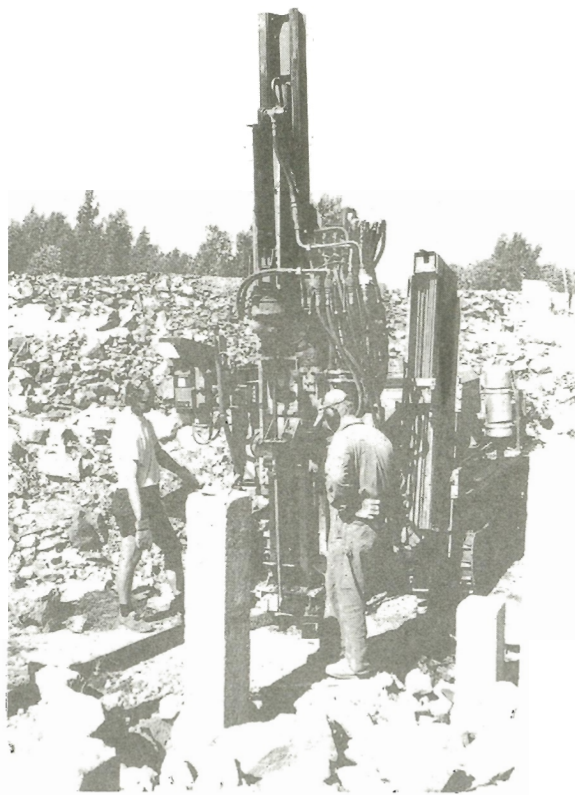




PAALUN KANTAVUUDEN ARVIOINTI PURISTIN-HEIJARIKAIRALLA

Kalle Rantala & Hannu Halkola



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNINEN OSASTO

PAALUN KANTAVUUDEN ARVIOINTI PURISTIN-HEIJARIKAIRALLA

Kalle Rantala & Hannu Halkola

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla tavoitteena kehittää puristin-heijarikairauksen tulkintaa siten, että tulokset soveltuvat paalun kantavuuden arvioimiseen.

Paalun kantavuuden arviointiin sovellettiin alunperin CPT-kairan kärkivastukseen perustuvaa menetelmää. Puristin-heijarikaira rekisteröi puristusvoiman, lyöntiluvun ja vääntömomentin arvot, ja niiden perusteella vastaavat kärkikappaleen tunkemiseen tarvittavat nettoarvot on määritettävä laskennallisesti. Nettoarvot muutettiin vastaamaan CPT-kairauksen kärkivastusarvoja laboratorio-olosuhteissa määritettyjen kärkivastuskertoimien avulla.

Laboratoriokokeet tehtiin 4,5 metrin syvyiseen koealtaaseen rakennetussa tiivistetyssä hiekkatäytössä, jossa vertailtiin CPT-kärkivastuksen suhdetta puristin-heijarikairauksen nettokärkivastukseen ja nettolyöntilukuun. Tulosten perusteella CPT-kärkivastus saadaan puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksesta kertoimella 1,07 ja heijarikairausvaiheen nettolyöntiluvusta kertoimella 0,83.

Paalujen kantavuutta kairaustulosten perusteella arvioitiin Helsingissä kolmella erityyppisellä koealueella. Koealueilla tehtyjen kairausten perusteella määritettiin paalun vaippa-, kärki- ja kokonaisvastusten arvot murtotilassa, ja niitä verrattiin paaluista iskuaaltomittauksella määritettyihin arvoihin.

Kallvikin koealueella paalujen arvioitujen murtokuormien arvot olivat keskimäärin noin 12 % alle iskuaaltomittauksilla määritettyjen arvojen. Paciuksen koealueella arvioidut arvot olivat keskimäärin noin 1 % ja Myllypellon koealueella keskimäärin noin 49 % mitattuja arvoja suuremmat. Tässä tutkimuksessa arvioidun murtokuorman arvo oli maksimissaan mitattuun arvoon verrattuna noin 2,2-kertainen, jolloin sallittu kuormitus Lyöntipaalutusohjeiden (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) mukaista minimivarmuuslukua $F = 2,2$ käytettäessä oli lähellä iskuaaltomittauksella määritettyä murtokuorman arvoa.

Tässä työssä käytettyä puristin-heijarikairaustuloksiin perustuvaa suoraa kantavuudenarviointimenetelmää voidaan käyttää suunnitteluvaiheessa kitkapaalujen käyttömahdollisuuksien sekä paalupituuksien ja sallitun geoteknisen kantavuuden arvioimiseen edellyttäen, että kairaukset on tehty kalibroidulla kalustolla ja kairaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Paalujen lyöntisyvyydet ja kantavuudet tarkistetaan koepaalutuksin ja -kuormituksin ennen varsinaista paalutustyötä.

ABSTRACT

This research project was conducted at the geotechnical department of the real estate office of the City of Helsinki. The study was aimed at developing the interpretation of the static-dynamic penetration test to make results more suitable for pile bearing capacity estimating.

A method initially based on CPT cone resistance was applied to pile capacity estimating. The static-dynamic penetration test equipment measures values of penetration force (kN), number of blows (blows/0,2 meter) and torque (Nm). The net values of point force needed to penetrate soil have to be determined by calculation based on these measured values. The net values were converted to be equal with CPT cone resistance values by means of a cone resistance factor determined in laboratory.

The laboratory tests were made in a test basin with a depth of 4,5 meters and filled with compacted sand, where CPT cone resistance values were compared with the net values of cone resistance and the number of blows. On the basis of test results the CPT cone resistance is 1,07 times the net cone resistance in static penetration phase and 0,83 times the net number of blows in dynamic probing phase.

Pile capacities based on penetration test results were predicted in three test sites of different types in the city of Helsinki. The ultimate values of shaft- point- and total resistances of a pile were calculated by means of penetration tests made in test sites. The calculated ultimate values were compared with the resistance values determined by pile driving analysis.

On the test site of Kallvik the estimated ultimate bearing capacity values were on the average about 12 % smaller than the values determined by pile driving analysis. On the test site of Pacius the estimated values were on the average about 1 %, and on the test site of Myllypelto on the average about 49 % smaller than the measured values. In this research project the estimated ultimate value of the bearing capacity of a pile was in maximum about 2,2 times higher than the measured value. This value is close to measured value when a minimum safety factor of $F = 2,2$ according to Lyöntipaalutusohjeet (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) is used with estimated values.

The direct method for estimating the bearing capacity of a pile in this work may be used in a design phase when comparing facilities of using friction piles, and determining the length and the allowable bearing capacity of piles provided the penetration test equipments are calibrated and the test results are reliable. The piling depths and bearing capacities of piles have to be corrected by test piling and test loadings.

ALKULAUSE

Rakennustoiminta on Helsingissä viime vuosina keskittynyt alueille, joissa pohjaolosuhteet ovat perustamisen kannalta vaikeat. Paalutus tuki- ja kitkapaluilla on tästä syystä yleisesti käytetty perustamistapa. Suunnittelijalle on paalujen tavoitetaso määrittäminen monesti vaikeaa, ja lisälaskujen pelossa viedään tavoitetaso urakkalaskentaa varten suunnitelmaleikkauksissa usein varmuuden vuoksi tarpeettoman syvälle.

Paalujen tavoitetaso määritetään Helsingissä yleensä puristin-heijarikairaustulosten perusteella. Menetelmä on kehitetty geoteknisellä osastolla ja sitä on käytetty menestyksellisesti n. 10 vuoden ajan, jolloin se on syrjäyttänyt lähes täysin painokairauksen. Käytännössä paalujen tavoitetasoksi on useimmiten määritetty taso, johon puristin-heijarikairaus on päättynyt.

Tiedotteessa esitetään menetelmä, jonka avulla paalujen kantavuus ja tavoitetasot voidaan määrittää puristin-heijarikairaustulosten avulla jo suunnitteluvaiheessa tarkemmin. Tällöin paaluja ei tarvitse ulottaa kairausten päättymistasoon ja paalupituudet saadaan tarkemmin urakkalaskentaan. Menetelmässä ei nykyisiin puristin-heijarikairauskoneisiin tarvitse tehdä muutostöitä, vaan kairausmenetelmää voidaan käyttää sellaisenaan monipuolisemmin.

Tiedote perustuu DI Kalle Rantalan diplomityöhön, joka tehtiin toimistopäällikkö Hannu Halkolan ohjauksessa. Työn valvoja oli professori Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta. Kairaustehtävissä toimivat kairausmiehet Seppo Linkka, Reijo Hartikainen, ja Simo Hakanen sekä kairausmies Timo Pentti.

Helsingissä marraskuun 17. päivänä 1997



Ilkka Vähäaho

osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKULAUSE.....	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	6
MERKINNÄT.....	8
1 JOHDANTO.....	11
2 PURISTIN-HEIJARIKAIKAUS.....	13
2.1 Laitteisto.....	13
2.2 Kairaus.....	18
3 LABORATORIOTUTKIMUKSET.....	19
3.1 Koejärjestelyt.....	19
3.2 Puristin-heijarikairaukset.....	21
3.3 CPT- ja painokairaukset.....	26
4 PARAMETRIEN MÄÄRITTÄMINEN.....	27
4.1 Kairan kärkivastuksen määrittäminen.....	27
4.1.1 Nettovastukseen vaikuttavia tekijöitä.....	27
4.1.2 Puristinkairausvaiheen nettokärkivastus q_n	30
4.1.3 Heijarikairausvaiheen nettolyöntiluku N_n	34
4.1.4 Kärkivastussuhteet.....	39
4.2 Kitkakulma φ	45
4.3 Suhteellinen tiiviys D_r	46

5	PAALUN KANTAVUUS KAIRAUSTULOSTEN PERUSTEELLA.....	48
5.1	Arviointi kärkivastuksen avulla.....	48
5.2	Arviointi kitkakulman avulla.....	52
6	KANTAVUUDEN MÄÄRITYS PAALUTUKSEN JÄLKEEN DYNAAMISELLA KOEKUORMITUKSELLA.....	53
7	KENTTÄTUTKIMUKSET.....	55
7.1	Koealueet.....	55
7.2	Tutkimustulokset.....	60
7.2.1	Kallvikinpuiston koealue.....	60
7.2.2	Paciuksen koealue.....	63
7.2.3	Myllypellon koealue.....	67
8	KANTAVUUSARVION TARKKUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	74
9	SUOSITUKSET.....	77
10	YHTEENVETO.....	79
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	82
LIITE 1:	Kallvikinpuiston koealue.....	85
LIITE 2:	Paciuksen koealue.....	86
LIITE 3:	Myllypellon koealue.....	87

MERKINNÄT

A_c	puristin-heijarikairan kärjen poikkileikkauksen pinta-ala, $A_c = 0,0016 \text{ m}^2$
A_p	paalun poikkipinta-ala, m^2
CPT	Cone Penetration Test, CPT-kairaus sähköisellä kärjellä
D	paalun kärjen läpimitta, m
DPA	Dynamic Probing type A, ruotsalainen heijarikairaus tyyppi A
D_r	suhteellinen tiiviys, %
F	varmuusluku; voima, kN
F_k	kokonaispuristusvoima (= puristusvoima + tankojen paino), kN
F_n	puristin-heijarikairan nettokärkivoima puristinvaiheessa, kN
F_s	puristin-heijarikairan puristinvaiheessa tangon vaippavastuksesta aiheutuva puristusvoiman lisäys, kN
J_c	vaimennuskerroin
L	iskuaallon mittauskohdan ja paalun kärjen välinen etäisyys
M	paalun massa, kg
M_k	kärkitangon ja kärkikappaleen välisestä kitkasta aiheutuva vääntömomentin lisäys, Nm
M_n	nettovääntömomentti, Nm
M_r	kokonaisvääntömomentti, Nm
M_l	laitekitkasta aiheutuva vääntömomentin lisäys, Nm
MWD	Measurement While Drilling (porakonekairaus)
N	kokonaislyöntiluku, lyöntiä/0,2 m
N_n	puristin-heijarikairan nettolyöntiluku heijarikairausvaiheessa, lyöntiä/0,2 m
N_s	puristin-heijarikairan heijarivaiheessa tankokitkasta aiheutuva lyöntiluvun lisäys, lyöntiä/0,2 m
Q	paalun kokonaisvastus murtotilassa, MN
Q_k	paalun kärkivastus murtotilassa, MN
Q_s	paalun vaippavastus murtotilassa, MN
Q_{si}	vaippavastus kerroksessa i, MN
R_s	paalun staattinen murtokuorma, MN

R_t	paalun kokonaislyöntivastus, MN
SIPT	Static Impact Penetration Test. Kairausmenetelmä, jossa puristin-heijarikairan kärkivastus heijarikairausvaiheessa määritetään iskuaaltomittauksella
c	iskuaallon nopeus paalussa, m/s
f_s	puristin-heijarikairan kärkikappaleen vaipan tai CPT-kairan vaippahylsyn vaippavastus, kPa
k_h	heijarikairausvaiheen tankovastuksen kerroin, lyöntiä/0,2 Nm ²
k_n	heijarikairausvaiheen tankovastuksen määrittämisessä käytetty kerroin, lyöntiä/0,2 Nm ²
k_p	vakio, $k_p = 0,039, 1/m^3$
q_c	maakerroksen CPT-kärkivastus tai puristin-heijarikairalla määritetty vastaava kärkivastus
q_{c1}	kairan minimikärkivastus 0,7-4D:n matkalla paalun kärjen alapuolella, MPa
q_{c2}	keskimääräinen kairan kärkivastus 8D:n matkalla paalun kärjen yläpuolella minimipolkuperiaatteen mukaisesti, MPa
q_{ci}	kairan kärkivastus q_c kerroksessa i , MPa
q_n	puristin-heijarikairan puristinvaiheen nettokärkivastus, MPa
q_p	puristin-heijarikairan puristinvaiheen kokonaiskairausvastus, MPa
q_{si}	paalun vaippavastus kerroksessa i , MPa
q_{SIPT}	SIPT-menetelmällä määritetty kärkivastus
q_{smax}	paalun maksimivaippavastus riippuen maa- ja paalutyypistä ja kärkivastuksesta q_c , 15...200 kPa
r	kairatangon säde, $r = 0,016 \text{ m}^2$
s_i	paalun ympärysmitta, m
t_1	maksimivoiman/-nopeuden ajankohta, ms
t_2	$= t_1 + 2L/c$, ms
v	paalun partikkelinopeus, m/s
z	paalun impedanssi, kNs/m

θ	kairan kärkikulman puolikas, °
Δl_i	paalun pituus kerroksessa i, m
α	maa- ja paalutyypistä sekä CPT-kärkivastuksesta riipuva korjauskerroin, 30...200
φ'	tehokas kitkakulma, °
μ	kitkakerroin
μ_k	vakio, $\mu_k = 0,1$, Nm/kN
μ_l	vakio, $\mu_l = 1$, Nm/kN
σ'_{vo}	tehokas pystysuora jännitys, kPa

1 JOHDANTO

Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla on kehitetty puristin-heijarikairaa 1970-luvulta lähtien. Kairauslaitteiston mittaustarkkuuden parantuessa voidaan kairaustietoja soveltaa entistä monipuolisemmin. Valmiita tulkintamalleja on olemassa sekä puristinvaihetta lähinnä vastaavalle CPT-kairaukselle (Cone Penetration Test) että heijarikairaukselle, joka paljolti vastaa puristin-heijarikairauksen heijarikairausvaihetta. Erot kairojen rakenteessa ja kairauksen suorituksessa ovat kuitenkin niin merkittäviä, että suoraa rinnastusta ei ole voitu tehdä. CPT- ja heijarikairaustietojen käsittelyyn kehitettyjen mallien toimivuus on aikaisemmin testattu käytännössä menetelmäkohtaisesti.

Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla -projektin tarkoituksena oli kehittää puristin-heijarikairauksen tulkintaa siten, että se soveltuu tuki- ja kitkapaalun geoteknisen kantavuuden arvioimiseen. Kairauksien soveltuvuutta kantavuuden arviointiin tutkittiin CPT-kairaukselle kehitetyillä laskentamenetelmillä. Vertailuarvoina käytettiin iskuaaltomittauksiin perustuvilla paalujen dynaamisilla koekuormituksilla saatuja murtokuorman arvoja. Iskuaaltomittausten perusteella määritetään yleensä myös paalujen loppulyöntiehdot. Iskuaaltomittaus antaa luotettavan arvion paalun ehjyydestä ja staattisen murtokuorman suuruudesta tietyllä syvyydellä. Signal-matching-analyysillä voidaan tarkentaa iskuaaltomittauksia. Samalla saadaan selville paalun kärki- ja vaippavastuksen osuus kokonaisvastuksesta sekä vaippavastuksen jakauma.

Kairauksiin perustuvan kantavuusarvion etuja ovat jatkuvat kärki- ja vaippavastuskuvaajat kantavassa maakerroksessa ja erityisesti murtokuorman kehitys syvyyden funktiona. Tulokset ovat käytettävissä suunnittelussa jo ennen iskuaaltomittauksia. Niiden perusteella määritetään paalutuksen tavoitetaso tai ne tunkeutumissyvyydet, joissa tehdään varsinaiset kantavuusmittaukset dynaamisilla koekuormituksilla. Tästä on apua myös perustuksen suunnittelussa vertailtaessa eri paalutyypin- ja perustamistapavaihtoehtoja. Paalutyypistä riippuen jopa yli kuukauden mittaisen toimitusaikojen aiheuttamaa paalutuksen viivästymistä on mahdollista pienentää tilaamalla paalut jo ennen iskuaaltomittauksia, mikäli paalujen tavoitetasot voidaan kairauksen perusteella määrittää riittävällä tarkkuudella etukäteen.

