristinkairaukselle ja heijarikairaukselle on esitetty kuvassa 31 sivulla 42, josta näkyy myös jatkuvan pyörityksen vaikutus. N_{20} on huomattavasti pienempi, kun käytetään jatkuvaa pyöritystä. Tiiviissä kerroksissa puristin-heijarikairalla saadaan parempaa informaatiota kuin heijarikairalla, koska vääntömomentin avulla voidaan määrittää N_{cone} (ks. luku 7.2).

Koheesio maalajeissa ja löyhässä hiekassa puristin-heijarikaira (puristusvaihe) antaa paljon paremman kuvan maapohjasta kuin heijarikairaus. Kuvassa 55 ja 56 on heijarikairaukset Mellunkylässä ja Tapanilassa, joista maalaalien ja tiiviiden arvioiminen on vaikeata.

Puristin-heijarikairalla pitäisi saavuttaa hieman suurempi tunkeutumissyvyys kuin heijarikairalla. Käytännössä erot ovat merkityksettömiä. Jatkuvalla pyörityksellä saavutetaan sitä vastoin pienempi vaippakitka ja tangot pysyvät suurempina.



Kuva 56. Puristin-heijarikairalla suoritettu heijarikai-
raus tankoja jatkuvasti pyörittäen. Tapanila, Helsinki.



Kuva 55. Puristin-heijarikairalla suoritettu heijarikai-
raus tankoja jatkuvasti pyörittäen. Mellunkylä, Helsinki.

Suomessa heijarikairausta on käytetty pääasiassa ns. kovan pohjan määrittämiseen, karkeaan kerrosrajojen arvioimiseen ja lyöntipaalupituuksien tavoitetason arvioimiseen. Puristin-heijarikairalla saadaan näiden lisäksi pehmeistä maakerroksista hyvä kuva.

8.3 Puristinkaira (CPT)

Puristinkairaus (Cone Penetration Test, CPT) on Keski-Euroopassa melko suosittu pohjatutkimusmenetelmä. Esimerkiksi Alankomaissa jopa 90 % pohjatutkimuksista tehdään CPT:llä ja Belgiassakin 60 % /5/. Suomessa on puristinkairausta käytetty vähän pohjatutkimusmenetelmänä. Meillä kivinen kitkamaa on rajoittanut sen laajempaa käyttöä. Puristinkairauksessa mitataan staattisesti maahan puristettavan kairan kärki- ja/tai vaippavastusta. Menetelmän katsotaan yleisesti soveltuvan parhaiten siltti- ja hiekamaalajeihin.

CPT:stä on hyvin monia standardeja. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) on 1977 Tokiossa tehnyt ns. Euroopan suosituksen CPT-kairauksille. Se noudattaa pääosin muita tunnettuja standardeja kuten esim. American standard test method (ASTM), joka hyväksyttiin 1979 /31/. ISSMFE:n suosituksen mukaan kärjen pinta-ala on 10 cm^2 ja vaippahylsyn pinta-ala 150 cm^2 . Kärkikulman pitää olla 60° ja kairan tunkeutumisnopeuden tulee olla $2 \pm 0,5 \text{ cm sekunnissa}$ /23/.

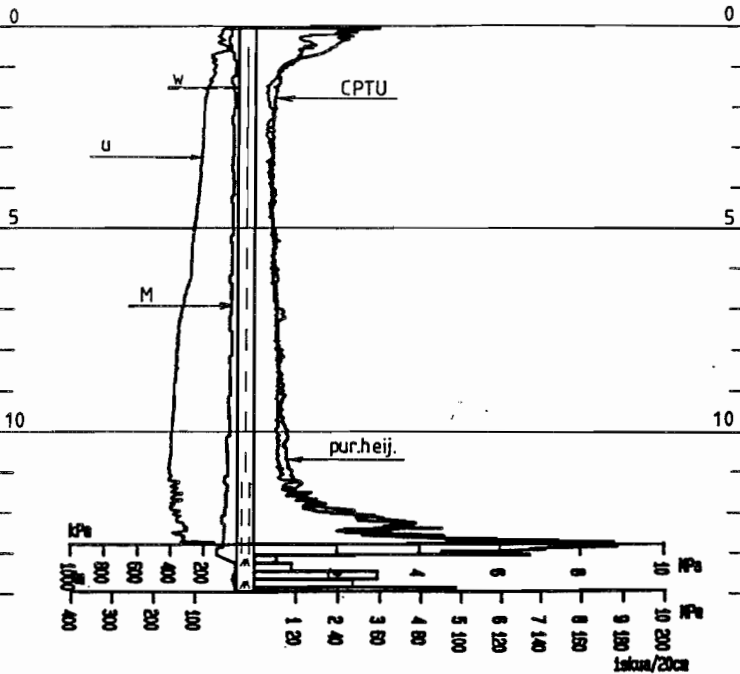
Tässä tutkimuksessa käytettiin puristinkairaa, jossa on sähköinen kärki. Se oli Envi AB:n valmistama Memocone, jolla mitattiin kärkivastusta ja huokosvedenpainetta. Tällaisesta kärjestä, joka mittaa myös huokospaineen, käytetään lyhennystä CPTU. Kairatessa tiedot tallentuivat kärkeen. Kun kärki nostettiin maasta, tieto purettiin samaan rekisteröintilaitteeseen, jota käytetään puristin-

heijarikairauksessa. Kärkivastuksen erottelukyky on 50 kPa ja huokosvedenpaineen 1 kPa.

Puristin-heijarikairalla määritettävää kairausvastusta on verrattu CPTU:n kärkivastukseen. On kuitenkin huomattava, että jopa erimerkkisillä ja erilaisilla CPTU:lla saadaan hieman toisistaan poikkeavia tuloksia. Nämä poikkeavuudet johtuvat siitä, että kärkikappaleet ovat erikokoisia ja erimuotoisia. Kärjillä pitäisi käyttää omaa huokospainekorjauskerrointa, jotta ne olisivat täysin vertailukelpoinen standardikärjen kanssa. Tässä työssä ei käytetty korjauskerrointa, koska sen vaikutus on melko vähäinen.

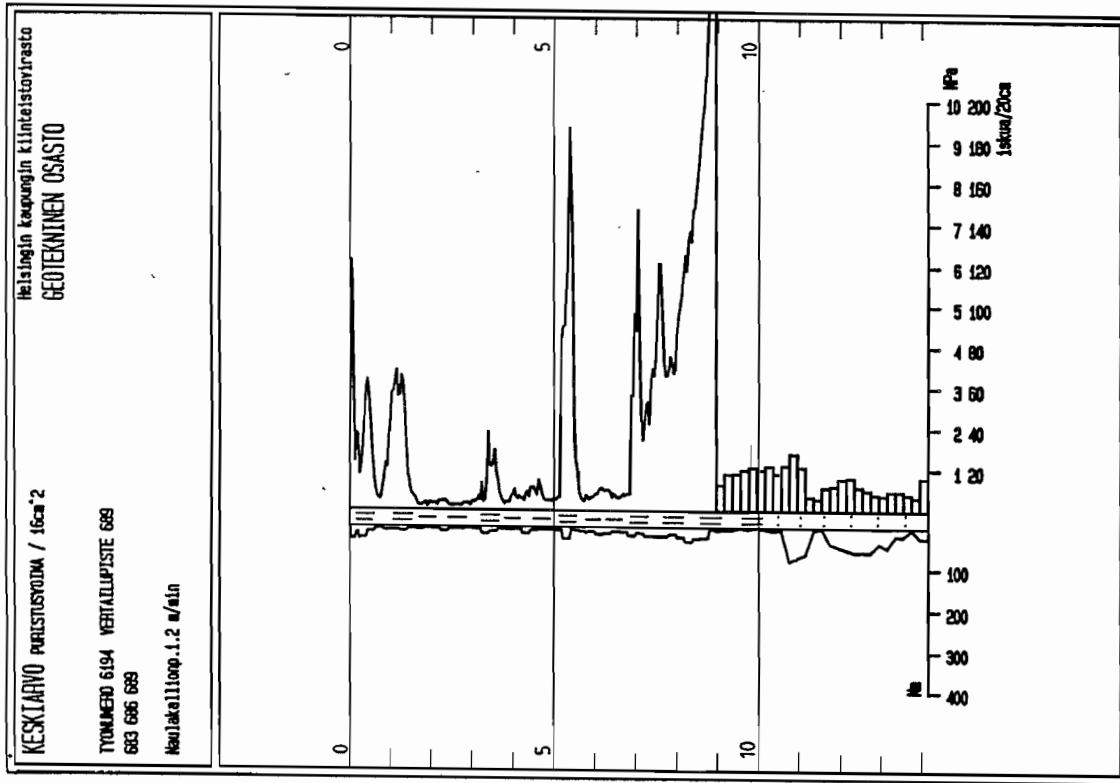
Tässä tutkimuksessa on tehty CPTU-kairauksia neljässä eri kohteessa. Nämä paikat ovat Torpparinmäki, Mellunkylä, Tapanila ja Veräjänmäki. CPTU-kairauksessa oli kärjen kanssa ongelmia, sillä joko huokospaine ja/tai kärkivastus ei toiminut aina moitteettomasti. Luvussa 7.1 on esitetty puristin-heijarikairan kärkivastuksen määrittäytavat. Veräjänmäkeä lukuunottamatta kaikissa muissa koh-teissa on käytetty kärkivastuksena q_{C1} .