Ongelmana paalun kantavuuden arvioinnissa on puristin-heijarikairauksen yhteydessä käytettävän arviointimenetelmän puute. Kairauksen osalta ongelmana on tangon vaippavastuksen eli ns. tankovastuksen vaikutus kairautuloksiin. Tankovastuksen suuruus on tiedettävä, että kokonaiskairausvastuksesta voidaan määrittää kärkikappaleen tunkeutumisvastus, ns. nettoarvo. Tämän tutkimuksen kannalta olennaisinta on nettokärkivastuksen q_n ja nettolyöntiluvun N_n selvittäminen ja toisaalta näitä arvoja vastaavien, varsinaisessa kantavuuslaskennassa käytettävien q_c -arvojen määrittäminen. Nettoarvojen avulla saadaan selville heikosti kantavat kerrokset, joilla voi olla suurikin vaikutus paalun kantavuuteen. Nettoarvojen määrittäminen vaatii aikaisempaa parempaa tarkkuutta kairauskaluston mittaus- ja rekisteröintilaitteistolta ja erityistä huolellisuutta kairaajilta.

Tutkimuksen päätavoite on kehittää menetelmä, jolla paalun kantavuus voidaan määrittää puristin-heijarikairautulosten perusteella. Kairauslaitteiston keräämää tietoa on tähän mennessä hyödynnetty tehokkaasti tietojenkäsittelyohjelmilla, ja tässä tutkimuksessa tavoitteena on edelleen monipuolistaa ja tarkentaa laskentamenetelmiä. Menetelmien kehittäminen tapahtuu seuraavien osatavoitteiden kautta:

- kairauskoneiden mittalaitteiden kalibrointi erityisesti vääntömomentin mittauksen osalta sekä tarkoitukseen soveltuvan kalibrointilaitteen kehittäminen,
- vääntömomentin mittaukseen perustuvan tankovastuksen laskentamallin luominen nettokärkivastuksen määrittämiseksi,
- puristin- ja heijarikairausvaiheen nettovastuksien ja CPT-kärkivastuksen välisen vuorosuhteen selvittäminen laboratorio-olosuhteissa kitkamaassa,
- paalun kantavuuden määrittämiseen soveltuvan laskentamallin valinta lähinnä kirjallisuuden perusteella,
- kairauksen nettokärkivastuksen ja paalun kantavuuden laskentamallien toimivuuden testaus sekä helpoissa että vaativissa maaperäolosuhteissa sekä
- suosituksen laatiminen puristin-heijarikairautuloksiin perustuvaa paalun kantavuuden arviointia varten.

2 PURISTIN-HEIJARIKAIKAUS

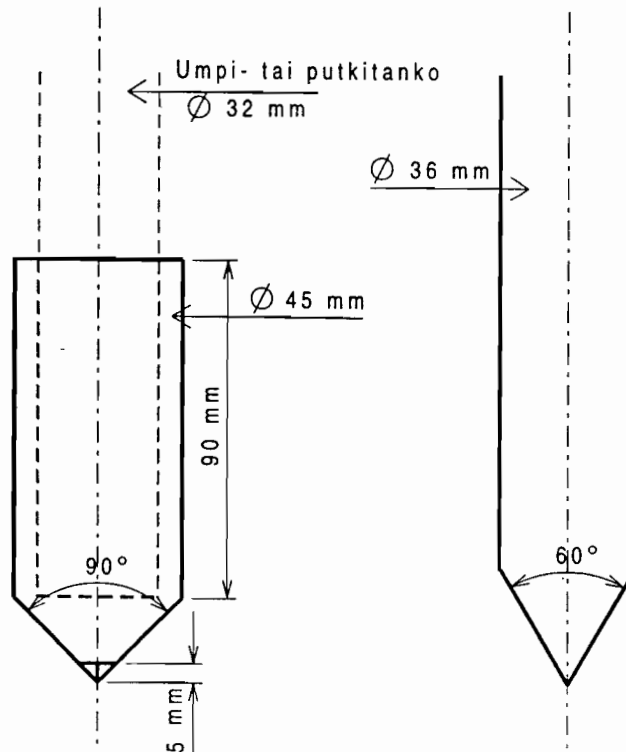
2.1 Laitteisto

Tässä työssä paalun kantavuuden arviointiin käytetty laite on Suomessa kehitetty puristin-heijarikaira. Kun puristin-heijarikairan kehitystyö alkoi 1970-luvun lopussa Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla, ajatus erityyppisten kairausmenetelmien yhdistämisestä ei ollut uusi: samansuuntaisia ns. totaalikairahankkeita on ollut Norjassa jo 1960-luvulta (kiertopuristinkairausmenetelmä) ja Ruotsissa 1970-luvulta lähtien. Kehitystyön alkuvaiheessa geoteknisellä osastolla käytettiin samassa kairauspisteessä kahta kairauslaitetta hyödyntäen puristinkairan herkkyyttä pehmeissä kerroksissa ja tiiviimmissä kerroksissa vaihdettiin tilalle tarpeen mukaan vapaapudotusheijarikaira. (Melanders 1989)

Laitteiston ja maasto-ATK:n kehittyminen mahdollistivat nykyisen puristin-heijarikairausmenetelmän käyttöönoton Helsingin kaupungilla vuonna 1988. Myöhemmin menetelmä on vähitellen levinnyt myös muiden laitosten ja yritysten käyttöön. Puristin-heijarikairauksesta ei ole toistaiseksi virallista Suomen geoteknillisen yhdistyksen kairaussuositusta, mutta menetelmää käytetään Helsingin kaupungin suosituksen mukaisesti (Melanders 1989).

Suomen geoteknillisen yhdistyksen suosituksen mukaan vapaapudotusheijarikairauksessa heijarin massa on 63,5 kg ja pudotuskorkeus 0,5 m. Kairauksessa käytetään $\varnothing$ 45 mm irtokärkikappaletta ja $\varnothing$ 32 mm tankokalustoa. Tangot ovat yhden metrin mittaisia heijarikairan tankoja. (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1980) Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla kehitetty puristin-heijarikairalaitteisto on periaatteessa Suomen geoteknillisen yhdistyksen suosituksen mukainen vapaapudotusheijarikairauslaitteisto, joka on lisäksi varustettu puristinkairausmahdollisuudella ja pyörityslaitteella. Edellisten lisäksi eroa CPT-kairaamiseen on kärjen rakenteessa ja mitoissa (kuva 2.1).

Lähtökohtana puristin-heijarikairauksen kehittämiseksi ovat olleet CPT-kairaus (Cone Penetration Test) ja vapaapudotusheijarikairaus. Näitä kairausmenetelmiä on vertailtu taulukossa 2.1. CPT:llä saadaan hienorakeisesta maaperästä tarkkaa ja monipuolista tietoa, mutta karkearakeisten maalajien tutkimiseen se soveltuu huonosti.



Kuva 2.1. Puristin-heijarikairan kärki vasemmalla ja CPT-kairan kärki oikealla.

Sen käyttöä Suomessa rajoittavat kevyellä kairauskalustolla saavutettu heikko tunkeutuvuus. Toisaalta ankkuroinnin ja raskaamman kaluston käyttökelpoisuutta hankaloittavat pehmeät pintakerrokset ja vaihteleva maasto. Heijarikairauksen etuna on laitteiston keveys ja kairan hyvä tunkeutuvuus kitkamaassa, mikä mahdollistaa tukipaalujen pituuden arvioimisen. Halkaisijaltaan tankoja suurempien kärkien käyttö pienentää tankojen ja maan välistä vaippakitkaa olennaisesti. Kertakäyttöisen kärkikappaleen etuna on tankojen nostotyön helpottuminen, koska kärki irtoa yleensä tankojen nostovaiheessa ja jää kairanreikään. Samalla vältetään kärjen kulumisesta aiheutuva virhe kairausvastuksen määrittämisessä.

Uusin geoteknisellä osastolla käytössä oleva kairauskonetyyppi on Geomachine Oy:n valmistama GM 4000-4 (Kuva 2.2). Se on lähes 7 tonnin painoinen monitoimivaunu, joka telavetoisena liikkuu hyvin pehmeässäkin maastossa. GM-koneen kairamastossa on puristin-heijarikairauslaitteiston lisäksi porakone kallionpinnan varmistusta ja MWD-porakonekairausta (Measuring While Drilling) varten.

Taulukko 2.1. Puristin-heijarikairauksen vertailu ISSMFE:n suosituksen mukaiseen CPT-kairaukseen (Meigh 1987) ja Suomen geoteknillisen yhdistyksen suosituksen (1980) mukaiseen vapaapudotusheijarikairaukseen.

OMINAISUUS	PURISTIN- HEIJARI-KAIRAUS	CPT-KAI- RAUS	HEIJARI- KAIRAUS
<u>KALUSTO</u>			
Kärjen $\varnothing$ (mm)	45	36	45
Kärkikulma ($^{\circ}$)	90	60	90
Kärjen vaipan ala (mm ²)	12 700	15 000	12 700
Tankojen $\varnothing$ (mm)	32	36	32
Heijarin massa (kg)	63,5	-	63,5
Heijarin pudotuskorkeus (m)	0,5	-	0,5
Tunkeutumisnopeus (mm/s)	20	20	-
Iskutiheys (l/min)	25-45	-	25-45
Pyöritysnopeus (r/min)	12	-	-
<u>MITATTAVIEN SUUREI- DEN TULOSTUSVÄLI</u>			
Puristusvoima (mm)	40	20	-
Kärkivastus (mm)	-	20	-
Vaippavastus (mm)	-	20	-
Vääntömomentti (mm)	200	-	-
Lyöntivastus (mm)	200	-	200

Tässä tutkimuksessa kairaukset tehtiin pääasiassa GM-kalustolla. Toinen tutkimuksessa käytetty alusta oli nelivetoinen maataloustraktori, jonka etunostolaitteeseen on kiinnitetty puristin-heijarikairauslaitteiston vanhempi malli, Insinööritoimisto Geotuote Oy:n valmista- ma ns. HK-sondi (kuva 2.3).



Kuva 2.2. Puristin-heijarikairausta GM 4000-4 -kairauskoneella Myllypellon koealueella.



Kuva 2.3. HK-sondi koealtaalla.

Laboratoriokairauksia tehtiin myös HK-sondilla, koska etunostolaitteeseen kiinnitetyllä kairamastolla oli parempi ulottuvuus koealtaan eri osiin ja toisaalta sisätiloissa traktoria oli helpompi siirrellä kuin tela-alustaa.

Kairaustulokset rekisteröidään automaattisesti Geoprinter-rekisteröintilaitteella. Se on ruotsalaisen Environment Mechanics AB:n valmistama tallennin- ja piirturiyksikkö, jonka muistiin mahtuu yli 600 kairausmetriä puristin-heijarikairaus tietoja. Tiedot siirretään Geoprinterin levyaseman kautta 3 ½ “ levykkeelle ja edelleen tietokoneelle jatkokäsittelyä varten. Samanaikaisesti kairauksen edetessä rekisteröintilaitteen piirturi tulostaa kairausdiagrammia, jonka perusteella kairaaaja voi heti havaita häiriöt kairauksessa. Automaattisen rekisteröinnin etuja manuaaliseen verrattuna on havaintojen suurempi tarkkuus sekä tiheämpi havainnointi, jolloin diagrammin epäjatkuvuus ei häiritse tulkintaa. Kairauksen aikana tallennetaan kairausvyvyys sekä puristusvoiman, lyöntiluvun ja vääntömomentin arvot. Kairausvyvyden mittauksen perusteella heijari-iskujen lukumäärät ja puristusvoima tallennetaan 40 mm välein ja vääntömomentti 200 mm välein. Heijarin lyöntiluku tulostetaan Suomen geoteknillisen yhdistyksen Pohjatutkimusmerkintöjen (1993) mukaisesti (lyöntiä/0,2 m). Vääntömomentti tulostetaan Suomen geoteknillisen yhdistyksen suosituksesta poiketen 0,2 metrin välein.

Puristusvoiman ja vääntömomentin määrittäminen tapahtuu HK-sondissa hydraulikan paineen perusteella mittaustulosten erottelukykyyn ollessa 214 N ja 3 Nm. GM 4000-4:ssa puristusvoima mitataan sähköisesti maston ja kelkan välistä venymäliuska-anturin avulla siten, että laitteistossa esim. hydraulisynterissä ja laakeroinnissa vaikuttavat kitkat eivät pääse vaikuttamaan mittaustulokseen. Venymäliuska-anturin toiminta perustuu pituuden muutoksesta aiheutuvaan sähköjohtavuuden muutokseen. Mittalaitteiston erottelukyky on puristusvoiman rekisteröinnissä 37,5 N ja vääntömomentin rekisteröinnissä 1 Nm. Puristusvoiman nolla-asetus heikentää mittaustarkkuutta erityisesti pienillä voimilla merkittävästi, koska se asetetaan yleensä välille 0 ... 0,3 kN. Tarkempaan nolla-asetukseen on vaikea päästä, koska lukuarvo vaelttaa noin $\pm 0,1$ kN asetetusta ajettaessa kairauskoneen tyhjää kelkkaa alaspäin. Syynä vaeltamiseen saattaa olla koneen värinä tai rekisteröinnin epätarkkuustekijät sekä hydrauliletkujen liikkuminen. Tällä on merkitystä pehmeissä savikerroksissa ja liejussa, joissa nettokärvivoiman F_n arvo voi olla jopa alle 0,3 kN.

2.2 Kairaus

Maailmalla on käytössä useita puristinkairausmenetelmiä, vaikka kairauksen standardisoimiseen on pyritty jo vuodesta 1957 (Broms & Flodin 1988). Puristinkairausvaihe eroaa standardiehdotuksen mukaisen puristinkairauksen suorituksesta tankojen pyörityksen sekä kärjen ja tallennettavien kairaustietojen osalta. Tankoja pyöritetään, koska kairautuloksia heikentää kairausmenetelmälle ominainen tankojen vaippakitka: pyöritys vähentää tangoston ja maan välistä vaippakitkaa, ja jäljelle jäävän kitkan osuutta kairausvastuksesta voidaan arvioida kairauksen aikana mitattavan pyöritysmomentin avulla.

Puristin-heijarikairaus tarjoaa joustavuutta kairautavan valintaan maaperäolosuhteiden vaihdellessa kairauspisteittäin ja maakerroksittain. Ennen kairauksen aloittamista on tarvittaessa routa ja kivinen täyte läpäistävä porakonekairauksella tai suojaputkella. Puristin-heijarikairaus aloitetaan puristinkairauksena, jolloin tankoja puristetaan ja pyöritetään samanaikaisesti vakionopeuksilla 1,2 m/min ja 12 r/min. Puristinkairausta jatketaan maksimipuristusvoimaan saakka. Käytännössä maksimipuristusvoima on GM 4000-4 -koneella 30 kN, vaikka hydraulikka mahdollistaisi 50 kN. Puristusosuuden päätyttyä siirrytään heijarikairaukseen, jolloin tankojen pyöriessä heijarin pudotustaajuus on 25-45 kertaa minuutissa. Takaisin puristinkairaukseen siirrytään, jos kokonaislyöntiluku N on 5 tai vähemmän yli 0,4 metrin matkalla. Puristin-heijarikairaus päätetään aina heijarikairaukseen. (Melandar 1989)

Puristin-heijarikairauksen aikana kairatankoa pyöritetään jatkuvasti tankokitkan pienentämiseksi ja tankojen suorana pitämiseksi. Tangon yläpäästä kairausvastusta mittaavana menetelmänä puristin-heijarikairautuloksille on ominaista tankovastuksen summautuminen syvemälle mentäessä. Tätä summautumista on vaikea arvioida kokonaisvastuksen perusteella, koska esimerkiksi kairareiän ja tangon välisen tilan täyttyminen voi tapahtua satunnaisesti ja vähitellen kairauksen edetessä ja koska tankovastus muodostuu eri maalajiolosuhteissa osittain eri tavoin. Kairausvastuksen lisäksi puristin-heijarikairauksessa rekisteröidään kairatangon pyörityksen vaatimaa vääntömomenttia. Vääntömomentin mittausta on tässä tutkimuksessa käytetty kairatangon vaippavastuksen määrittämiseen. Tällöin kokonaiskairausvastuksesta on laskettu kärkikappaleen vastuksen osuus.

3 LABORATORIOTUTKIMUKSET

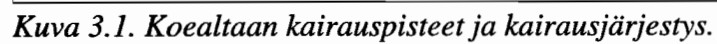
3.1 Koejärjestelyt

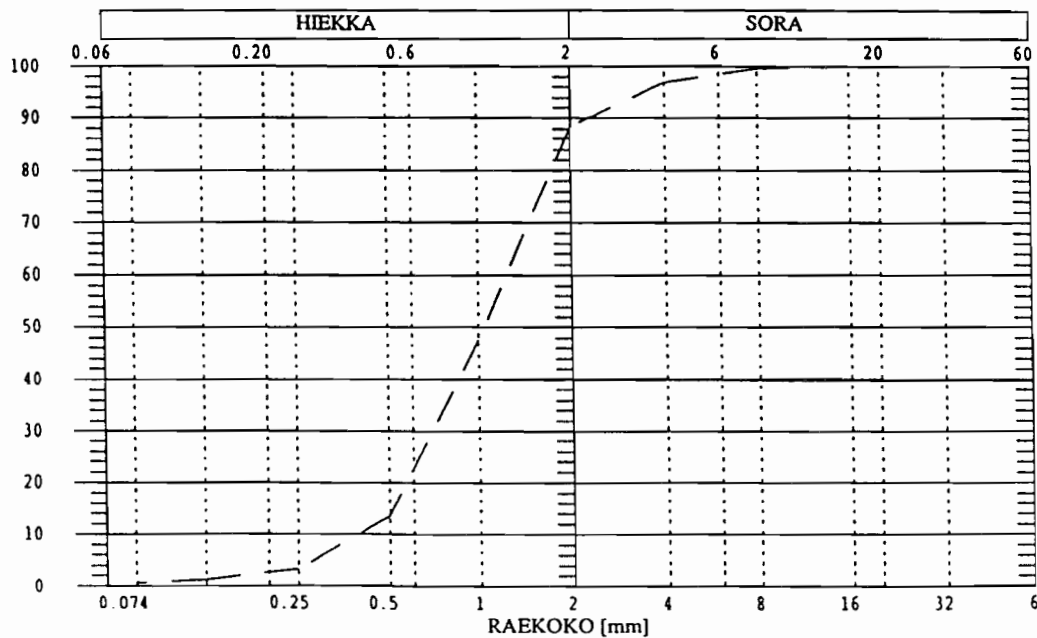
Laboratoriotutkimukset tehtiin Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion koealtaalla, jonka syvyys on 4,5 m. Altaan muut mitat ja kairauspisteverkko esitetään kuvassa 3.1. Täyttömateriaalina käytettiin Vehoniemen hiekkaa, jonka rakeisuuskäyrä on kuvassa 3.2. Laboratoriotutkimuksella selvitettiin kärkivastussuhteita vain karkearakeisessa maalajissa, koska tuki- ja kitkapaalun geotekninen kantavuus syntyy pääasiassa juuri kitkamaakerroksissa. Täyttömateriaalia valittaessa kiinnitettiin huomiota mm. raekoon maksimiarvoon, jotta karkeat rakeet eivät estäisi CPT-kairan käyttöä suuremmissa tiiviyksissä.

Hiekka tiivistettiin 100 kg:n tärylevyllä noin 0,2 metrin paksuisina kerroksina. Täyttötöiden aikana tiiviyttä tarkkailtiin Troxler-tiivysmittarilla. Troxler-kokeita tehtiin jokaisesta tiivistyskerroksesta koekuopan vastakkaisista päädyistä. Yhteensä Troxler-kokeita tehtiin 74 kappaletta. Vesivolymetrikokeita tehtiin vertailun vuoksi 10 kappaletta.

Täyttö rakennettiin siten, että lopputuloksena oli kolme päällekkäistä 1,5 m paksuista hiekkakerrosta. Kukin kerros rakennettiin tiiviydeltään erisuuruiseksi. Tiiviydet valittiin siten, että kaikissa kerroksissa päästiin sekä tunkeutumaan CPT-kairalla ja puristin-heijarikairalla puristamalla että saatiin tuloksia myös lyömällä. Tältä osin tiiviyksien valinta onnistui hyvin: löyhimmälle kerrokselle saatiin määritettyä heijarikairausvaiheen lyöntiluvut, ja tiiveimpäänkin kerrokseen saatiin tunkeutumaan CPT-kaira, kun kairauskone ankkuroitiin koehallin rakenteisiin. Proctor-tiiviyden tavoitearvona oli alimmassa kerroksessa 92 %, keskimmaisessä 89 % ja ylimmässä 86 %. Proctor-kokeen perusteella määritetty optimivesipitoisuus oli 14%.

Täyttöä tiivistettäessä huomattiin, että edes 92 % tiiviyssasteen saavuttaminen ei onnistunut tavanomaisella kostutuksella ja tärytyksellä: hiekka ei pystynyt sitomaan riittävästi vettä itseensä, vaan se valui kerroksen läpi pois. Tämän vuoksi alin kerros tehtiin pohjavesitäyttönä siten, että pohjaveden pintaa nostettiin samanaikaisesti täyttö- ja tiivistystyön edistyessä. Näin hiekan vesipitoisuus saatiin pysymään riittävän suurena tavoitellun tiiviyssasteen saavuttamiseksi.





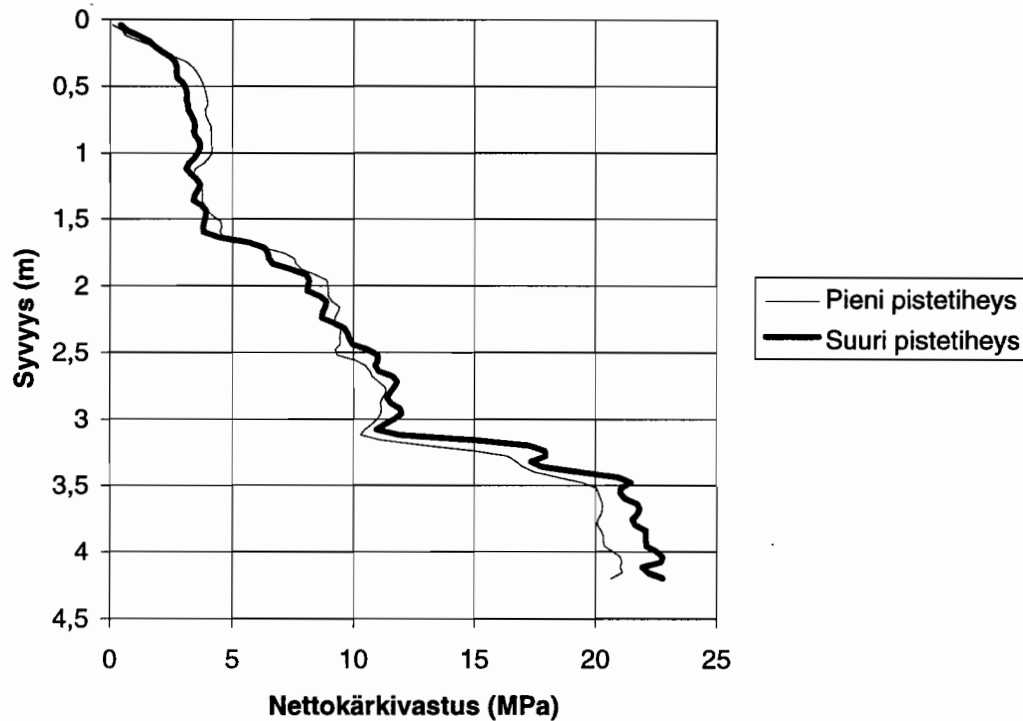
Kuva 3.2. Koetäyttömateriaalin rakeisuuskäyrä.

Lopullinen pohjavedenpinta CPT-kairauksen huokospainekäyrän perusteella on noin 3,15 metrin syvyydessä. Kairauspistetiheyden ja koekuopan seinämien vaikutusta koetäytön kairausvastukseen tutkittiin tekemällä muutamia kairauksia edellisten pisteiden lisäksi niiden väliin ja lähelle seinämiä. Kairausten aikana pistetiheyden kasvaessa havaittiin puristinheijarikairan puristinvaiheen kärkivastuksen arvojen pienenemistä syvyydellä 1,5-2,4 m ja suurenemista syvyydellä 2,4-4,2 m (kuva 3.3). Tämä huomioitiin kärkivastussuhteita määrittäessä siten, että vertailtavat kairauspiste-parit valittiin tiheydeltään vastaavista kairauspisteverkoista. Tuloksia saatiin 49 kairauspisteestä, joissa tehtiin puristin-heijari-, CPT- ja painokairauksia. Yhdessä pisteessä tehtiin heijarikairatangolle lyöntien aikana iskuaaltomittauksia. Mittausjärjestelyistä ja lyhyestä kairatangosta johtuen iskuaaltomittauksien tuloksia ei voida pitää riittävän luotettavina, joten niitä ei tässä työssä esitetä.

3.2 Puristin-heijarikairaukset

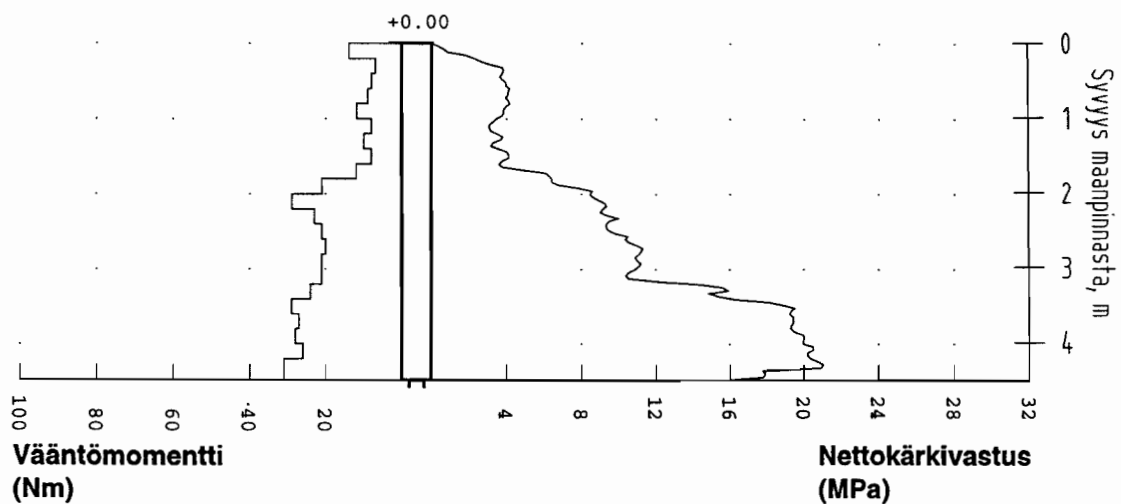
Puristin-heijarikairaukset tehtiin GM 4000-4 -monitoimikairauskoneella ja heijarikairaukset osittain vanhemmalla HK-sondilla sen paremmasta ulottuvuudesta johtuen. Käytössä olleen GM 4000-4 -koneen puristusvoiman mittaaminen on järjestetty venymäliuska-anturiin perustuen,

joten sen mittaustarkkuus on HK-sondin hydraulipaineen mittaukseen perustuvaa menetelmää tarkempi.

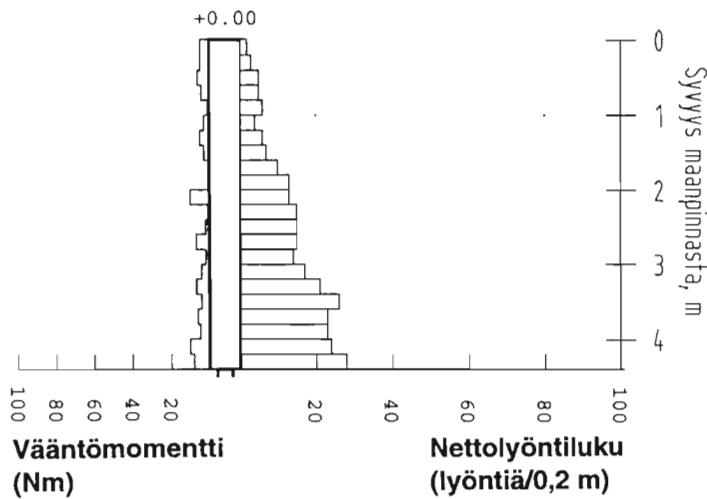


Kuva 3.3. Puristin-heijarikairan nettokärkivastuksen q_n riippuvuus koetäytön kairauspistetiheydestä.

Kairaukset tehtiin joko puristamalla tai lyömällä koko piste. Kuvassa 3.4 on tyypillinen koealtaalla saatu puristinvaiheen diagrammi ja kuvassa 3.5 vastaava heijarivaiheen tulostus.



Kuva 3.4. Puristinkairauksessa rekisteröity vääntömomentti ja kärkivastus.

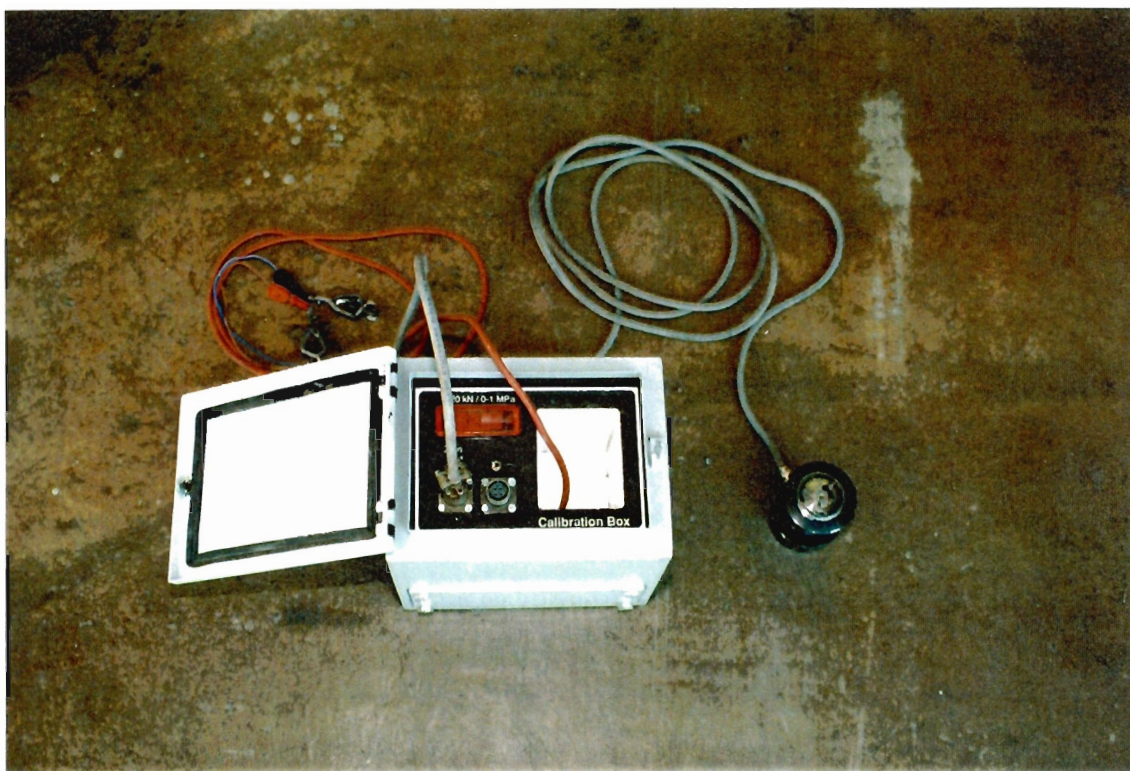


Kuva 3.5. Heijarikairauksessa rekisteröity vääntömomentti ja löyntiluku.

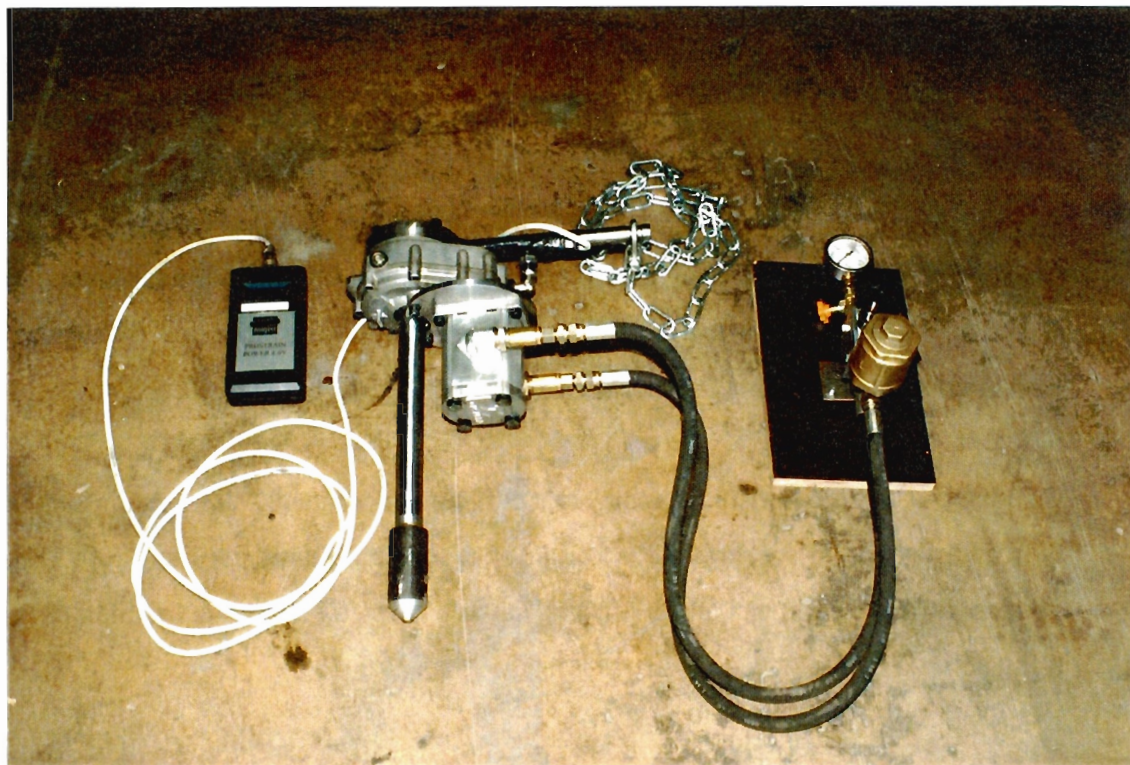
Puristamalla kairatuissa pisteissä käytettiin ainoastaan GM 4000-4 -koneita, mutta heijarikairaukseen käytettiin molempia koneita. Automaattisen vääntömomentin rekisteröinnin lisäksi mitattiin kairatangon kiertämiseen tarvittava vääntömomentti momenttiavaimella. Normaallilla puristin-heijarikairan irtokärjellä suoritetuissa kairauksissa momenttia ei esiintynyt, kun kairatankoa ei puristettu.