Torpparinmäessä tehtiin kolme CPTU-kairausta. Ne onnistuivat erinomaisesti, mikäli niitä verrataan keskenään. Kuvassa 57 esitetään keskiarvo CPTU pisteistä, jossa kärkivastus on lähes samanlainen kuin puristin-heijarikairalla määritetty. Torpparinmäen koepisteet ovat noin 14 metriä syviä. Noin 10 metrin syvyydessä havaitaan, että CPTU:n kärkivastus on pienempi kuin puristin-heijarikairalla saatu. Tämä johtuu siitä, että tangon vaippakitka kasvaa, mitä syvemmälle kairataan. Sillä ei ole juurikaan käytännön merkitystä, ja puristin-heijarikairalla saatua tulosta voidaan pitää erinomaisena. Puristin-heijarikairalla päästiin puristamalla keskimäärin 30 cm syvemmälle kuin CPTU:lla, jossa on jopa pienempi kärjen pinta-ala.

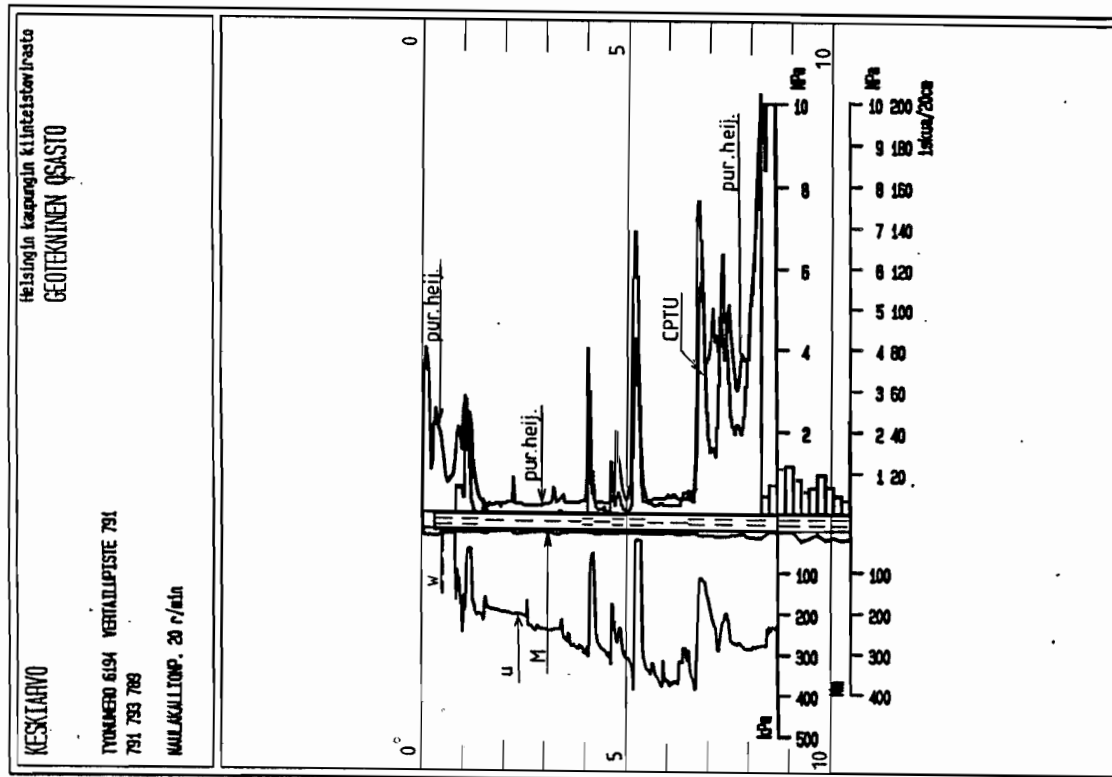


Torpparinmäki, Helsinki.

vyydessä CPTU:lla havaitaan vain huokospaineesta kyseinen



Kuva 59. Puristin-heijarikairaus. Mellunkylä, Helsinki.



Kuva 58. Puristin-heijari- ja puristinkairaus (CPTU). Mellunkylä, Helsinki.

linssi, mutta puristin-heijarikairalla se havaitaan kärkivastuksesta. CPTU:ta pitäisi oikeammin verrata puristin-heijarikairauspisteisiin 27, 28 ja 29, koska niissä on käytetty pyöritysnopeutta 12 r/min (kuva 59). Muiden kairauspisteiden perusteella koko alueella on samanlaiset silttikerrostumat, mutta ne sijaitsevat hieman eri syvyyksillä riippuen paikasta.

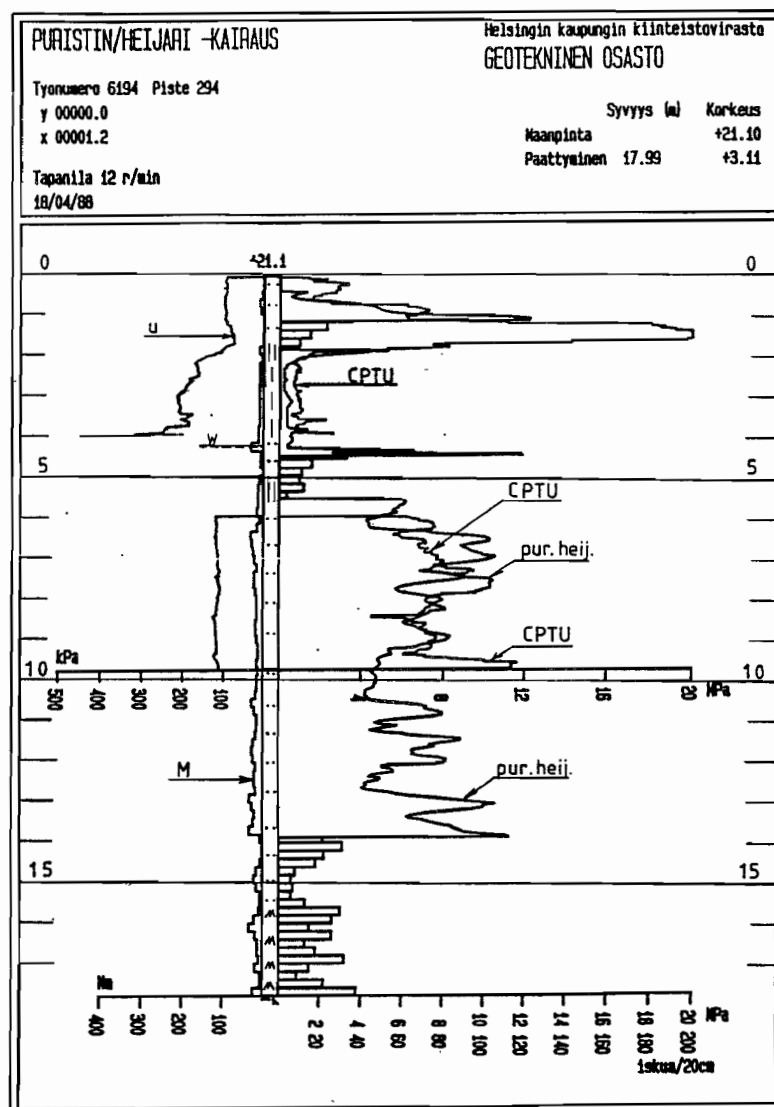
Kuvien 58 ja 59 perusteella kärkivastukset ovat samansuuruisia viiden metrin syvyydestä eteenpäin. Alle viidessä metrissä puristin-heijarikairalla saadaan suurempi kärkivastus. Tämä johtunee heikosta erottelukyvystä ja virheellisestä nolla-asetuksesta. Puristin-heijarikairalla maakerrosrajojen tunnistaminen onnistuu tässä kohteessa aivan yhtä hyvin kuin CPTU:lla. Tosin maalajin määrittäminen on CPTU:lla helpompaa huokospainemittauksen vuoksi.

Tapanilan koetulokset esitetään kuvassa 60. CPTU-kairauksella ei läpäisty tiivistä kerrosta, joka oli syvyydellä 4 - 6 metriä. Hiekkakerroksissa kärkivastukset vastasivat toisiaan erittäin hyvin. Silttikerroksissa puristin-heijarikairalla saatiin 30 - 60 % pienempiä kärkivastuksen arvoja kuin CPTU:lla. CPTU:n tunkeutumissyvyys jäi noin neljä metriä ylemmäksi kuin puristusosuus puristin-heijarikairalla.