Tämän tutkimuksen yhteydessä kairauskoneiden puristusvoiman mittaus kalibrointiin kuvassa 3.6 esitetyllä CPT-kairan kalibrointilaitteella. Yhteistyössä Tampereen teknillisen korkeakoulun kanssa kehitettiin vääntömomenttimittauksen kalibrointia varten torsiometri (kuva 3.7). Laitteen avulla pyörivää kairatankoa jarrutetaan hydraulisella jarrulla ja jännitys-venymäanturilla mitattua jarruvoimaa verrataan koneen mittaamaan arvoon.

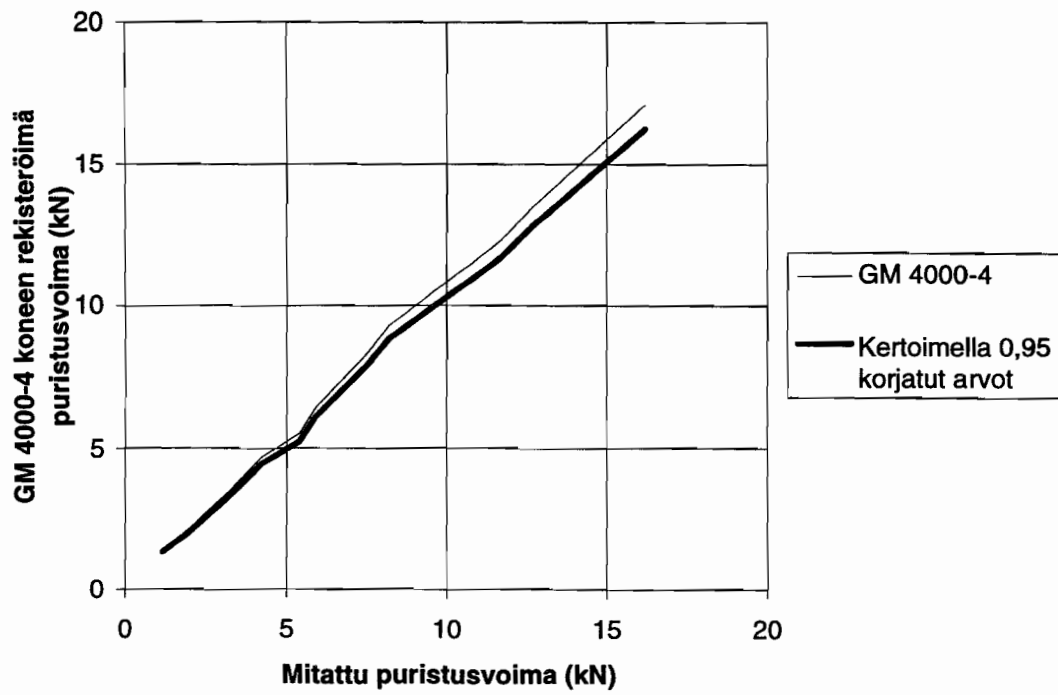
GM 4000-4 -koneen puristusvoiman ja vääntömomentin mittauksen kalibrointikäyrät ja tässä työssä käytetyllä korjauskertoimella korjatut kuvaajat on esitetty kuvissa 3.8 ja 3.9. Puristusvoiman korjauskertoimena on tässä työssä käytetty arvoa 0,95 ja vääntömomentin korjauskertoimena arvoa 1,6.



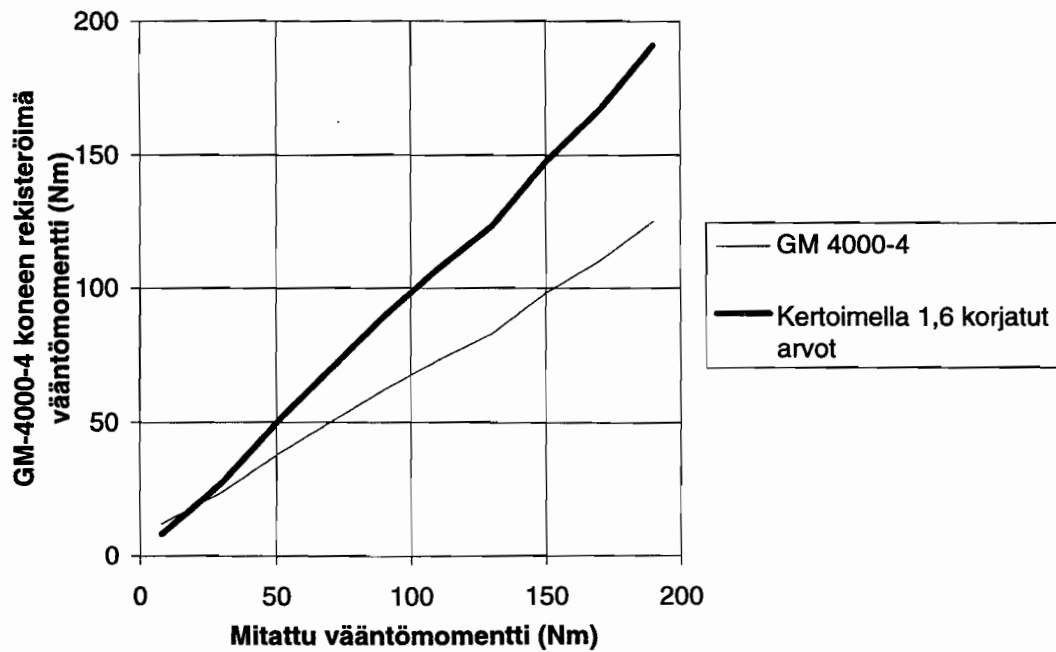
Kuva 3.6. Puristusvoiman kalibrointilaite.



Kuva 3.7. Vääntömomenttimittauksen kalibrointilaite. Vasemmalla digitaalinen näyttö, keskellä jarruysikkö ja oikealla jarruvoiman säätöventtiili.



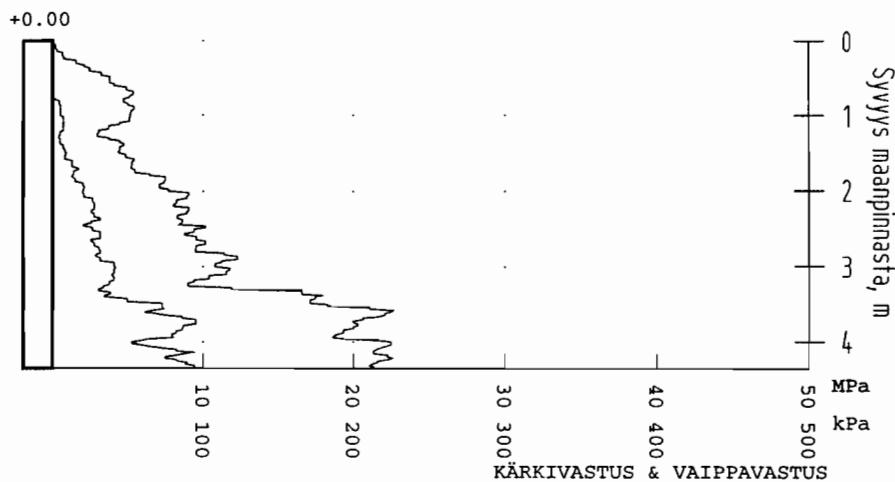
Kuva 3.8. GM 4000-4 -koneen puristusvoimamittauksen kalibrointikäyrä.



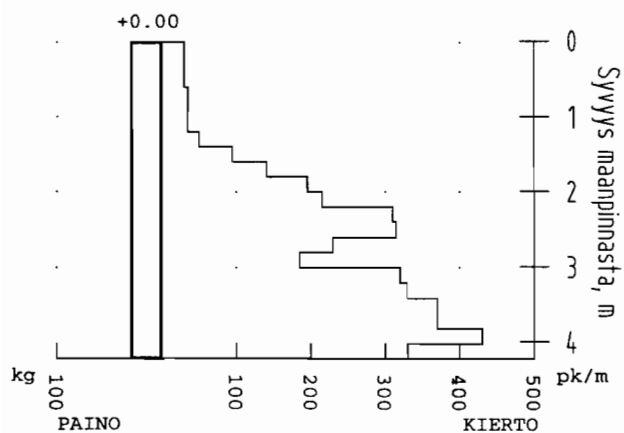
Kuva 3.9. GM 4000-4 -koneen vääntömomenttimittauksen kalibrointikäyrä.

3.3 CPT- ja painokairaukset

Koealtaassa suoritetuilla CPT-kairauksilla saatiin vertailuaineistoa täyttökerrosten kairausvastuksesta (kuva 3.10). Kairauksessa käytettiin sähköistä kolmekanavaista kärkeä, joka rekisteröi kärki- ja vaippavastusta sekä huokosvedenpainetta 20 mm välein. Kairauskoneena käytettiin GM 4000-4 -kairausyksikköä. Vertailun vuoksi tehtiin myös kaksi painokairausa, mutta näiden perusteella ei kairausvastusten vuorosuhteita muiden menetelmien kanssa määritetty (kuva 3.11).



Kuva 3.10. Tyypillinen CPT-kairauksen kärki- ja vaippavastuskuvaaja koealtaan hiekasta.



Kuva 3.11. Painokairausdiagrammi koealtaan hiekasta.

4 PARAMETRIEN MÄÄRITTÄMINEN

4.1 Kairan kärkivastuksen määrittäminen

4.1.1 Nettovastukseen vaikuttavia tekijöitä

Tässä työssä paalun kantavuus määritetään menetelmällä, joka perustuu CPT-kairauksella saatuun kärkivastukseen q_c . Puristin-heijarikairan ja CPT:n kärkien kokoeroista johtuen on tärkeää määrittää kärkivastusten suhde. Maaperän luonnollisen epähomogeenisuuden vuoksi tämä suhde määritettiin laboratorio-olosuhteissa.

Puristinheijarikairan kärjen kokonaisvastuksella q_p tai N tarkoitetaan kärkikappaleen kärkikartion ja sylinterimäisen vaippaosan yhteenlaskettua kairausvastusta. Sen määrittäminen tapahtuu periaatteessa vähentämällä tangon tunkemiseen tarvittavasta kokonaispuristusvoimasta F_k tai kokonaislyöntiluvusta N tangon pyörytykseen tarvittavan vääntömomentin avulla laskettu tankovastus F_s tai tankovastuksen lyöntiluku N_s . Menetelmää on aiemmin sovellettu SGI:n puristinkairaamiseen, jonka tankojen pyörytykseen tarvittavan momentin perusteella kone vähentää tankojen vaippavastuksen automaattisesti (Broms 1975). Puristin-heijarikairalla määritetty kokonaispuristusvoima F_k sisältää tangon yläpäässä vaikuttavan tunkemisvoiman lisäksi tankojen painosta aiheutuvan voiman, joka lisätään automaattisesti tangon yläpäästä mitattuun puristusvoimaan.

Tässä työssä esitetyt kertoimet ja vakiot on määritetty GM 4000-4 -kairauskoneella ja osa niistä on todennäköisesti laitekohtaisia. Sovellettaessa näitä tuloksia muihin koneisiin on normaalin kalibroinnin lisäksi tarkistettava myös puristusvoiman F vaikutus vääntömomentin M rekisteröintiin ja vääntömomentin vaikutus heijarikairauksen lyöntilukuun N .

Tankovastus määritetään puristusvaiheessa olettaen tangon ja maa-aineksen välinen kitka yhtäsuuriksi sekä akselin että tangentin suunnassa. Olettamus pitää paikkansa riittävällä tarkkuudella etenkin, kun kyse on kärjen häiritsemästä maa-aineksesta ja kun tangon pinnan nopeudet aksiaali- ja tangentiaalisuunnassa ovat yhtäsuuret: pyöritysnopeutta 12 r/min vastaava kehänopeus on sama kuin tangon puristusnopeus, noin 1,2 m/min. Heijarivaiheessa

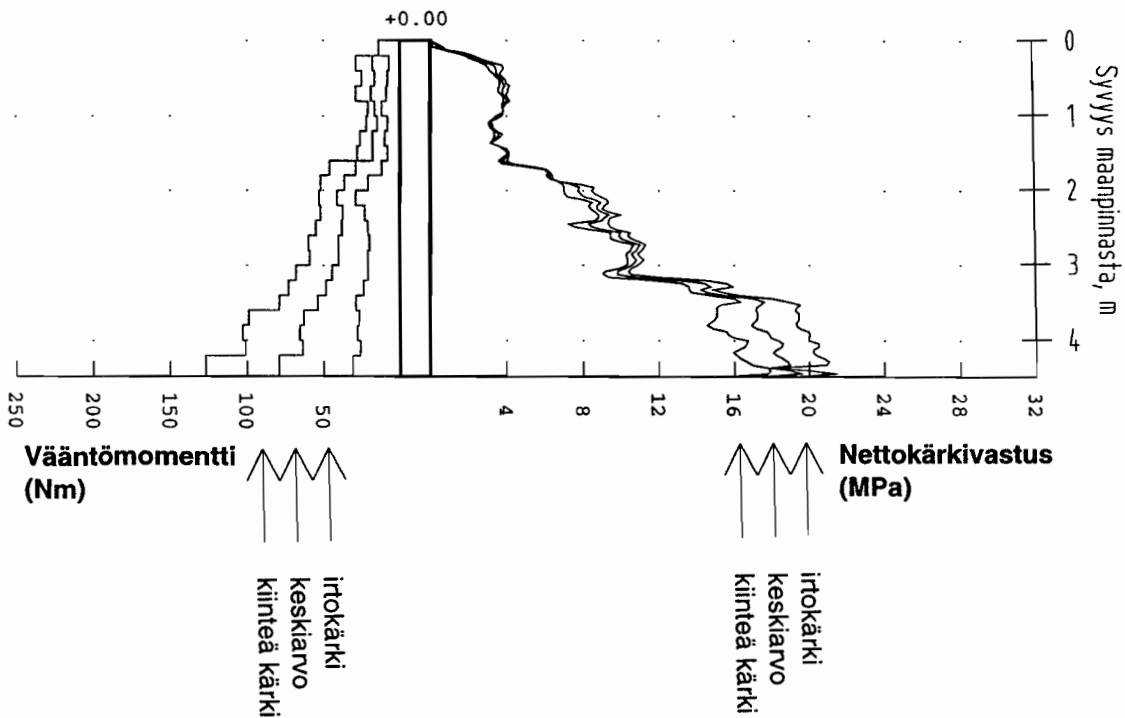
tanko liikkuu sykäyksittäin, jolloin aksiaalikitka voi olla momenttimittauksella määritettyä tangentiaalikitkaa suurempi (Bergdahl & Möller 1981).

Kairatankojen pyöritys vähentää kairatangoston poikkeamista alkuperäisestä suunnastaan ja vähentää tankokitkaa. Tangoston suorudella on merkitystä erityisesti heijarivaiheessa, jolloin vääntömomentin perusteella on mahdotonta arvioida tangon käyryydestä aiheutuvaa tankokitkan osuutta. Tangoston käyristymistä voi epäillä, jos kairakärki on kairauksen aikana kohdannut kiven ja ohittanut sen, jolloin on voinut tapahtua kairatangon suunnanmuutos. Tällaiseen suunnanmuutokseen viittaa pysyvä lyöntiluvun ja momentin lisääntyminen kivihavainnon jälkeen. Nettokärkivastuksen lyöntilukua ei tällaisessa tilanteessa voida määrittää tarkasti, koska vääntömomentin mittaukseen perustuva laskenta yliarvioi kärkivastuksen. Tämän vuoksi kairaajan kivihavainnot ovat tärkeitä paalun kantavuuden ja paalutettavuuden arvioinnin kannalta. Puristinvaiheessa käyristymisen aiheuttama tankokitkan osuus sen sijaan tulee huomioitua, kun tankovastus lasketaan tässä työssä esitetyllä tavalla.

Koetäytössä tutkittiin kärkitankoon hitsatun kärjen avulla, pyöriikö kairauksessa käytetty irtokärki tankojen mukana. Kiinteää kärkeä käytettäessä momentin arvot ovat suuremmat ja puristusvoiman arvot pienemmät kuin irtokärjellä kairattaessa. Tämä viittaa siihen, että irtokärki ei ainakaan kitkamaassa pyöri tankojen mukana (kuva 4.1).

Tästä havainnosta seuraa kaksi kärkivastuksen määrittämisessä huomioitavaa seikkaa:

1. Tankojen pyöritys ei vähennä kärjen vaippakitkaa muuttamalla lepokitkaa liikekitkaksi, millä on merkitystä erityisesti heijarivaiheessa, jossa lepokitka on voitettava joka iskulla. Puristinvaiheessa tällä on vaikutusta vain tankojen vaihdon yhteydessä, kun kärki pysähtyy. CPT-kairauksen vaippavastuksen (kuva 3.10) perusteella arvioitu puristin-heijarikairakärjen vaippavastuksen osuus oli laboratoriotutkimuksessa noin 0 - 4 % lisääntyen kärkivastuksen kasvaessa (kuva 4.2). Vaippavastuksen suuruus vaipan pinta-alaa kohti on molemmissa kairakärjissä oletettu yhtäsuureksi.
2. Vääntömomentin avulla määritetty tankovastus tulee kokonaan tangon vaipalta, joten kärjen vaippavastuksen määrittäminen vääntömomentin perusteella ei ole mahdollista.

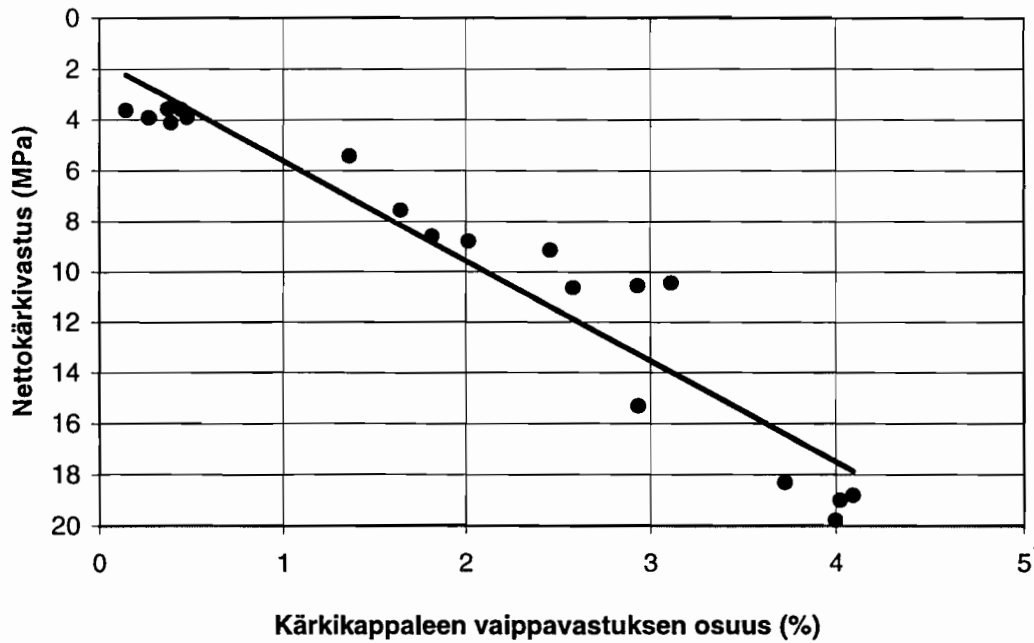


Kuva 4.1. Kiinteällä kärjellä ja irtokärjellä kairattaessa havaitut momentin ja nettokärkivastuksen q_n arvot sekä kairausten keskiarvot.

Vaikka kärjen halkaisija onkin tangon halkaisijaa suurempi, tankokitkaa muodostuu ainakin kahdella tavalla:

- Kairareiän epäsuoruuden aiheuttama maa-aineksen hankaus tankoja vasten esimerkiksi kairatangon kiertäessä kiviä. Hankausta lisää puristuksen ja heijauksen aiheuttama tangon nurjahdus kairareiän seinämiä vasten.
- Kairareiän läpimitan pieneneminen ympäröivän maa-aineksen paikallisen sortumisen tai painumisen seurauksena.

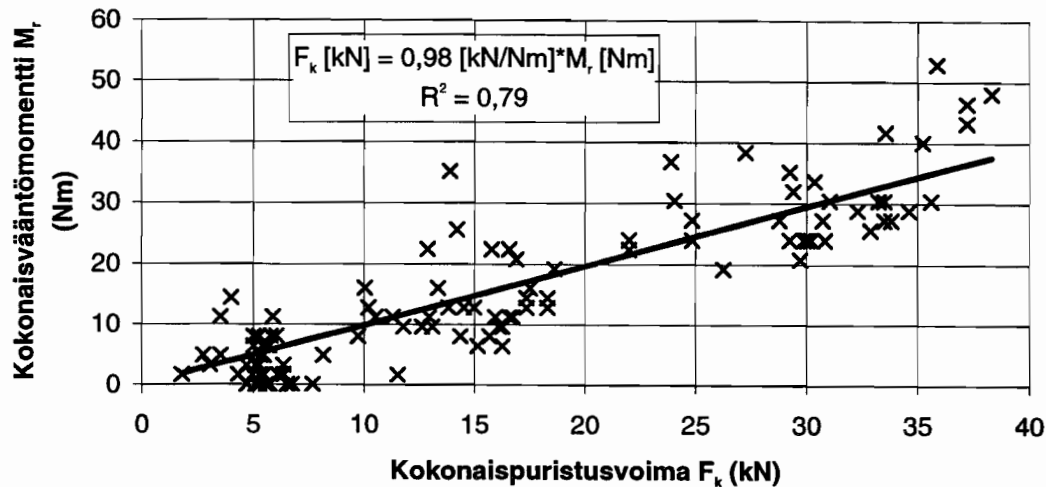
Käytännössä laskennallisena momenttivartena käytetään siis tankojen sädettä $r = 0,016$ m aikaisemmin käytetyn kärjen säteen $r = 0,022$ m sijasta (Melander 1989). Säteen kasvaminen tankoon takertuvan saviaineksen johdosta tuskin tulee kysymykseen, koska se vaatisi pyörivän tangon pinnan ja häiriintyneen saven välille suuremman leikkauslujuuden kuin ympäröivässä savessa on itsessään.



Kuva 4.2. CPT-vaippavastuksen perusteella arvioitu puristin-heijarikairakärjen vaippavastuksen osuus nettokärkivastuksesta.

4.1.2 Puristinkairausvaiheen nettokärkivastus q_n

Käytännössä kärkivastuksen määrittäminen kairautietojen perusteella vaatii puristusvoiman ja vääntömomentin mittauksen lisäksi myös laskentaa. Käytössä oleva kairauskalusto mittaa vääntömomenttia kiertomoottorin hydraulikan paineen avulla. Momentin arvoon tulee siten mukaan moottorin sisäisen kitkan ja voimansiirron vaikutus, mutta niiden vaikutus voidaan ottaa huomioon jo rekisteröintivaiheessa kolmen parametrin avulla vääntömomenttimittauksen kalibroinnin perustella. Muita vääntömomenttia lisääviä kitkoja sen sijaan on arvioitava laskennallisesti ja niiden osuus on vähennettävä mittatuista momentin arvoista. Näitä ovat puristinvaiheen aksiaalisesta kuormituksesta aiheutuvat voimansiirron painelaakeroinnin kitka sekä kärkikappaleen ja kärkitangon välinen kitka. Aksiaalikuorman vaikutus rekisteröityyn vääntömomentin arvoon voidaan huomioda laskennallisesti, koska vääntömomentti on mittausten mukaan puristusvoimasta lineaarisesti riippuva (kuva 4.3). Todellisuudessa kairatangon vääntömomenttia ei näissä pisteissä ollut, kun sitä mitattiin ilman puristusta momenttiavaimella. Jonkin verran hajontaa ylöspäin on saattanut aiheuttaa kairatangon nurjahtaminen kairareian seinämiä vasten tankoja puristettaessa.



Kuva 4.3. Puristin-heijarikairan laitekitkasta ja kärjen sisäisestä kitkasta aiheutuvan vääntömomentin riippuvuus puristusvoimasta GM 4000-4 -kairauskoneella, kun maa-aineksen aiheuttamaa tankokitkaa ei ole.

Puristin-heijarikairaustulosten käsittelyn yhteydessä määritetään tavallisesti kokonaispuristusvoiman avulla kokonaiskairausvastus q_p (Melander 1989), joka on tankojen ja kärjen tunkeamiseen tarvittava kokonaisvoima kärjen poikkileikkauspinta-alaa kohti

$$q_p = \frac{F_k}{1000A_c} \quad (4.1)$$

jossa q_p on kokonaiskairausvastus (MPa)
 F_k kokonaispuristusvoima (kN)
 A_c kairakärjen poikkileikkauksen pinta-ala (m²)

Laitekitkasta aiheutuvan momentin suuruus kuvan 4.3 perusteella on

$$M_l = \mu_l F \quad (4.2)$$

jossa M_l on laitekitkasta aiheutuva vääntömomentin lisäys (Nm)
 μ_l laitekohtainen vakio (GM 4000-4 -koneella $\mu_l = 1$ Nm/kN)

F puristusvoima (kN)

Rekisteröidyn vääntömomentin avulla puristusvaiheen maa-aineksesta aiheutuva nettovääntömomentti saadaan kaavalla

$$M_n = M_r - M_l - M_k \quad (4.3)$$

jossa M_n on nettovääntömomentti (Nm)
 M_r kokonaisvääntömomentin arvo (Nm)
 M_l laitekitkasta aiheutuva vääntömomentin lisäys (Nm)
 M_k kärkitangon ja kärkikappaleen välisestä kitkasta aiheutuva vääntömomentin lisäys (Nm)

Tässä tutkimuksessa on pyörivän kairatangon tangentin ja akselin suuntainen kitka oletettu yhtäsuuriksi. Tämän oletuksen perusteella saadaan tangon vaippakitkasta aiheutuva voima vääntömomentin määritelmään ($M = Fr$) perustuen kaavalla

$$F_s = \frac{M_n}{1000r} \quad (4.4)$$

jossa F_s on tangon vaippakitkasta aiheutuva voima (kN)
 M_n nettovääntömomentti (Nm)
 r kairatangon säde ($r = 0,016\text{m}$)

Puristinkairausvaiheen nettokärkivoima F_n saadaan F_s :n avulla kokonaispuristusvoimasta kaavalla

$$F_n = F_k - F_s \quad (4.5)$$

jossa F_n on nettokärkivoima (kN)

F_k	kokonaispuristusvoima (kN)
F_s	tangon vaippakitkasta aiheutuva voima (kN)

Nettokärkivoiman perusteella voidaan arvioida kärkitangon ja kärkikappaleen välisestä kitkasta aiheutuvaa vääntömomentin lisäystä puristinvaiheessa. Lisäyksen suuruutta arvioitiin liittämällä kaksi kärkitankoa vastakkain kierretapin välityksellä. Yhdistelmän molempiin päihin asennettiin kärkikappaleet, jonka jälkeen sitä puristettiin kärkikappaleiden välityksellä portaittain kasvavalla puristusvoimalla. Jokaista arvoa vastaava tangon pyöriyteen tarvittava vääntömomentti mitattiin momenttiavaimella tangosta, jolloin saatiin kahden kärkikappaleen vaatima momentti. M_k saatiin jakamalla tulos kahdella. Mittausten mukaan tämä momentin arvo M_k saadaan kärkitangon kuluneisuudesta riippuen likimäärin kaavalla

$$M_k = \mu_k F_n \quad (4.6)$$

jossa	M_k	on	momenttilisäys kärkitangon ja kärjen välisestä kitkasta (Nm)
	μ_k		vakio ($\mu_k = 0,1$ Nm/kN)
	F_n		nettokärkivoima (kN)

Kärjen sisäisen kitkan osuus on suhteellisen pieni. Sen vaikutus on suurimmillaan silloin, kun tangon vaippavastus on pieni, ja kokonaispuristusvoima menee lähes suoraan kärjelle. Tällöin sen osuus vastaa noin 1 % nettokärkivastuksesta. Tankokitkan lisääntyessä kärjen sisäisen kitkan aiheuttaman momentin osuus pienenee samalla, kun nettokärkivoiman osuus kokonaispuristusvoimasta pienenee. Paalun kantavuuslaskelmien kannalta kärjen sisäisellä kitkalla ei käytetyllä mittaustarkkuudella ole merkitystä, kun kärkitangon kärkikartion kunto on hyvä, joten sitä ei kantavuuslaskelmissa ole huomioitu.

Kaavojen 4.1 - 4.5 perusteella puristinvaiheen nettokärkivastukseksi saadaan

$$q_n = \frac{F_k}{1000A_c} - k_p M_n \quad (4.7)$$

jossa	q_n	on	puristinkairausvaiheen nettokärkivastus (MPa)
	F_k		kokonaispuristusvoima (kN)
	A_c		kärjen ala (0,0016 m)
	k_p		vakio ($k_p = 1/(A_c r 10^6) = 0,039 (1/m^3)$)
	M_n		nettovääntömomentti (Nm)

4.1.3 Heijarikairausvaiheen nettolyöntiluku N_n

Heijarikairausvaiheessa tankokitkasta aiheutuva lyöntiluvun lisäys N_s (1/0,2m) saadaan kaavalla (Dahlberg & Bergdahl 1975)

$$N_s = 0,040 M_n \quad (4.8)$$

jossa	N_s	on	tankokitkasta aiheutuva lyöntiluvun lisäys (1/0,2 m)
	M_n		nettovääntömomentti (Nm)

Kaava (4.8) perustuu heijarikairan tangon vaippakitkan aiheuttamaa vaippavastusta vastaavan lyöntiluvun määritykseen järkäleen iskussa tankoon siirtyneen energian perusteella. Nettokärkivastus saadaan vääntömomentin avulla kaavalla (Dahlberg & Bergdahl 1975)

$$N_n = N - 0,040 M_n \quad (4.9)$$

jossa	N_n	on	nettolyöntiluku (1/0,2 m)
	N		kokonaislyöntiluku (1/0,2 m)
	M_n		nettovääntömomentti (Nm)

Tätä menetelmää, jolla heijarikairan tankokitka erotetaan kokonaiskairausvastuksesta, käytetään ruotsalaisessa DBA-kairauksessa. Tässä A-tyypin heijarikairauksessa tankoja

pyöritetään 2 kierrosta jokaisen 0,2 metrin tunkeuman jälkeen. Vääntömomentin käyttöä tankokitkan arvioimiseksi suositellaan käytettäväksi erityisesti arvioitaessa tiheyden vaihte-luita yli 10 metrin syvyyksissä. (Dahlberg & Bergdahl 1975)

Vääntömomenttiin perustuvan menetelmän soveltuvuus heijarivaiheessa ei kuitenkaan ole yhtä selkeä kuin puristinvaiheessa, jossa tangon aksiaali- ja kehänopeus ovat yhtäsuuret. Heijarivaiheessa tangon aksiaalinopeus heijarin osuessa lyöntityynyyn on paljon suurempi kuin tangon kehänopeus. Koheesiomaalajeissa tämä voi aiheuttaa suuremman tankovastuksen kuin kaavan 4.8 perusteella on arvioitu. Heijarikairan tankovastuksen määrittystä vääntömo-mentin avulla on tutkittu Lontoon savessa, jolloin koelaitteistona käytetyn DIN 4094 mukai-nen laitteisto eroaa puristin-heijarikairasta kärjen halkaisijan (43,7 mm) ja heijarin massan (50 kg) osalta. Tankokitkaksi on saatu 2,8-kertainen arvo GM 4000-4 -koneelle kaavalla 4.8 määritettyyn arvoon verrattuna. (Scarff 1989)

Toisessa tutkimuksessa on vertailtu tankokitkan määrittystä vääntömomenttia ja erikoiskärkeä käyttämällä. Kärjen liukukiinnitys, ns. slip coupling mahdollistaa sen, että kairatangot voidaan kesken kairauksen nostaa 0,2 m ja tämän jälkeen lyödä takaisin, jolloin saadaan määritettyä N_s . Näin menetellen on saatu hiekassa noin kaksinkertaisia ja savessa noin nelinkertaisia tankovastuksen arvoja verrattuna kaavalla 4.8 saatuihin arvoihin. (Bergdahl & Möller 1981) Heijarikairaukseen sovellettuna erikoiskärki ei aina ehkä toimikaan siltissä, jossa vähennys voi olla liian suuri, ja kärkivastuksen arvoista saadaan liian pieniä (Bergdahl & Ottosson 1988).

Näiden kolmen heijarikairausta käsittelevän tutkimuksen (Scarff 1989, Bergdahl & Möller 1981, Bergdahl & Ottosson 1988) tuloksia puristin-heijarikairaukseen sovellettaessa on huomioitava seuraavat seikat: Tankojen pyöritys ei ole jatkuvaa kuten puristin-heijarikairassa, joten vääntömomenttimittauksen tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Dahlberg & Bergdahl (1975) ovat tutkimuksissaan kiertäneet kairatankoa 20 astetta ennen jokaista lyöntiä, jolloin lyöntiluvut ovat tangon hetkellisestä pysähtymisestä huolimatta pienentyneet savessa jopa puoleen ja hiekassa jopa viidenteen osaan ilman pyöritystä mitatuista arvoista. Puristin-heijarikairatangon jatkuvalla pyörityksellä saadaan tangon ja maa-aineksen välille jatkuva liikekitka, jolloin tankokitka voi olla vieläkin pienempi. Pyörivän tangon vastusta arvioitaessa

vääntömomentin avulla on siis kysymys tästä jäljelläolevasta tankovastuksen osuudesta, jolloin laskentamenetelmien tarkkuuden merkitys on vastaavasti pienempi. Erikoiskärjellä tankovastusta määritettäessä kärkivastus puuttuu, joten kairatangon etenemä lyöntiä kohti kasvaa samoin kuin tangon nopeus lyönnin aikana. Tämä saattaa osaltaan vaikuttaa todellisuutta suuremman tankokitkan syntymiseen.