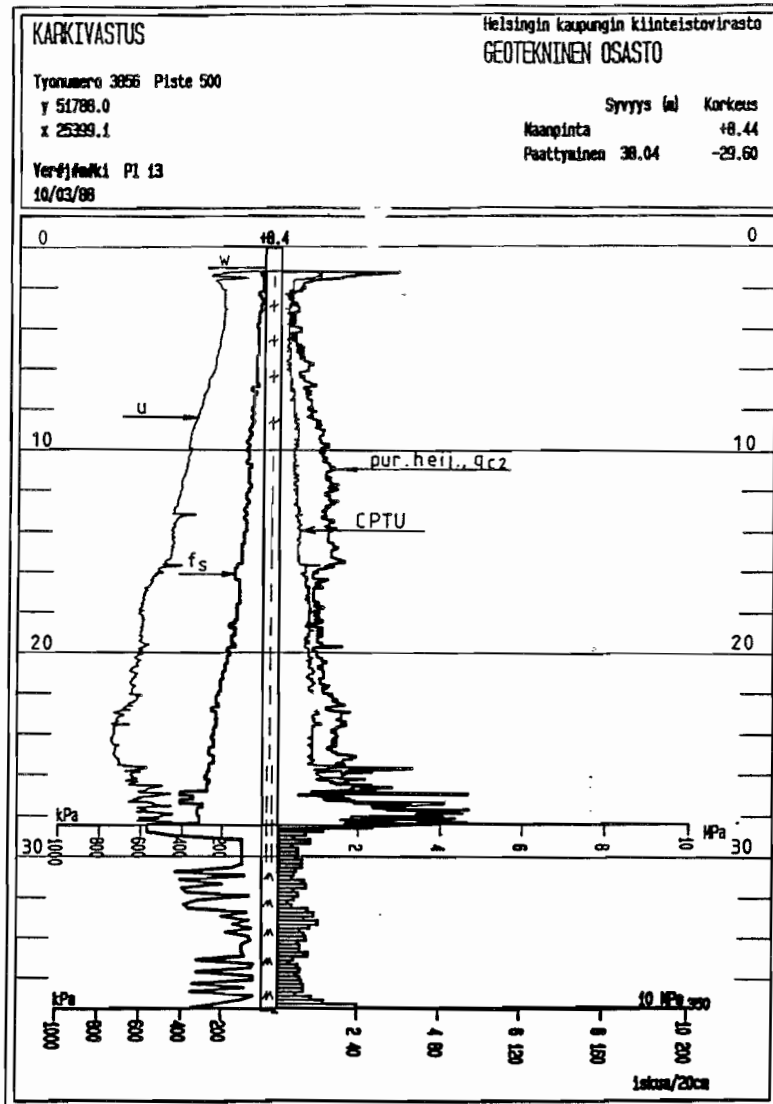
Veräjämäessä puristin-heijarikairalla saatava kärkivastus jouduttiin määrittämään muista poikkeavalla tavalla (ks. luku 7.1). Nyt jouduttiin määrittämään kärkivastus q_{C2} . Tulokset esitetään kuvassa 61. Puristin-heijarikairalla määritetty kärkivastus on 16 metriin asti virheellinen. Tällä osuudella maalajit ovat savista liejua ja savea, jossa on erittäin paljon hyvin ohuita silttikerroksia. Pahimmillaan puristin-heijarikairalla saadaan jopa 300 % suuremmat arvot kuin CPTU:lla. 16 metrin syvyyden jälkeen tulee savea, jossa vääntömomentti kasvaa keskimäärin 5,2 Nm/m, jonka vuoksi käytetään q_{C2} :ta. Puristin-heijarikairalla saadaan 13 - 90 % suurempia arvoja kuin CPTU:lla. Saven alapuolella olevassa siltissä kärkivastukset ovat

lähempänä toisiaan, jossa puristin-heijarikairan kärkivastus on maksimissaan 50 % suurempi kuin CPTU:lla.

Torpparinmäessä kärkivastusten vastaavuus on paras (kuva 57). Puristin-heijarikairalla saatiin keskimäärin noin 5 % suurempi kärkivastus kuin CPTU:lla. Mellunkylän ja Tapanilan alueella tehtyjä kokeita voidaan pitää lähes yhtä hyvinä. Ainoastaan Veräjänmäessä tuloksia ei voida pitää hyvinä, koska puristin-heijarikairan kärkivastus oli keskimäärin 85 % suurempi kuin CPTU:lla.



Kuva 60. Puristin-heijari- ja puristinkairaus (CPTU). Tapanila, Helsinki.



Kuva 61. Puristin-heijari- ja puristinkairaus (CPTU). Puristin-heijarikairalla määritetty q_{c2} . Veräjämäki, Helsinki.

9. VIRHELÄHTEET

9.1 Laitteiston aiheuttamat virheet

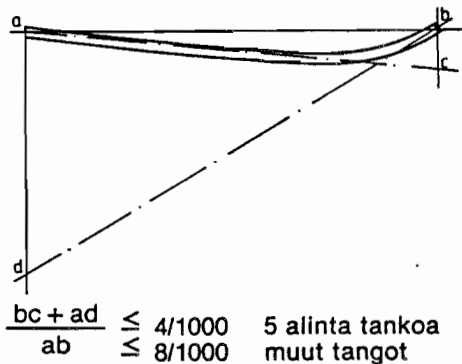
Kairausvälineiden ja laitteiden uudistuessa sekä monipuolistuessa virhelähteet lisääntyvät, mutta kokonaisuudessa absoluuttisen virheen pitäisi pienentyä. Mikäli tiedetään virhelähde ja suuruus, se voidaan ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa.

Käytetyssä puristin-heijarikairassa puristusvoima ja vääntömomentti mitataan hydraulpaineen tulo- ja menoputkien paine-erona. Puristusvoima ja vääntömomentti pitää kalibroida noin kuuden kuukauden välein. Sen sijaan nolla-asetus on suoritettava ainakin 2 - 3 kertaa työvuoron aikana. Puristus- ja pyöritysnopeudella on suurin merkitys nolla-asetukseen. Siihen vaikuttaa myös öljylämpötilojen vaihtelut. Talvella kylmällä ja lämpimällä öljyllä saattaa olla puristusvoimassa jopa 1000 N ero. Pehmeissä savissa, kun puristusvoima on noin 200 - 600 N, erottelukyvyn virhe voi olla 50 - 100 %. Käytännössä tällä ei kuitenkaan ole kovinkaan paljon merkitystä, koska tällaisessa maassa parametrimäärityksiä ei kuitenkaan tehdä. Puristusvoiman ollessa yli 2000 N erottelukyvyn virhe pienenee yleensä alle 10 %. Normaalisti silteissä ja hiekoissa erottelukyvyllä ei ole enää merkitystä, sillä muut tekijät aiheuttavat enemmän virheitä. Mikäli puristusvoiman mittaus tapahtuisi esimerkiksi sähköisesti, ei pienillä voimilla olisi ongelmia virheiden kanssa. Toisaalta sähköisen mittauksen kestäväyydestä ei ole kokemuksia puristin-heijarikairassa. Kairausdiagrammissa on savessa tasan metrin välein useimmiten pieni puristusvoiman ja vääntömomentin kasvu, joka aiheutuu tankojen vaihdosta. Syynä saattaa olla myös kelkan aiheuttama kitka.

Puristin-heijarikairauksessa käytetään irtokärkeä, joka jää lähes aina maahan. Tämän vuoksi ei ole mahdollisuutta tarkistaa, onko kärki kairauksen aikana vahingoittunut. Aina on kuitenkin tarkistettava, että uudessa kärjessä ei

ole esim. merkittäviä valuvirheitä. Satunnaisesti on myös tarkistettava, että kärki täyttää sille asetetut mitta-vaatimukset.

Kairatankojen poikkeama suorasta ei saa olla yli 4 % viidessä alimmalla tangolla ja yli 8 % muilla tangoilla, kuva 62 /23/. Jos tangot ovat käyriä, vääntömomentti vaihtelee suuresti. Kairatangot pyrkivät vääntymään lisää ja puristusvoimakkin on virheellinen.



Kuva 62. Kairatankojen suoruuden sallitut poikkeamat /23/.

Iskuenergia on merkittävä tekijä heijarikairauksen tuloksiin. Vaikka kairatankojen pitää olla suorina ja tankojen liitosten jäykkiä, seuraavat kaksi tekijää ovat erittäin tärkeitä:

- järgäleen pitää olla ns. vapaasti putoava
 - järgäleen putoamiskorkeuden pitää olla vakio (50 cm)
- Jotta järgäle olisi mahdollisimman vapaasti putoava, pitää ohjainkelkan olla suora ja hyvin voideltu.

Tässä työssä syvyyden mittaamisessa oli pieniä vaikeuksia. Vaikka rekisteröintilaitte mittasi syvyyden, kirjattiin silti heijarikairauksista iskuluku ja syvyys käsin. Ongelmana oli heijarikairauksen päättymissyvyys. Kairauksen päättyessä kiveen tai kallioon iskutyyny pomppi jous-ton vuoksi, ja sen edestakainen liike aiheutti alaspudotessaan virheellistä syvyydenmittausta. Normaalisti eroa syntyi 5 - 20 cm verrattuna manuaaliseen kirjanpitoon.