Tässä tutkimuksessa heijarivaiheen lyöntiluvut ovat suhteellisen suuria, koska puristin-heijarikairalla pehmeät kerrokset läpäistään puristamalla. Kovemmissa kerroksissa kärkivastuksen osuus kairauksen kokonaisvastuksesta kasvaa, jolloin tankovastuksen määrittystarkkuuden merkitys pienenee. Samalla kun kairatangon etenemä lyöntiä kohti pienenee, vähenee myös tangon aksiaali- ja tangentialinopeuden välinen ero.

Tankokitkan lisäksi heijarikairausvaiheessa aiheutuu kitkaa kairatangon pyörityslaitteen ja sen läpi kulkevan niskan välillä. Kitkan suuruus riippuu vääntömomentista. Sen suuruus on mittausten mukaan GM 4000-4 -koneen kuusikulmaisella niskalla noin yksi lyönti/0,2 m, kun vääntömomentti on 100 Nm. Toisella, poikkileikkaukseltaan pyöreällä niskalla varustetuissa koneissa ei tämäntyyppistä merkittävää kitkavaikutusta ole käytännössä havaittu. Kitkan osuutta lyöntiluvun lisäyksessä GM 4000-4 -koneella arvioitiin tässä tutkimuksessa seuraavanlaisella koejärjestelyllä: Koneen kelkka nostettiin ylös, jolloin vääntölaitteen niska jäi ala-asentoon ja lyöntivaiheen vaatima lyöntivara oli maksimissaan. Koneella väännettiin tankoa momenttiavainta vasten. Tämän jälkeen kelkkaa ajettiin alas 60 mm:n lyöntivaran verran, jolloin saatiin vuorosuhde vääntömomentin ja niskan aksiaalikitkan voittamiseksi tarvittavan puristusvoiman välille. Vastaava suuntaa antava lyöntiluvun lisäys arvioitiin q_n :n ja N_n :n vuorosuhteen avulla (kuva 4.4). Tämän perusteella puristin-heijarikairalle saadaan tankokitkaa vastaavaksi lyöntiluvuksi N_s (lyöntiä/0,2 m) laitteiston kitkat huomioivalla kaavalla

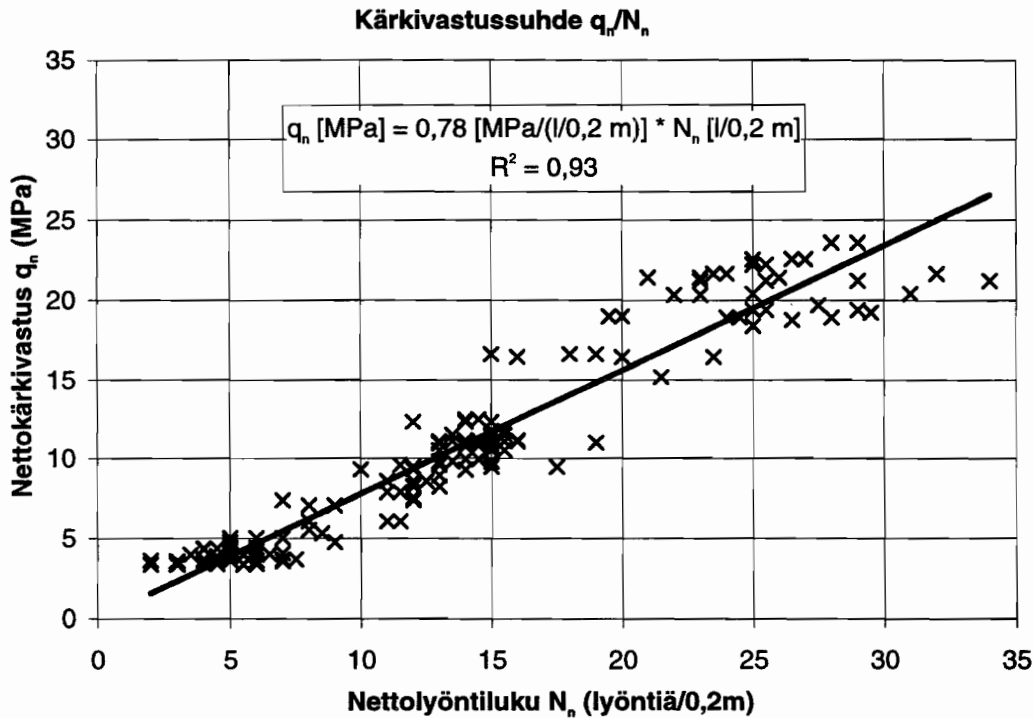
$$N_s = (k_h + k_n)(M_r - M_\mu) \quad (4.10)$$

jossa	N_s	on	tankokitkaa vastaava lyöntiluku (lyöntiä/0,2 m)
	k_h		heijarikairausvaiheen tankokitkan kerroin ($k_h=0,04$, lyöntiä/0,2 Nm ²)
	k_n		niskan rakenteesta riippuva kerroin (kuusikulmaisella niskalla)

$k_n=0,01$, lyöntiä/0,2 Nm²)

M_r kokonaisvääntömomentti (Nm)

M_μ laitteiston kitkoista aiheutuva vääntömomentin lisäys (Nm)



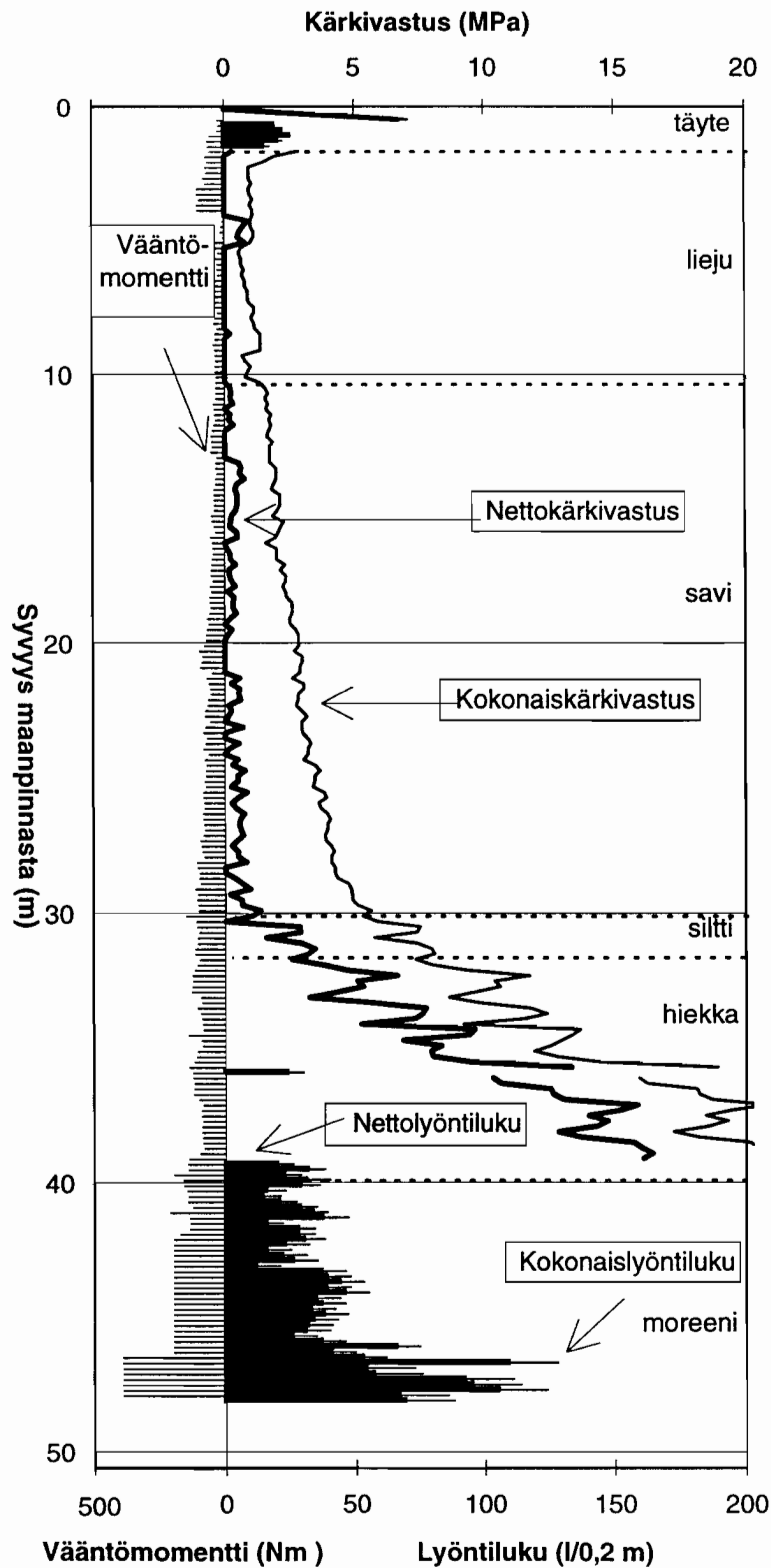
Kuva 4.4. Puristinkairauksen nettokärkivastuksen q_n ja heijarikairauksen nettolyöntiluvun N_n suhde.

Nettolyöntiluvuksi N_n (lyöntiä/0,2 m) saadaan

$$N_n = N - N_s \quad (4.11)$$

jossa N_n on nettolyöntiluku (lyöntiä/0,2 m)
 N_s tankokitkaa vastaava lyöntiluku

Kuvassa 4.5 on esitetty esimerkki puristin-heijarikairauksen kokonaiskairausvastuksesta ja vääntömomenttikuvaajasta sekä vääntömomentin perusteella kaavoilla (4.7) ja (4.11) määritetyistä nettokärkivastuksista ja nettolyöntiluvuista. Kuvan 4.5 tapauksessa kärkivastuksen q_c osuus kokonaiskairausvastuksesta vaihtelee 10 ja 100 % välillä.



Kuva 4.5. Puristin-heijarikairan momenttikuvaaaja, kokonaiskairausvastus ja sitä vastaava nettokärkivastus sekä kokonaislyöntiluku ja sitä vastaava nettolyöntiluku Myllypellon koealueella.

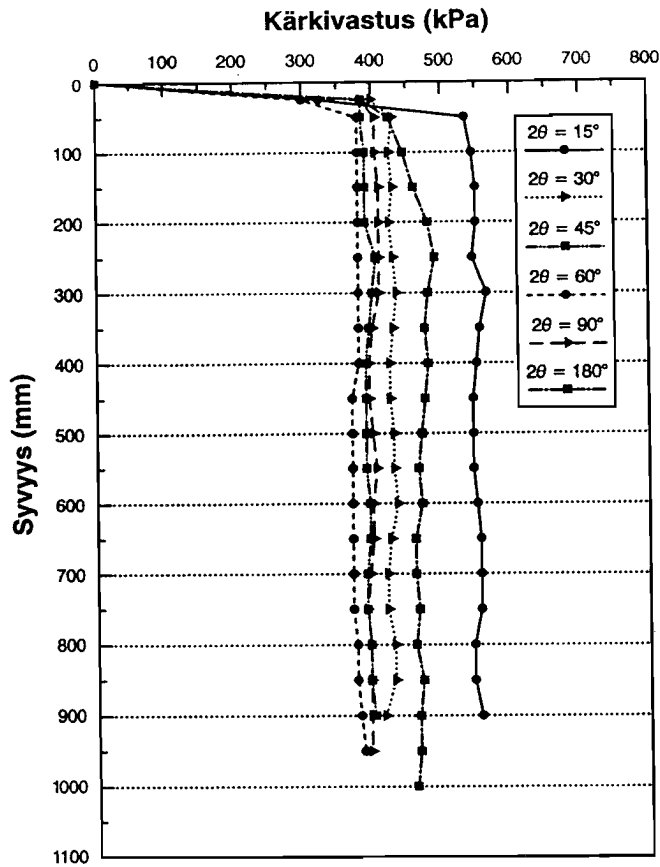
4.1.4 Kärkivastussuhteet

Tässä tutkimuksessa paalun kantavuus määritetään CPT-kairaustuloksille kehitetyillä laskukaavoilla. Puristin-heijarikairaustulosten ja CPT-kairaustulosten välinen vuorosuhde on selvitettävä, koska kärkikappaleet poikkeavat mitoiltaan ja muodoltaan toisistaan (kuva 2.1). Maaperän epähomogeenisuuden vuoksi vuorosuhteet määritettiin laboratorio-olosuhteissa.

CPT-kairan kärkikulman vaikutusta savisessa siltissä ovat tutkineet Silvestri & al. (1997). Kuvassa 4.6 on esitetty CPT:llä mitatut kärkivastukset syvyyden funktiona laboratorio-olosuhteissa. Kärkikulman 2θ arvo on CPT-kärjellä 60° ja puristin-heijarikairan kärjellä 90° . Kärkikulmilla $2\theta = 45^\circ - 90^\circ$ kärkivastusarvot ovat hyvin lähellä toisiaan ja pysyvät syvyyden kasvaessa lähes vakioina.

CPT-kairauksen ja puristin-heijarikairauksen kärkivastusten suhteet kitkamaassa määritettiin koekuoppatutkimuksen perusteella valitsemalla CPT- ja puristin-heijarikairauspisteistä sellaiset onnistuneet pisteet, jotka oli tehty mahdollisimman harvalla pistetiheydellä ja etäällä koekuopan seinämistä, jotta ympäröivien kairauksen ja seinämien vaikutus olisi jäänyt pieneksi. Kairausvastussuhteet määritettiin vertailemalla lähekkäisistä pisteistä saatuja tuloksia pareittain keskenään. Puristinheijarikairauksen tulokset ovat kokonaiskairausvastuksia, mutta koska koetäytön olosuhteissa ei tankojen vaippakitkaa esiintynyt, ovat kairausvastukset nettokärkivastuksia.

CPT:n kärkivastuksen rekisteröintiväli on 0,02 m, puristinkairausvastuksen 0,04 m ja heijarikairausvastuksen 0,2 m. Q_c :n ja q_n :n arvo on hetkellinen mittaustulos rekisteröintivälin alarajalla. Heijarikairauksen lyöntiluku N sen sijaan on mittaustavasta johtuen kairausvastuksen keskiarvo 0,2 metrin matkalta. Tiivistystavasta johtuva täytön epähomogeenisuus on huomioitu vertailulaskelmissa vertailemalla kairauksia toisiinsa 0,2 metrin välein laskettujen keskiarvojen avulla, koska koekuopan täyttö tiivistettiin 0,2-0,25 metrin kerroksina. Jos tiivistys olisi voitu tehdä tasalaatuiseksi, CPT:n ja puristinkairauksen kärkivastuksia olisi voitu vertailla valitsemalla q_c -arvot 0,04 m:n välein puristinkairausarvoja vastaavilta kohdilta.



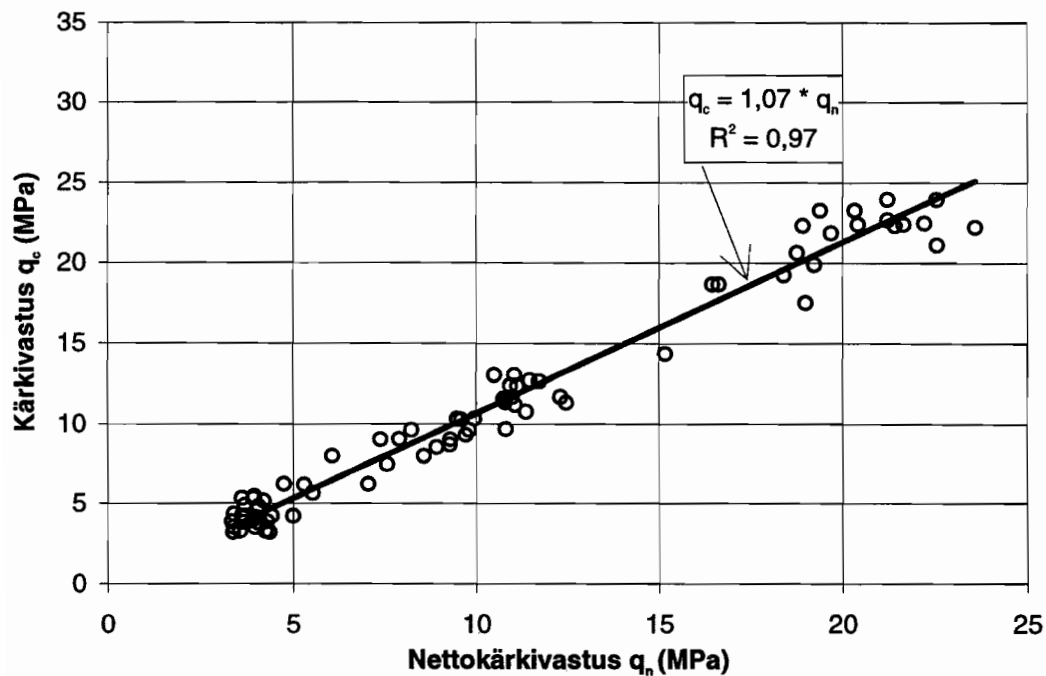
Kuva 4.6. Syvyyden ja kärkikulman vaikutus havaittuihin kärkivastuksen arvoihin savisessa siltissä (Silvestri & al. 1997).

Kärkivastussuhteet määritettiin kahdella tavalla. Ensin kärkivastuksia vertailtiin pareittain keskenään, jolloin saatiin kärkivastusten suhteet kärkivastuksen funktiona. Tehokkaasti pystysuoran jännityksen vaikutusta kärkivastussuhteeseen tutkittiin määrittämällä kärkivastussuhteet myös σ'_{vo} :n funktiona. Kairaustuloksia käytettiin vasta syvyydeltä 0,6 m alaspäin täytön pinnasta mitattuna, jotta pinnan vaikutus ei olisi vaikuttanut tuloksiin.

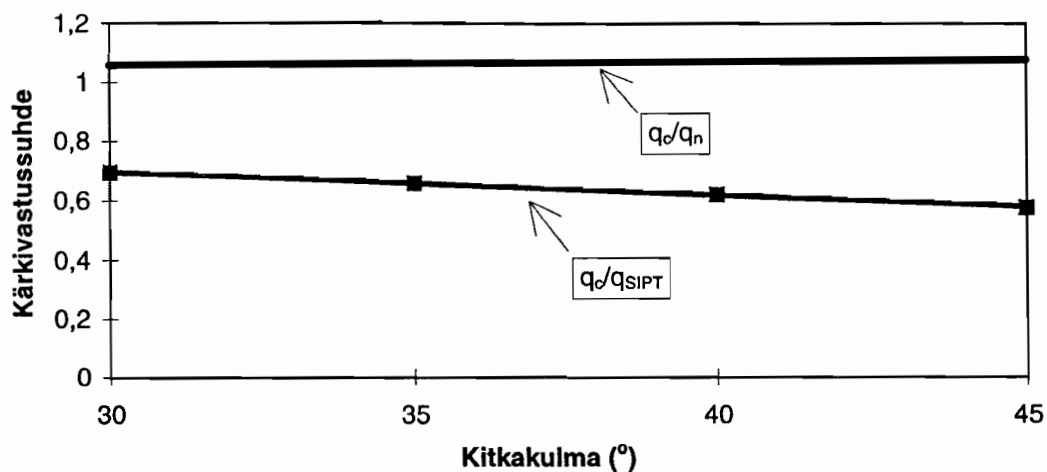
Kuvissa 4.7-4.11 kärkivastuksia on vertailtu pareittain keskenään. Näiden pisteiden mukaan on pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettu suorat, joiden yhtälöitä voidaan käyttää kärkivastusten muunnoskaavoina. Laboratoriokokeiden perusteella CPT-kärkivastus saadaan puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksesta kertoimella 1,07 ja heijarikairausvaiheen nettolyöntiluvusta kertoimella 0,83. Kuvissa 4.8 ja 4.9 on myös muissa tutkimuksissa saatuja vuorosuhteita. Kuvassa 4.9 ainoastaan Bergdahlin ja Ottosonin (1988) tutkimuksessaan käyttämät kairausmenetelmät ovat vertailukelpoisia tässä tutkimuksessa käytettyihin, sillä

CPT-kaira on sähköinen, heijarikairana on ollut vapaapudotusheijarikaira, ja heijarikairaustuloksina on käytetty nettolyöntilukua N_n .

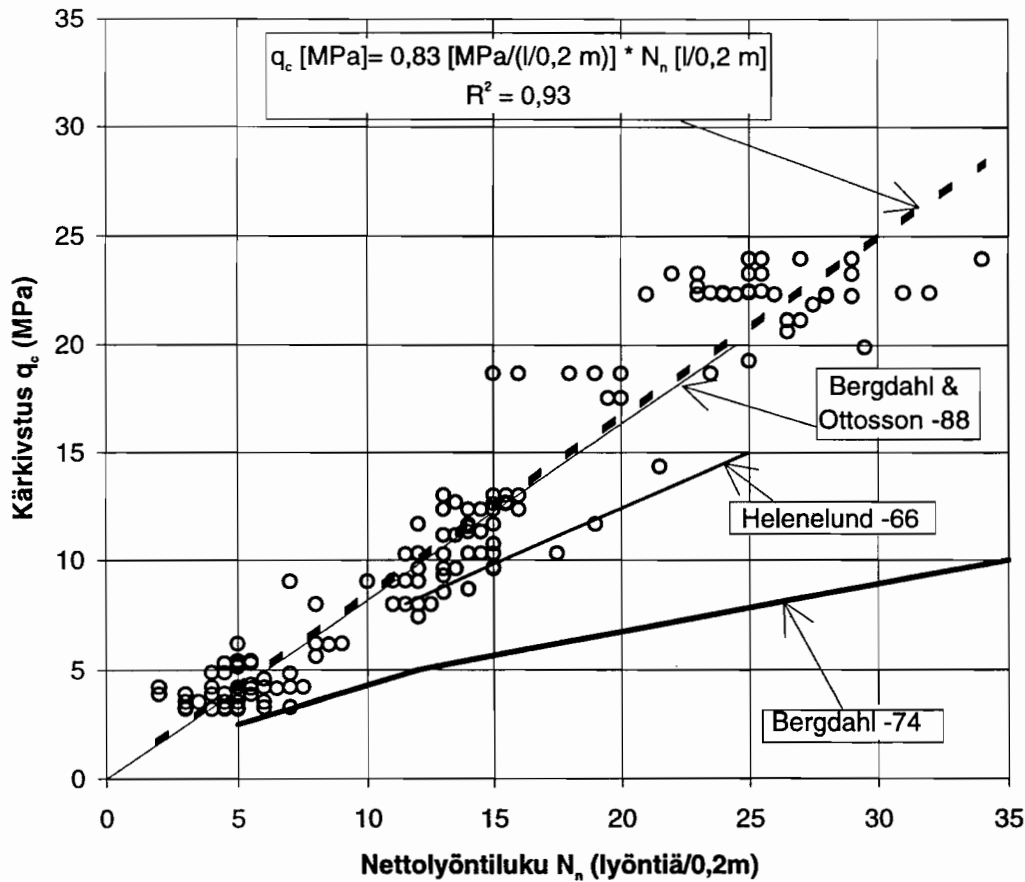
Puristin-heijarikairan ja CPT:n kärkivastuksien suhdetta on aiemmin tutkittu teoreettisen mallin avulla (Tirkkonen 1991). Kuvassa 4.8 on esitetty teoreettiseen malliin ja koeallastutkimukseen perustuvat suhdeluvut kitkakulman funktiona. Tässä tutkimuksessa määritetty suhdeluku on yli puolitoistakertainen verrattuna aiemmin esitettyyn.



Kuva 4.7. q_c :n ja q_n :n suhde on määritetty vertaamalla kairaustuloksista 0,2 metrin välein laskettuja keskiarvoja toisiinsa.



Kuva 4.8. Muunnoskertoimet q_c/q_{SIPT} ja q_c/q_n

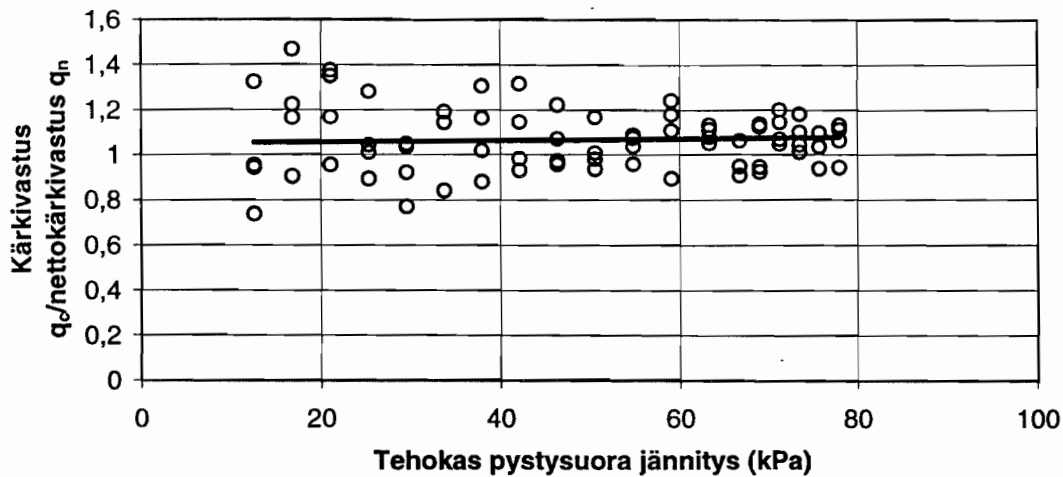


Kuva 4.9. q_c:n ja N_n:n suhde eri tutkimuksissa.

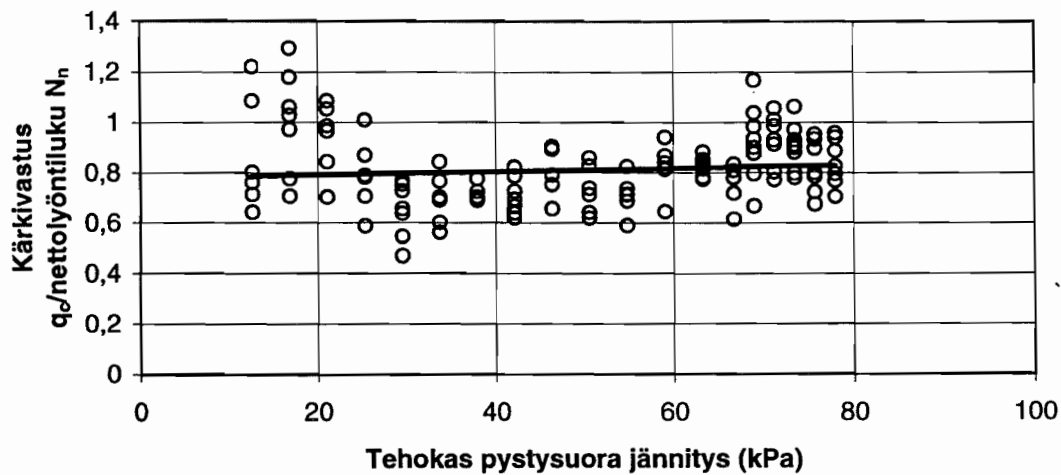
Kuvissa 4.10 ja 4.11 kärkivastussuhteet on määritetty 0,2 metrin välein laskettujen kairausvastuskeskiarvojen perusteella ja kuvattu tehokkaan pystysuoran jännityksen funktiona. Myös näiden pisteiden mukaan on pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettu suorat, joiden yhtälöitä voidaan käyttää kärkivastusten muunnoskaavoina.

Kuvassa 4.11 σ'_{vo} :n arvoja alle 30 kPa vastaavien havaintojen hajonta on kasvanut, kun heijarikairauksen löytiluku on $N \leq 5$. Hajonnan kasvu σ'_{vo} :n arvolla noin 70 kPa saatta johtua siitä, että pohjavedenpinnan alla viereisten pisteiden heijarikairausvaiheen isku on ulottanut kärjen murtokuvion puristamalla aiheutettua kauemmas, jolloin joissain pisteissä on viereen tehtyjen reikien vaikutus kasvanut. Käytännössä tällä ei ole merkitystä, koska puristin-heijarikairauksessa siirrytään puristinkairaukseen, jos heijarikairauksen löytiluku on $N \leq 5$ yli 0,4 metrin matkalla. Kuvan 4.9 mukaisessa tarkastelussa näin pieniä suhteellisia eroja on vaikeampi havaita, vaikka kyseessä ovat samat kairaustulokset.

Myllypellon koalueella verrattiin puristin-heijarikairaustuloksia lähelle tehtyihin CPT-kairaustuloksiin (kuva 4.12). Puristin-heijarikairaustuloksista määritettiin ensin nettokärkivastus kaavalla 4.9, ja tämän jälkeen nettokärkivastus muutettiin CPT-kärkivastusta vastaavaksi koeallastutkimuksessa määritetyn kärkivastussuhteen avulla.



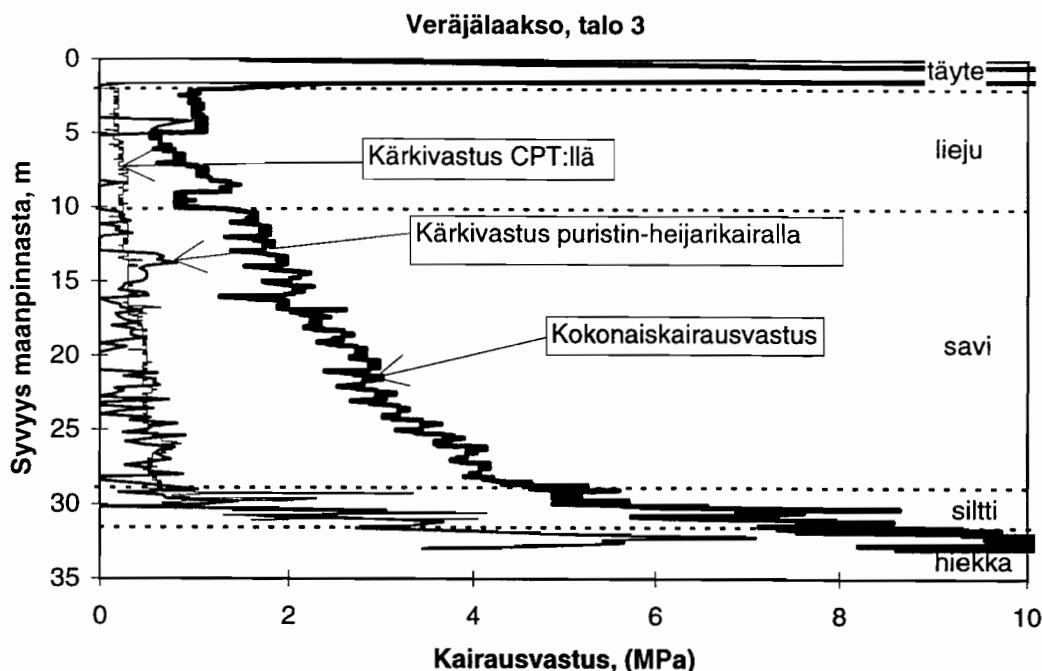
Kuva 4.10. q_c :n ja q_n :n suhde tehokkaan pystysuoran jännityksen funktiona.



Kuva 4.11. q_c :n ja N_n :n suhde tehokkaan pystysuoran jännityksen funktiona.

Tässä työssä käytetyt kärkivastussuhteet on määritetty hiekassa. Kuvassa 4.6 esitettyjen tutkimustulosten perusteella (Silvestri & al. 1997) ne ovat suuruusluokaltaan oikeita myös koheesioma-aineksessa. Suhdelukuun saattaa vaikuttaa kärkikulman suuruuden lisäksi myös

kairan muu geometria kuten kairatangon halkaisijaa suurempi kärjen läpimitta. Tässä tutkimuksessa kitkamaakerrokset ovat paalun kantavuuden kannalta olennaisia. Koealueen savi- ja liejukerrokset olivat hyvin pehmeitä, joten puristin-heijarikairalla määritetyt kärkivastuksen arvot olivat laitteiston erottelukyvyn rajoilla. Kairaustuloksista määritetty nettokärkivastus vaihteli pehmeimmissä kohdissa nollan molemmin puolin. Negatiiviset arvot on kärkivastuskuvaajassa asetettu nollassi. Kokonaiskairausvastuksessa metrin jaolla näkyvä hammastus johtuu tankojen jatkamisesta. Hiekkakerroksessa ei tankojen vaihdon aiheuttama hammastus ole niin selkeä.



Kuva 4.12. Puristin-heijarikairauksen kokonaiskairausvastus, sekä kärkivastus q_c CPT:llä ja puristin-heijarikairalla määritettynä Myllypellon koealueella.

Kuvassa 4.5 on sama puristin-heijarikairauspiste kuvattu kokonaisuudessaan erilaisessa mittakaavassa. Siinä on kuvattu puristinkairauksen kokonais- ja nettokärkivastukset ja heijarikairauksen kokonais- ja nettolyöntiluvut. Lisäksi kuvassa on esitetty nettoarvojen laskennassa käytetyn vääntömomentin nettoarvojen kuvaaja. Kuvasta nähdään, että hieman yli 30 metrin syvyyteen yltävän CPT-kairauksen käyttöalue tässä tapauksessa loppuu siihen, mistä kantavuuslaskennassa olennainen alue alkaa. Tässä mittakaavassa savi- ja liejukerrosten kärkivastukset eivät näytä kantavuuslaskennan kannalta kovin merkittäviltä.