9.2 Käyttäjän virheet

Puristin-heijarikairaa pitäisi vielä kehittää, jotta käyttäjän aiheuttamat virheet voitaisiin minimoida. Käyttäjän virheet, joista kaikista ei voida selvittää määrää ja ajankohtaa, ovat vaarallisempia kuin itse laitteesta aiheutuneet.

Kun kairaus aloitetaan, on puristusnopeus 1,2 m/min ja pyöritysnopeus 12 r/min säädettävä kohdalleen. Tämän jälkeen on säädettävä nolla-asetus kohdalleen. Tämän työn yhteydessä se säädettiin siten, että kelkkaa ajettiin tyhjänä (ilman tankoja) vaaditut puristus- ja pyöritysnopeus asetettuina. Sen jälkeen nolla-asetus asetettiin siten, että rekisteröintilaitte rekisteröi pääasiassa nollaa, mutta välillä se rekisteröi yhden yksikön puristusvoiman ja/tai vääntömomentin. On parempi, että laite rekisteröi hieman liian pienellä kuormalla yhden yksikön kuin päinvastoin. Nolla-asetus tehtiin aina ennen uutta kairausta ja useimmiten vielä heti kairauksen jälkeen. Näin havaittiin mahdolliset muutokset, ja ne voitiin korjata välittömästi.

Kairamasto täytyy pitää mahdollisimman pystysuorassa. Kairamaston poikkeama pystysuorasta ei saa olla yli 2 % kuin pakottavissa tapauksissa /5/. Jos kaltevuus on suurempi kuin edellä mainittu, se vaikuttaa heijarikairaukseen. Iskuenergia pienenee kitkan kasvaessa. Suurissa poikkeamissa järkäleen putoamiskorkeus alenee, ja syvyyden mittaamisessa tapahtuu virhettä.

Heijarikairauksen iskutiheys vaikuttaa tuloksiin. 15 - 30 iskua minuutissa on maailmalla yleisesti käytössä. Hiekassa ja sorassa iskutiheyden vaikutus on pienempi ja jopa 60 iskua minuutissa on mahdollista /19/. Puristin-heijarikairalla siirrytään normaalisti juuri karkeissa maa-lajeissa heijaamaan. Tämän vuoksi iskutiheyden muutokses-sa tapahtuva virhe ei ole merkittävä. Suositeltava isku-

tiheys puristin-heijarikairalle on 25 - 45 iskua minuutissa.

Kairaustyön keskeyttäminen aiheuttaa varsinkin koheesiomaissa vaippakitkan kasvua. Tämän vuoksi on kairapiste aina tehtävä alusta loppuun työtä keskeyttämättä. Ainoa keskeytys sallitaan vain tankojen vaihtoa varten, ja nämäkin keskeytykset on oltava lyhyitä. Puristin-heijarikairaustyön nopeudesta ja Suomen kairausrytymyksistä johtuen ei kairausta tavallisesti tarvitse keskeyttää lukuunottamatta tankojen vaihtoa.

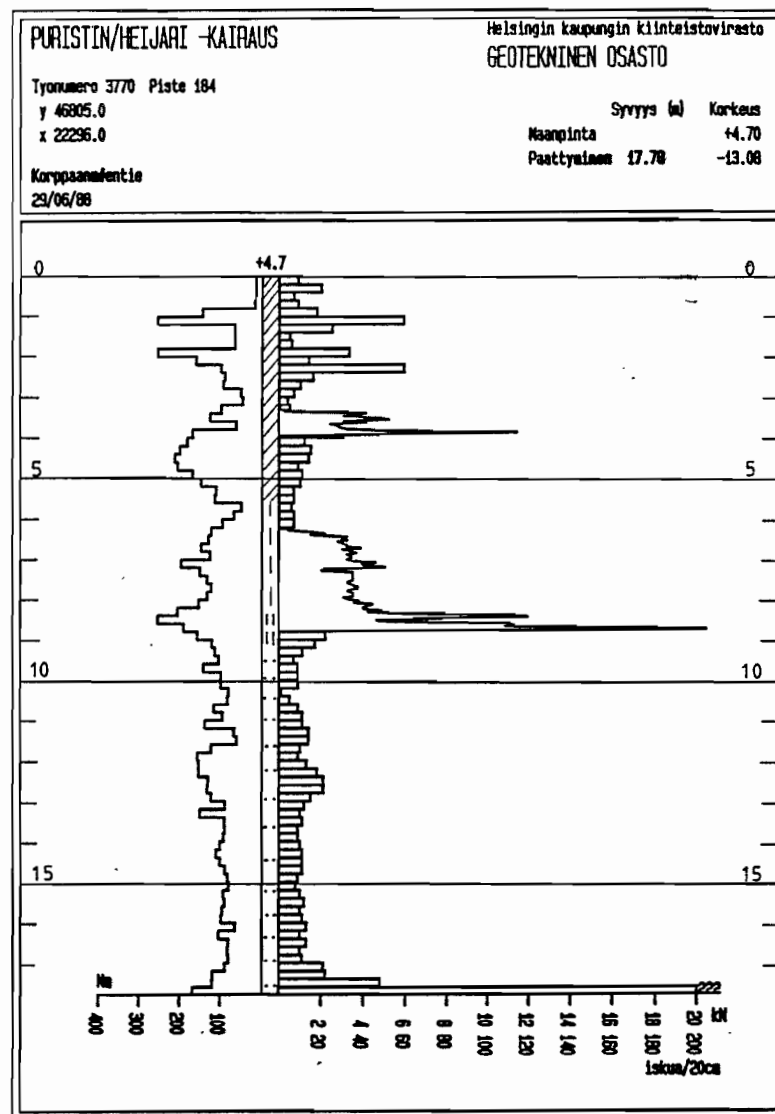
Jos kairaus suoritetaan häiriintyneessä maassa, tulokset ovat virheellisiä. Puristin-heijarikairausta ei saa suorittaa liian lähelle porareikiä tai muita kairauksia. Etäisyyden porareikään täytyy olla 25 kertaa porauksen halkaisija, kuitenkin vähintään 2 metriä. Varoeräisyyden muihin kairauksiin täytyy olla myös 2 metriä /19/. Jos kairaus lähtee heti alussa vinoon, se voi mennä hyvinkin lähelle edellistä kairausta, jossa maa on häiriintynyt.

9.3 Täytteen aiheuttama virhe

Kairaus joudutaan joskus suorittamaan täytteen läpi. Täytteen materiaalista riippuu paljon, kuinka paljon virhettä se aiheuttaa tuloksiin. Myös koheesiomaakerrosten päällä oleva tiivis kitkamaakerros voi aiheuttaa samanlaisia vaikeuksia kuin täytemaa (mutta lievempiä).

Useimmiten kivisen täytteen alla olevassa savessa kärkivastuksen arvo on liian suuri. Tämä johtuu täytteen aiheuttamasta kitkasta tankoihin. Vaikka kärki tekeekin suuremman reiän kuin tankojen halkaisija on, kivisessä maassa kivet siirtyvät helposti tankoihin kiinni. Varminkin tällainen tapaus havaitaan normaalia suuremmasta vääntömomentista täytteen alapuolella olevassa savessa tai siltissä. Tällöin määritettäessä kärkivastusta joudu-

taan vääntömomentti huomioimaan (määritetään q_{c2}). Tul-
kitsija päättää kuitenkin aina tapauskohtaisesti kärki-
vastuksen määrittäytavasta, sillä yleispätevää sääntöä ei
ole. Epävarmoissa tapauksissa kannattaa momentti huomioi-
da. Jos momentti on pieni, se ei aiheuta suurta vähennys-
tä kärkivastukseen. Kuvassa 63 on esimerkki täytteen ai-
heuttamasta hankauksesta.



Kuva 63. Esimerkki täytteen aiheuttamasta kitkasta tan-
koihin. Korppaanmäentie, Helsinki.

Täytteen aiheuttamaa virheellisyyttä kairaustuloksiin
voidaan vähentää tai poistaa. Yleisin ja helpoin tapa on
tehdä alkukairaus porakoneella, joka voidaan tehdä esim.
Ø64 mm poralla. Erittäin vaikeissa kohteissa (=kivisissä)

voi olla tarpeen asentaa porakoneella suojaputki, jonka lävitse puristin-heijarikairaus suoritetaan. Kivettömässä mutta tiiviissä maassa voi alkukairauksen tekeminen onnistua myös puristin-heijarikairalla. Alkukairaus tehdään pyörittämällä kierrekairaa voimakkaasti ja nostamalla sekä painamalla edestakaisin täytteessä. Tämä tapa vaatii puristin-heijarikairalta huomattavasti suuremman vääntömomentin kuin tavallinen kairaus.

Tähän mennessä saadut kokemukset ovat ainakin Helsingin alueella osoittaneet, että erittäin harvoin luonnontilaisessa maassa pintakerroksista on aiheutunut merkittävästi kitkaa. Täytteisessä maassa kivet ovat haittaavina tekijöinä, mutta ilman alkukairausta ovat tulokset useimmiten aivan käyttökelpoisia.

10. SUOSITUS PURISTIN-HEIJARIKAIKAUSTEN SUORITTAMISEKSI

Kärki ja tangot

Puristin-heijarikairaustyötä on suoritettava asianmukaisin laittein ja varustein. Kärkenä käytetään tavallista Ø 45 mm kärkeä (kuva 3). Tangot ovat Ø 32 ja niiden on täytettävä niille asetetut suoruusvaatimukset (kuva 62).

Kalibrointi

Laitteiston puristusvoiman ja vääntömomentin kalibrointi on suoritettava noin kuuden kuukauden välein. Nolla-asetus on tarkastettava ja tarvittaessa säädettävä oikeaksi 2 - 3 kertaa työvuoron aikana (8 h).

Kairauksen suoritus

Käytettävä puristusnopeus on 1.2 ± 0.3 m/min ja pyöritysnopeus 12 ± 3 r/min. Heijarivaiheessa tankoja pyöritetään edelleen ja iskutiheys on 25 - 45 iskua minuutissa. Näissä toleranssiarvoissa on pysyttävä, ja kairajan on vähintään kaksi kertaa tarkastettava nopeudet työvuoron aikana.

Kivisissä täytemaissa sekä routakerroksissa on syytä aina suorittaa alkukairaus esimerkiksi porakonekairalla tai asentamalla suojaputki. Jos vääntömomentti kasvaa huomattavasti täytteissä tai tiiviin kitkamaan pintaosissa, myös silloin on syytä suorittaa alkukairaus.

Puristin-heijarikairaustyö aloitetaan puristinkairauksena, jota jatketaan maksimipuristusvoimaan asti. Maksimipuristusvoima riippuu kairauslaitteiston tehosta tai ennalta määrätystä voimasta. Maksimipuristusvoiman on oltava vähintään 16 kN ja maksimivääntömomentin 200 Nm. Tämän jälkeen siirrytään heijarikairaukseen. Jos kesken heijarikairauksen maaperä oleellisesti pehmenee, voidaan siir-

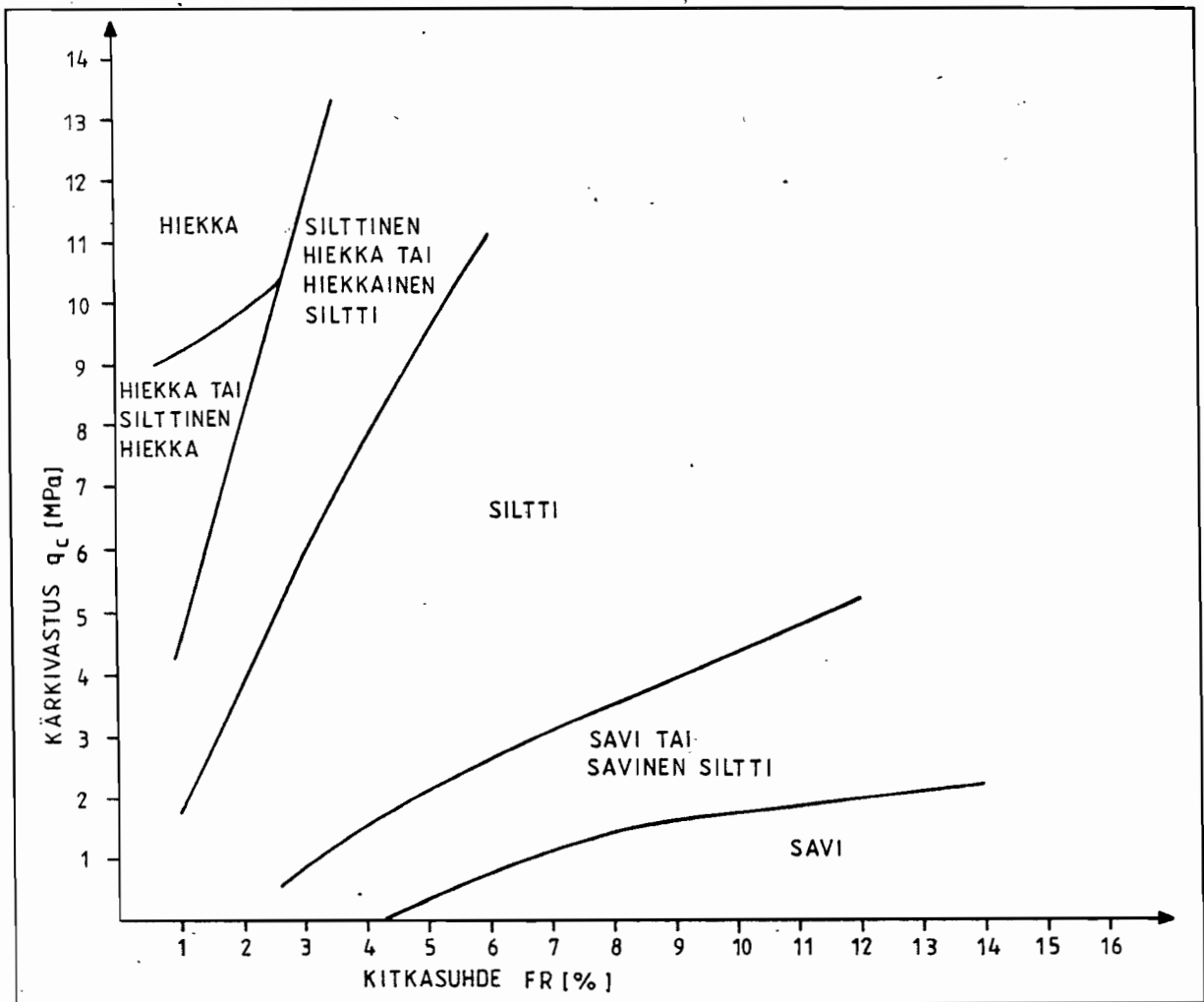
tyä takaisin puristinkairaukseen. Kuitenkin jos $N_{20} \leq 5$ yli 0.4 metrin matkalla, on siirryttävä takaisin puristamaan. Lyhyellä (1 - 2 m) matkalla ei ole syytä vaihtaa useasti kairaustapaa, sillä tulkinta vaikeutuu muuten oleellisesti. Puristin-heijarikairaus päättyy aina heijarikairaukseen.

Tulosten käsittely

Normaalisti määritetään kärkivastus q_{C1} . Jos vääntömomentti kasvaa nopeasti, vaippakitka kasvaa myös. Silloin on syytä määrittää q_{C2} , jonka määrittämisessä otetaan vääntömomentti huomioon. Määritetyn kärkivastuksen luotettavuutta voidaan lisätä, jos tehdään vertailukairauksia CPT:llä.

Kairaaajat eivät tee maalajitulkinintoja kairauksen yhteydessä. Tulkinnot tehdään kairausvastusten sekä näytteiden perusteella, ja apuna voidaan käyttää kuvia 64 ja 65. Puristusvaiheen tulkinnan luotettavuus on hyvä, mutta heijarivaiheen tulkinnan luotettavuus on välttävä. Maalajimääritykset perustuvat Helsingin kaupungin alueella tehtyihin kokeisiin. Kuvassa 66 esitetään tulkinnan ja näytteiden välinen vertailu.

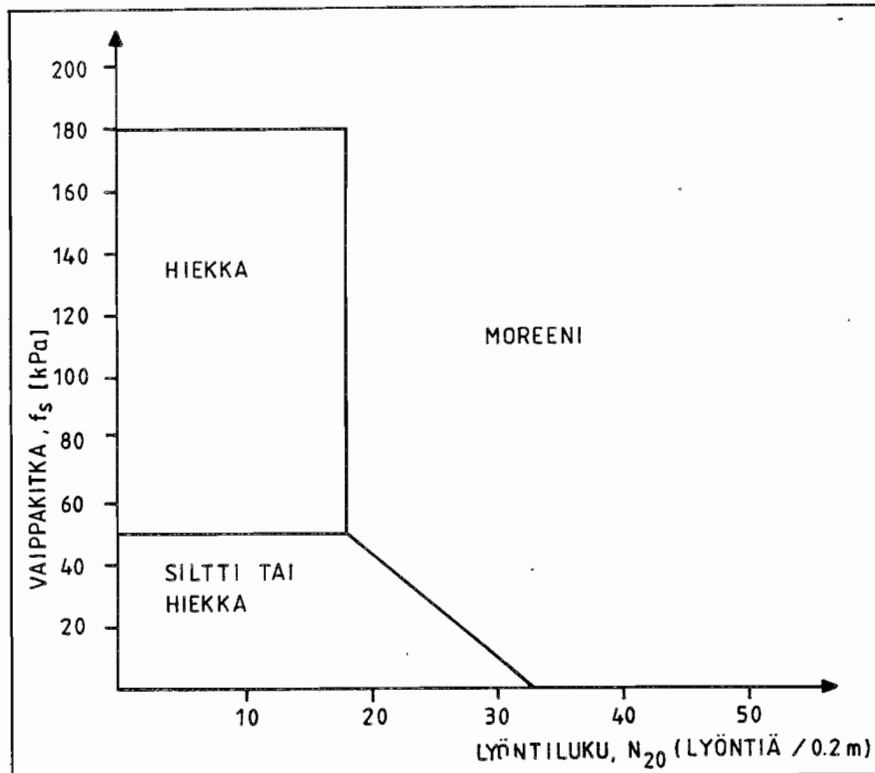
Parametrimääritykset perustuvat leikkauslujuutta lukuumattamatta ulkomaiseen kirjallisuuteen ja kokeisiin. Leikkauslujuuden ja puristin-heijarikairan välillä ei Helsingin pehmeiden savien vuoksi saatu luotettavaa riippuvuutta. Parametrien määrittämisen kuvaajat on esitetty luvuissa 7.4 ja 7.5. Lähtökohtana voidaan pitää, että puristin-heijarikairalla määritetyn kärkivastuksen suuruus on oikea, mutta eri määrittämistavat perustuvat jonkin verran Suomesta poikkeaviin olosuhteisiin. Määrittämistuloksiin on siis suhtauduttava varauksin. Taulukosta 12 selviää, mitä puristin-heijarikairalla voidaan määrittää tämän työn mukaan.



Kuva 64. Puristin-heijarikairauksen puristusvaiheen maalajin tulkinta.

Taulukko 12. Puristin-heijarikairausmenetelmän soveltuvuus. Soveltuvuusarviot:+++ erinomainen ++ keskinkertainen + soveltuu jossain määrin - ei sovellu

SUURE	SOVELTUVUUS			
	SAVI	SILTTI	HIEKKA	MOREENI
1. KERROSRAJAT	+++	+++	++	++
2. MAALAJI	+++	++	++	++
3. KÄRKIVASTUS	++	+++	+++	+
4. VAIPPAVASTUS	+	+	+	-/(+)
5. SULJETTU LEIKKAUSLUJUUS	+	+	-	-
6. KITKAKULMA	-	-	+	-
7. PAINUMAOMINAISUUDET	-	+	+	-
8. TIIVIYS	-	+	++	++
9. SYVÄSTABILOITUJEN PILAREIDEN LEIKKAUSLUJUUS	++	+	-	-



Kuva 65. Puristin-heijarikairauksen heijarivaiheen maala-
jin tulkinta. Käytettävä varauksin.

Tulosten esittäminen

Tavanomaisessa esityksessä voidaan käyttää kuvan 47 (sivu 73) mukaista karttamerkkiä. Geoteknisissä leikkauksissa voidaan käyttää kuvan 48 (sivu 74) mukaista diagrammia, josta ilmenee vääntömomentti ja kärkivastus. Diagrammissa on esitettävä ainakin 10 MPa kärkivastus ja 200 Nm vääntömomentti. Sopiva skaala senttimetriä kohden on 2 MPa, 20 iskua/0.2 m ja 100 Nm.



১৯৭৭

KIRJALLISUUSLUETTELO

ECSMFE European conference on soil mechanics and foundation engineering

ESOPT European symposium on penetration testing

ICSMFE International conference on soil mechanics and foundation engineering

ISOPT International symposium on penetration testing

NGM Nordiska geoteknikermötet

/1/ Alte, B. & Johansson, B-O., Undersökningsmetod med borrhör Ø 36 mm och tung utrusting. Statens råd för byggnadsforskning, R 118:1983. Stockholm 1983. 57 s.

/2/ Amar, S., The use of the static penetrometer in the laboratories des Ponts et Chaussees. Proc. ESOPT I, vol 2.2. Stockholm 1974. s. 7 - 12.

/3/ Baldi, G., Bellotti, R., Ghiomma, N. Jamiolkowski, M. & Pasqualini, E., Interpretation of CPT's and CPTU's. Fourth International Geotechnical Seminar. Singapore 1986. s.143 - 156.

/4/ De Beer, E. & Dahlberg, R., Interpretation of results of static penetration tests (Group discussions). Proc. ESOPT I, vol 2.1. Stockholm 1974. s. 62 - 72.

/5/ De Beer, E.E., Goelen, E., Heynen, W. J. & Joustra, K., Cone penetration test (CPT): International reference test procedure. Proc. ISOPT-1. Orlando 1988. s. 27 - 51.

- /6/ Bergdahl, U., Broms, B.B & Muromachi, T., Weight sounding test (WST): International reference test procedure. Proc. ISOPT-1, vol 1. Orlando 1988. s. 71 - 90.

- /7/ Bergdahl, U. & Eriksson, U., Bestämning av jord-egenskaper med sondering - en litteraturstudie. Statens geotekniska institut, rapport 22. Linköping 1983. 96 s.

- /8/ Bergdahl, U. & Ottoson, E., Jordegenskaper ur sonderingsresultat - en jämförelse mellan olika undersökningsmetoder i friktionsjord. NGM -84, vol. 2. Linköping 1984. s.725 - 738.

- /9/ Brand, E. W., Moh, Z-C. & Wirojanagud, P., Interpretation of Dutch cone tests in soft Bangkok clay. Proc. ESOPT I, vol. 2.2. Stockholm 1974. s. 51 - 58.

- /10/ Broms, B. B., Scandinavia (General reports). Proc. ESOPT I, vol 2.1. Stockholm 1974. s. 14 - 23.

- /11/ Broms, B.B., Bergdahl, U. & Muromachi, T., Weight sounding test, working groups: International refence test procedures. Three-part document presenting recommendations of the WST working group to be discussed at XI ICSMFE, San Francisco, USA, August 11 - 15, 1985.

- /12/ Dahlberg, R. & Bergdahl, U., Investigations on the Swedish Ram-Sounding method. Proc. ESOPT I, vol 2.2. Stockholm 1974. s. 93 - 102.

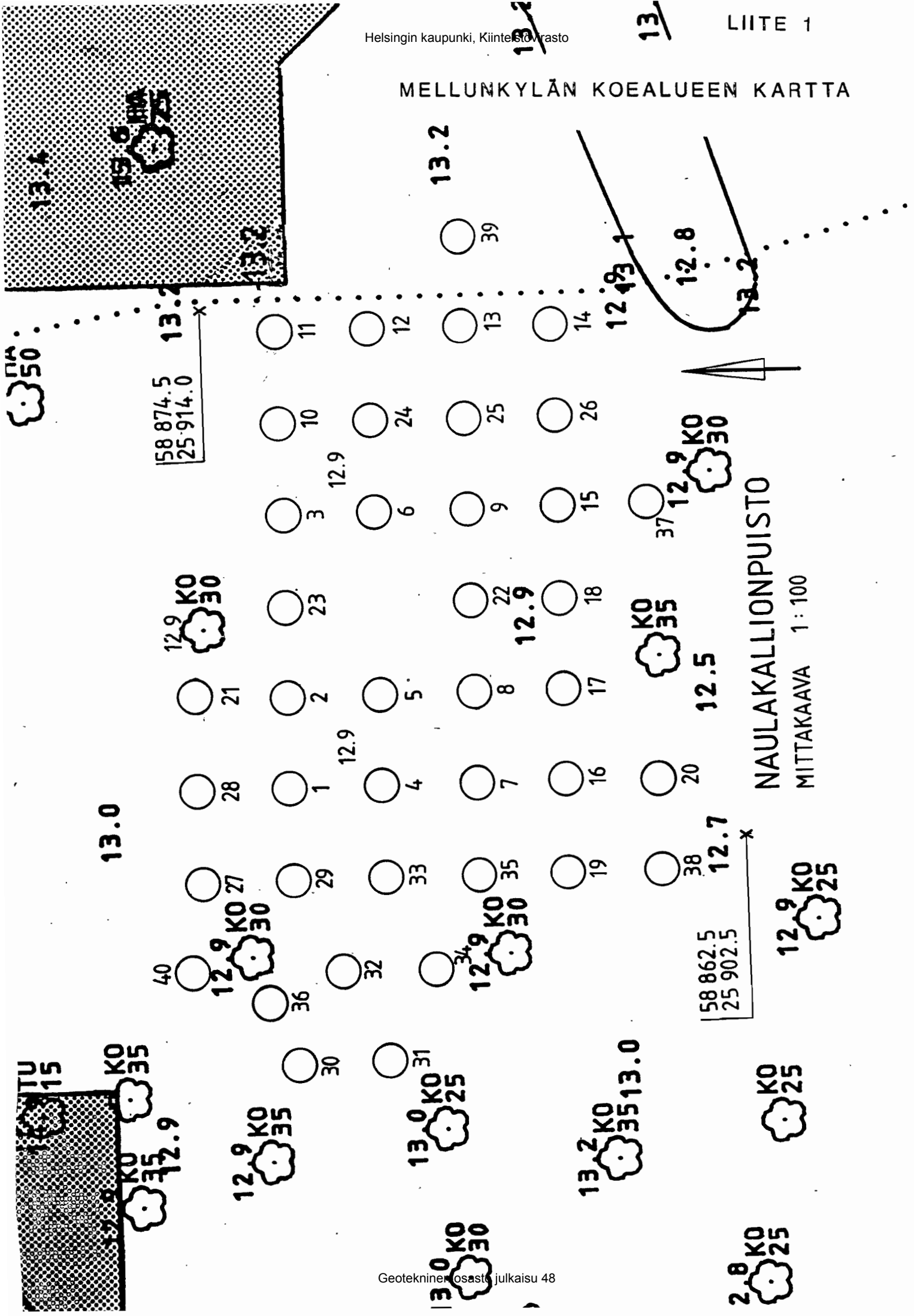
- /13/ Denver, H., CPT and shear strength of clay. Proc. ISOPT-1, vol 2. Orlando 1988. s. 723 - 727.

- /14/ Durgunoglu, H. T. & Mitchell, J. K., Influence of penetrometer characteristics on static penetration resistance. Proc. ESOPT I, vol 2.2. Stockholm 1974. s. 133 - 139.
- /15/ Halkola, H., Nykyaikaiset pohjatutkimusmenetelmät, julkaisu 84 - 87 II. Insinööritieto Oy 1984. 17 s.
- /16/ Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. Helsingin kaupunki, Geotekninen osasto, tiedote 30. Helsinki 1982. 87 s.
- /17/ Halkola, H. & Kärkiö, H., Tryck-hejarsondering i Finland. NGM -88. Oslo 1988. s. 46 - 48.
- /18/ Helenelund, K. V., Kitkamaalajien kantavuusominaisuuksia / On the bearing capacity on frictional soils. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus. Sarja III, Rakennus 97. Helsinki 1966. 110 s.
- /19/ Melzer, K-J., Stefanoff, G., Sanglerat, G. & Bergdahl, U., Dynamic probing (DP) working party: International refence test procedures. Three-part document presenting recommendations of working party to be discussed at XI ICSMFE, San Francisco, USA August 11 - 16, 1985.
- /20/ Kalkkipilariohjeet, KPO -86. Helsinki 1986. 44s.
- /21/ Kärkiö, H., Beskrivning av en ny, mångsidig sonderingsanläggning, en s.k. HK-sond. NGM-84, vol 2. Lindköping 1984. s. 805 - 810.
- /22/ Marsland, A. & Quarterman, R.S., Factors affecting the measurements and interpretation of quasi static penetration tests in clays. Proc ESOPT II vol 2. Amsterdam 1982. s. 697 - 702.

- /23/ Meigh, A.C, Cone penetration testing, methods and interpretation. Letchworth 1987. 141 s.
- /24/ Meyerhof, G.G, Outside Europe (General reports). Proc. ESOPT I, vol 2.1. Stockholm 1974. s.40 - 48.
- /25/ Muromachi, T. & Kobayashi, S., Comparative study of static and dynamic penetration tests currently in use in Japan. Proc. ESOPT II, vol 1. Amsterdam 1982. s. 297 - 302.
- /26/ Mäkinen, R., Pohjatutkimukset. RIL 157 - I Geomekaniikka I. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1985. s. 125 - 186.
- /27/ Powell, J.J.M. & Quarterman, R.S.T., The interpretation of cone penetration tests in clays, with particular reference to rate effects. Proc. ISOPT-1, vol 2. Orlando 1988. s. 903 - 909.
- /28/ Sanglerat, G., The penetrometer and soil exploration. Amsterdam 1972. 488s.
- /29/ Searle, I.W., The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give soil types and design parameters. Proc. ECSMFE VII, vol 2. Brighton 1979. s. 265 - 270.
- /30/ Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y., Kairausopas I, paino- ja heijarikairaus. Helsinki 1980. 40s.
- /31/ Sutcliffe, G. & Waterton, C., Quasi-static penetration testing. In situ testing for geotechnical investigations. Rotterdam 1983. s. 33 - 48.

- /32/ Toikka, K., Lahden siltin mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen puristinkairalla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Espoo 1984, 77s.
- /33/ Trofimenkov, J.G., Penetration testing in USSR. Proc. ESOPT I, vol 1. Stockholm 1974. s. 147 - 154.
- /34/ Törqvist, J., Käyttökokemuksia puristinkairan käytöstä Suomessa. Pohjatutkimukset, Geotekniikan päivä marraskuu 1985. Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y. Helsinki 1985. s.41 - 54.
- /35/ Vermeer, P.A. & van den Berg, P., Analysis of CPT for undrained clays. Proc. ISOPT-1, vol 2. Orlando 1988. s. 1035 - 1041.
- /36/ Viergever, M.A., Cone penetration with enlarged tip in cohesive soils. Proc. ICSMFE XI, vol 2. San Francisco 1985. s. 947 - 950.

MELLUNKYLÄN KOEALUEEN KARTTA



NAULAKALLIONPUISTO

MITTAKAAVA 1:100

MELLUNKYLÄN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

LIITE 2

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
683	29	1.2 m/min	12 r/min	
686	27	1.2	12	
689	28	1.2	12	
692	32	2.0	20	
695	31	2.0	20	
698	30	2.0	20	
701	34	3.0	30	
704	33	3.0	30	
707	35	3.0	30	
785	10	1.2	0	
787	11	1.2	0	
788	12	1.2	0	
789	13	1.2	20	
791	14	1.2	20	
793	15	1.2	20	
795	18	1.2	30	
797	17	1.2	30	
799	16	1.2	30	
329	39	1.2	20	
332	40			heijarikairaus
715	24			CPTU
-	40			painokairaus
-	23			siipikairaus
-	21			häiriintynyt näyte
-	23			häiriintynyt näyte
-	22			häiriintymätön näyte

MELLUNKYLÄN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

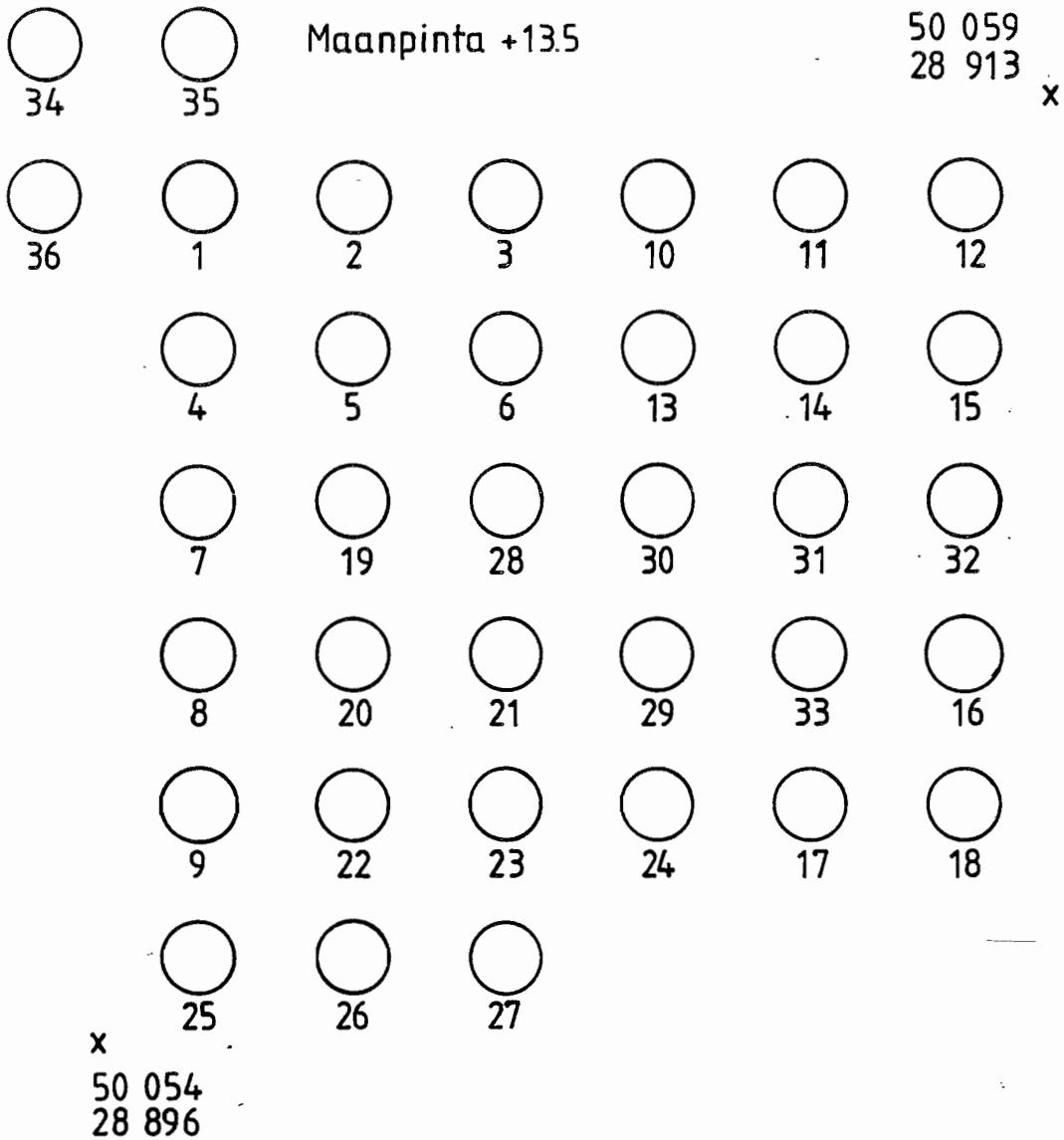
LIITE 2

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
683	29	1.2 m/min	12 r/min	
686	27	1.2	12	
689	28	1.2	12	
692	32	2.0	20	
695	31	2.0	20	
698	30	2.0	20	
701	34	3.0	30	
704	33	3.0	30	
707	35	3.0	30	
785	10	1.2	0	
787	11	1.2	0	
788	12	1.2	0	
789	13	1.2	20	
791	14	1.2	20	
793	15	1.2	20	
795	18	1.2	30	
797	17	1.2	30	
799	16	1.2	30	
329	39	1.2	20	
332	40			heijarikairaus
715	24			CPTU
-	40			painokairaus
-	23			siipikairaus
-	21			häiriintynyt näyte
-	23			häiriintynyt näyte
-	22			häiriintymätön näyte

TORPPARINMÄEN KOEALUEEN KARTTA

TORPPARINMÄKI

MITTAKAAVA 1:100



TORPPARINMÄEN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

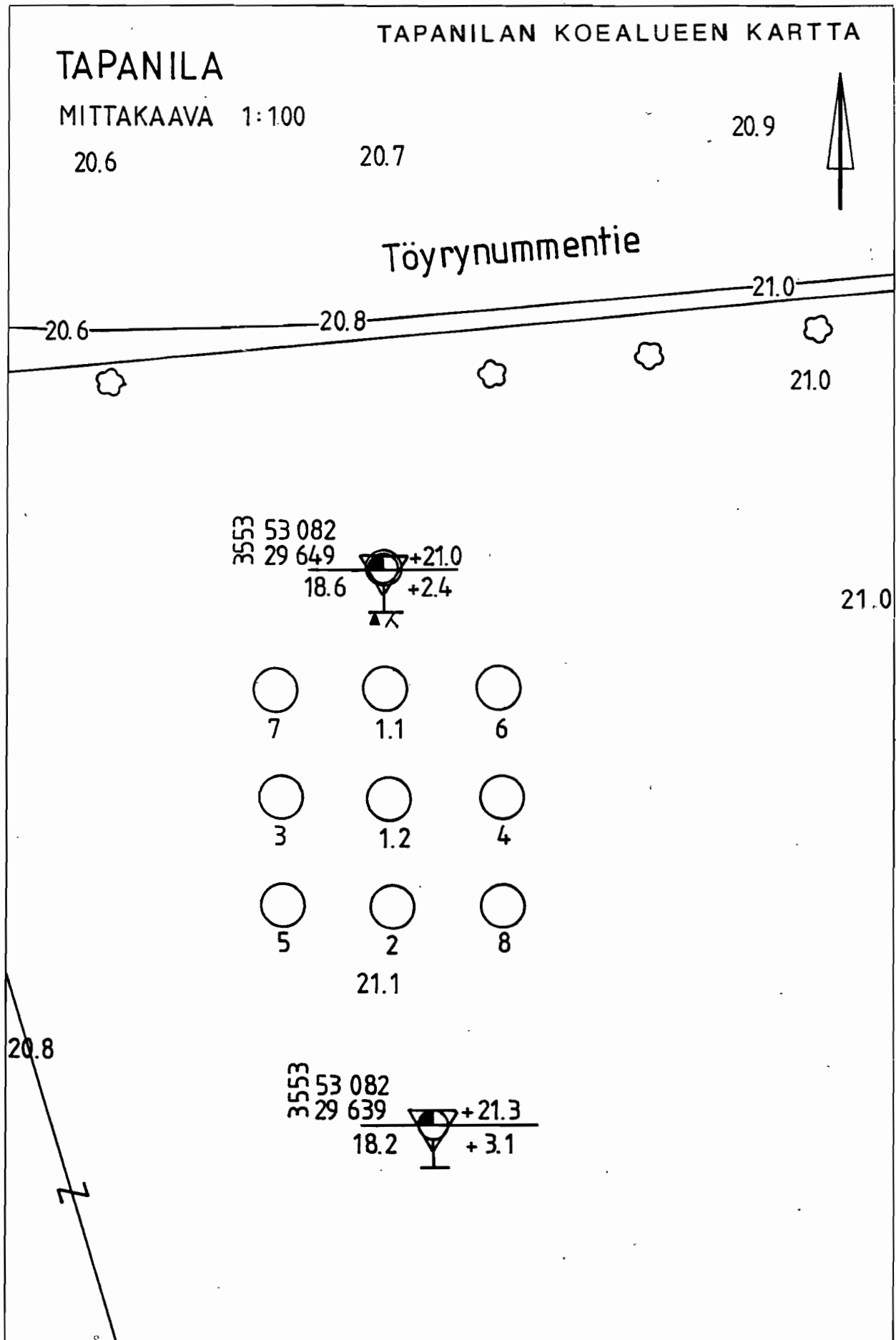
LIITE 4

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
611	4	2.0 m/min	20 r/min	
614	7	3.0	30	
622	8	3.0	30	
624	9	3.0	30	
626	5	2.0	20	
630	6	2.0	20	
632	3	1.2	12	
636	35	1.2	12	
639	34	1.2	12	
642	36	2.0	20	
767	10	1.2	0	
768	11	1.2	0	
770	12	1.2	0	
772	13	1.2	20	
773	14	1.2	20	
775	15	1.2	20	
777	16	1.2	30	
780	18	1.2	30	
782	17	1.2	30	
659	31			CPTU
663	32			CPTU
665	33			CPTU
-	37			painokairaus
-	30			siipikairaus
-	28			häiriintynyt näyte
-	29			häiriintymätön näyte

TORPPARINMÄEN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

LIITE 4

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
611	4	2.0 m/min	20 r/min	
614	7	3.0	30	
622	8	3.0	30	
624	9	3.0	30	
626	5	2.0	20	
630	6	2.0	20	
632	3	1.2	12	
636	35	1.2	12	
639	34	1.2	12	
642	36	2.0	20	
767	10	1.2	0	
768	11	1.2	0	
770	12	1.2	0	
772	13	1.2	20	
773	14	1.2	20	
775	15	1.2	20	
777	16	1.2	30	
780	18	1.2	30	
782	17	1.2	30	
659	31			CPTU
663	32			CPTU
665	33			CPTU
-	37			painokairaus
-	30			siipikairaus
-	28			häiriintynyt näyte
-	29			häiriintymätön näyte



TAPANILAN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

LIITE 6

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
291	2	1.2 m/min	20 r/min	
294	1.2	1.2	12	
297	4			heijarikairaus
300	5	1.2	12	puristusvoima 26 kN
110	8			CPTU yläosa
112	8			CPTU alaosa
-	6			painokairaus
-	7			häiriintynyt näyte

TAPANILAN KAIRAUSPISTEIDEN TAULUKKO

LIITE 6

Printteri	Piste	Puristus-heijarikairaus		Muu kairaus
		Puristus	Pyöristys	
291	2	1.2 m/min	20 r/min	
294	1.2	1.2	12	
297	4			heijarikairaus
300	5	1.2	12	puristusvoima 26 kN
110	8			CPTU yläosa
112	8			CPTU alaosa
-	6			painokairaus
-	7			häiriintynyt näyte

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
- *) 2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
- *) 3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
- *) 4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
- *) 5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
- *) 8. Raudasmaa, P., Metrotunnelien injektointi. 1977. 120,-
- *) 9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
- *) 11. Arkima, O., Kluuvien ruuhkan jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikille perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
- *) 16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
- *) 18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
- *) 26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparimäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunnelien louhintakustannus selvitys. 1982. 50,-
- *) 28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-
37. Leinonen, J., Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa. 1984. 60,-
38. Pirinen, J., Kelluvan rantapenkereen rakentaminen. 1984. 60,-
39. Latvala, A., Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti. 1984. 60,-
40. Korpela, J., Schüller, M., Jäykkien liitosjohtojen pohjarakenneselvitys (Jäli-selvitys). 1984. 80,-
41. Lahtinen, E-R., Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti). 1985. 30,-
42. Korpi, J., In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi. 1985. 60,-
43. Havukainen, J., Esirakentamisen kehittäminen. 1985. 60,-
44. Vähäaho, I., Jäähdytysmenetelmän käyttö. 1987. 60,-
45. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Latvala, A., Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. 1987. 60,-
46. Julkunen, A., Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa. 1987. 60,-
47. Hutri, K-L., Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin. 1988. 60,-
48. Melander, K., Puristin-heijafikairaus kairausmenetelmänä. 1989. 80,-
49. Leppänen, M., Vahvistinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa. 1989. 80,-

*) PAINOS LOPPUUNMYTTY