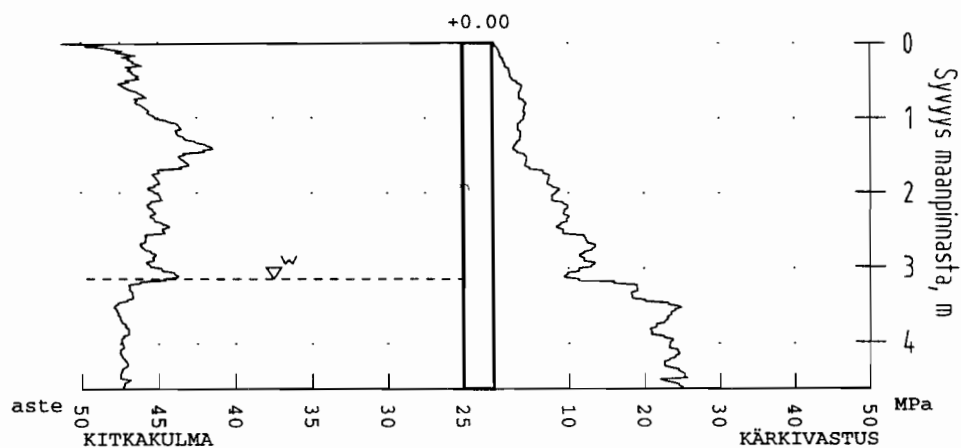
4.2 Kitkakulma φ

CPT:llä määritettyyn kärkivastukseen perustuvia maan sisäisen kitkakulman määrittämenetelmiä on useita. Menetelmästä riippuen kitkakulma-arvojen hajonta on varsin suuri. Kitkakulman määrittäminen epäsuoria kantavuudenmäärittämenetelmiä varten kärkivastuksen perusteella tapahtuu tässä tutkimuksessa Robertsonin & Campanellan (1983) mukaan kaavalla

$$\varphi' = \arctan(0,096 + 0,386 \log(q_c / \sigma'_v)) \quad (4.12)$$

jossa φ' on tehokas kitkakulma (°)
 q_c puristin-heijarikairan muunnettu q_{CPT} :tä vastaava kärkivastus (MPa)
tai CPT-kärkivastus (Mpa)
 σ'_v tehokas pystysuora jännitys (KPa)

CPT-kairauksen perusteella kaavalla 4.12 määritetyt kitkakulman arvot koetäytössä on esitetty kuvassa 4.13.



Kuva 4.13. Koetäytön tyypillinen CPT-kuvaaja ja sen perusteella määritetty hiekan kitkakulma Robertson & Campanellan (1983) mukaan.

4.3 Suhteellinen tiiviys D_r

Tiiviysaste on tiivistetyn maakerroksen kuivatilavuuspainon ja proctor-kokeella määritetyn maksimikuivatilavuuspainon suhde (Lojander 1985). Koealtaan hiekan tiivistymistä seurattiin Troxlerilla ja vesivolymetrikokeilla. Vesivolymetrillä määritetyt tiiviysasteet ja vastaavat kairauksella määritetyt arvot on esitetty taulukossa 4.1.

Vesivolymetrillä määritetyt arvot ovat 1-3 % Troxler-arvoja pienemmät. Tämä saattaa johtua määrittämenetelmien periaattellisista eroista, sillä vesivolymetrikoe perustuu tilavuuspainon määrittämiseen, kun Troxlerilla maa-aineksen ominaisuuksia arvioidaan gammasäteilyn avulla.

Taulukko 4.1. Vesivolymetrillä ja Troxlerilla määritetyt tiiviysasteet.

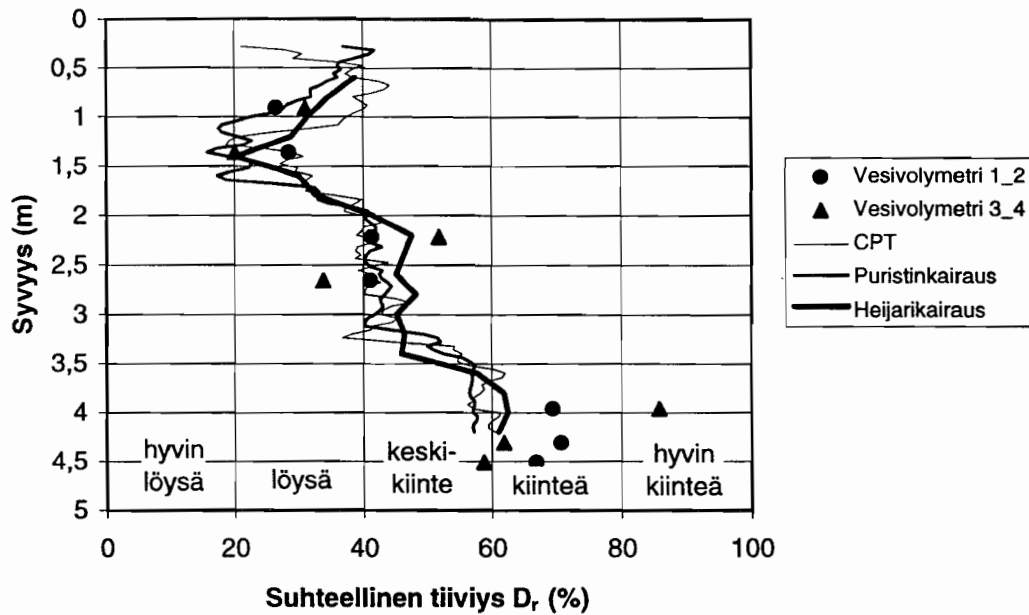
Kerros	Tiiviysaste	
Syvyys (m)	Troxler (%)	Vesivolymetri (%)
0-1,5	86	83
1,5-3,0	89	86
3,0-4,5	92	91

Koealtaan hiekkakerrosten suhteelliset tiiviyydet ja vastaavat kairauksilla määritetyt arvot on esitetty kuvassa 4.14. Suhteellinen tiiviys on arvioitu kaavalla (Jamiołkowski & al. 1985)

$$D_r = -98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \quad (4.13)$$

jossa q_c on kärkevasto
 σ'_{vo} tehokas pystysuora jännitys

Puristin-heijarikairalla on määritetty kärkevaston arvot muuntamalla q_n :n ja N_n :n arvot vastaaviksi kärkevaston arvoiksi q_c . Tulosten perusteella kairausten avulla määritetty kitkamaan suhteellinen tiiviys vastaa hyvin vesivolymetrillä määritettyjä arvoja.



Kuva 4.14. Koetäytön suhteellinen tiiviys vesivolymetrillä koekuopan vastakkaisilta sivuilta 1-2 ja 3-4 sekä usean kairauksen keskiarvoina määritettyjen q_c -arvojen perusteella.

5 PAALUN KANTAVUUS KAIRAUSTULOSTEN PERUSTEELLA

5.1 Arviointi kärkivastuksen avulla

Paalun kantavuutta arvioitiin tässä tutkimuksessa kärkivastukseen perustuvalla ns. suoralla laskentamenetelmällä, jolloin kantavuus määritetään kärkivastukseen perustuvilla kokemusperäisillä kaavoilla. Kallvikinpuiston koealueella kokeiltiin myös ns. epäsuoraa menetelmää, jolloin kantavuus määritettiin kärkivastuksesta lasketun kitkakulman avulla. Tässä tutkimuksessa paalun kantavuuden arviointimenetelmällä tarkoitetaan suoraa menetelmää, ellei toisin mainita.

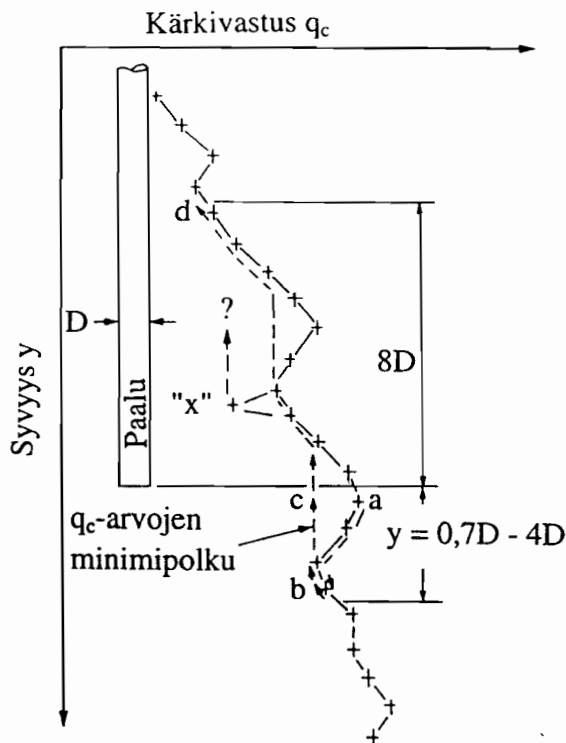
Kantavuudenarvioinnissa on tässä tutkimuksessa käytetty suoraa laskentamenetelmää, joka yhdistää kahdessa eri tutkimuksessa kehitetyt CPT-kärkivastukseen q_c perustuvat kantavuudenarviointimenetelmät. Paalun vaippavastus määrittiin Bustamanten ja Ganesellin (1982) mukaan ja kärkivastus Schmertmannin (1978) mukaan. Puristin-heijarikairaus tuloksista määrittiin kantavuudenlaskentaa varten ensin nettoarvot, jotka muutettiin kärkivastusten suhdeluvuilla vastaamaan CPT-kärkivastusta q_c .

Kantavuudenarviointimenetelmä on muodostettu yhdistämällä kaksi CPT-kärkivastukseen perustuvaa kaavaa. Paalun kärkivastuksen arvo murtotilassa määritettiin Begemannin teoriaan perustuvalla Schmertmannin kaavalla (5.1) (Hunt 1986). Kaavaa käytettäessä oli kairausvastuskuvaajasta ensin määritettävä minimipolku kuvan 5.1 mukaisesti.

$$Q_p = A_p \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad (5.1)$$

jossa A_p on paalun poikki-pinta-ala (m^2)
 q_{c1} keskimääräinen kairan kärkivastuksen q_c -arvo etäisyydellä y paalun kärjen alapuolella (polku a-b-c, kuva 5.1). q_c -arvot laskettiin yhteen sekä alaspäin (polku a-b) että ylöspäin (polku b-c) käyttäen todellisia q_c -arvoja polulla a-b ja minimipolkusääntöä polulla b-c. q_{c1} -arvot laskettiin välille y ja saaduista arvoista käytettiin pienintä

q_{c2} keskimääräinen kairan kärkivastuksen q_c arvo $8D$:n matkalla kärjen yläpuolella (polku c-e, kuva 5.1). Minimipolkusääntöä käytettiin kuten polulla b-c q_{c1} -laskennassa. X-piikit jätettiin huomioimatta kitkamaassa.



Kuva 5.1. Minimipolkusääntö.

Vaippavastuksen osuus saatiin kaavoilla (5.2) ja (5.3) (Bustamante & Ganeselli 1982).

$$Q_s = \sum Q_{si} = \sum (q_{si} s_i \Delta L_i) \quad (5.2)$$

ja

$$q_{si} = \frac{q_{ci}}{\alpha} \leq q_{smax} \quad (5.3)$$

joissa Q_s on paalun vaippavastus murtotilassa (MN)

Q_{si}	paalun vaippavastus kerroksessa i (MN)
q_{si}	paalun vaippavastus kerroksessa i (MN)
q_{smax}	maksimivaippavastus riippuen maa- ja paalutyypistä ja CPT-kärkivastuksesta (0,015-0,15 MPa) (taulukko 5.1)
q_{ci}	kärkivastus q_c kerroksessa i (MPa)
s_i	paalun ympärysmitta (m)
Δl_i	paalun pituus kerroksessa i (m)
α	maa- ja paalutyypistä sekä kärkivastuksesta q_c riipuva korjauskerroin (30-200) (taulukko 5.1)

Taulukko 5.1. Vaippavastuksen laskennassa käytettävät α -kertoimen ja q_{smax} :n arvot (Bustamante & Gianeselli 1982).

Maalaji	q_c (MPa)	Kerroin α	q_s :n maksimiarvo (MPa)
Lieju			
Pehmeä savi	<1	30	0,015
			(0,08)
Kohtalaisen tiivis savi	1-5	40	0,035
Siltti			
Löyhä hiekka	≤ 5	60	0,035
			(0,08)
Tiivis ja jäykkä savi			
Tiivis siltti	>5	60	0,035
			(0,12)
Kohtalaisen tiivis hiekka			
Kohtalaisen tiivis sora	5-12	100	0,08
			(0,15)
Tiivis ja hyvin tiivis hiekka			
Tiivis ja hyvin tiivis sora	>12	150	0,12

Joissakin tapauksissa q_s :n maksimiarvoille on annettu kaksi arvoa. Ilman sulkuja merkitty arvo vastaa paalutustapaa, jossa ei ole noudatettu erityistä varovaisuutta tai erikoismenetelmiä vaippakitkan maksimoimiseksi. Sulkuihin merkitty arvo vastaa varovaista työsuoritusta ja

sellaisen paalutustekniikan valintaa, joka häiritsee paalun vaippaa ympäröivää maata mahdollisimman vähän. Tällöin saavutetaan optimaaliset kitka-arvot. Suurissa, paljon paaluja käsittävissä projekteissa on suositeltavaa tarkistaa kokeellisesti, vähintään yhdellä paalun kuormituskokeella, onko sulkuihin merkittyt q_s :n maksimiarvoja mahdollista käyttää (Bustamante & Ganeselli 1982). Tässä tutkimuksessa on käytetty pienempiä, ilman sulkuja merkittyt arvoja.

Bustamanten menetelmän soveltuvuutta puristin-heijarikairalle parantaa se, että menetelmän kehittämisen yhteydessä käytettiin pääasiassa kahdenlaisia kairakärkiä. Kärjet olivat halkaisijaltaan joko 36 mm tai 45 mm, joista jälkimmäinen on samansuuruinen puristin-heijarikairan kärkihalkaisijan kanssa (Bustamante & Ganeselli 1982).

Näiden laskukaavojen soveltuvuus paalun kantavuuden määrittämiseen on todettu hyväksi eri tutkimuksissa vertailtaessa kaavoilla laskettuja arvoja mitattuihin paalun kantavuuksiin. Vertailevia tutkimuksia on tehty sekä Begemannin kärkivastuksen määrittystavan osalta (Bottiau 1995) että Bustamanten ja Ganesellin mukaisen vaippavastuksen määrittämisen osalta (Bottiau 1995) ja (Eslami & Fellenius 1995). Näissä tutkimuksissa kyseiset menetelmät on todettu toimiviksi paalun kantavuuden arvioinnissa. Molempia menetelmiä suosittavat myös Robertson & al. (1988). Tässä tutkimuksessa käytetty kaavayhdistelmä on todettu toimivimmaksi myös SIPT-kairausmenetelmällä (Static Impact Penetration Test), jossa heijarikairan kärkivastus arvioidaan iskuaaltomittauksen avulla (Honkaniemi & Lempinen 1995). Koska SIPT-kairaus suoritetaan puristin-heijarikairauslaitteistoa käyttäen, voidaan näiden kairausmenetelmien katsoa vastaavan kärkivastuksen osalta toisiaan ainakin heijarikairausvaiheessa.

Erona SIPT-kairauksen yhteydessä käytettyyn laskentaan on tässä työssä alkuperäisen menetelmän mukaisen ns. minimipolkuperiaatteen käyttö paalun kärkivastuksen arvioinnissa. Minimipolku on kairausdiagrammin perusteella määritetty kuvaaja, joka määritetään tietylle syvyydelle tätä syvyyttä alempana sijaitsevien kerrosten minimikairausvastuksena. Minimipolkuperiaatteen käyttö pienentää arvioitua kärkikantavuuden arvoa varsinkin sellaisissa maakerroksissa, joissa kärkivastus vaihtelee voimakkaasti. SIPT-kairauksen yhteydessä minimipolkuperiaatteen käyttöä hankaloittaa harva rekisteröintitiheys. Toisaalta koeallastutkimuksen tuloksien perusteella määritetty q_c/q_n -kerroin on noin puolitoistakertainen SIPT-

kairauksen yhteydessä käytettyyn muunnoskertoimeen q_c/q_{SIPT} (Tirkkonen 1991) verrattuna (kuva 4.8). Paalujen kantavuuslaskennassa kuvan 4.8 mukaisen muunnoskertoimen pieneminen laskee paalujen arvioituja vaippa- ja kärkivastuksen arvoja. SIPT-kairauksella saadaan mahdollisesti pienempiä paalun kantavuusarvoja verrattuna tämän tutkimuksen tuloksiin, jos laskennassa sovelletaan minimipolkusääntöä (kuva 5.1).

5.2 Arviointi kitkakulman avulla

Epäsuoraa määrittämenetelmää käytettäessä kantavuutta arvioitiin maaparametrien avulla muuttamalla ensin puristinheijarikairaustulosten perusteella määritetyt q_n ja N_n vastaamaan CPT-kärkivastusta laboratoriotutkimuksen avulla saatujen muunnoskertoimien avulla. Saatujen q_c -arvojen perusteella määritettiin kutakin arvoa vastaavat maan kitkakulman arvot Robertsonin ja Campanellan menetelmällä (kaava 4.12). Näiden kitkakulmien varovaisen keskiarvon perusteella paalujen kärki- ja vaippavastukset arvioitiin Brinch Hansenin menetelmää soveltaen (kaava 5.4). Kaavaa käytettäessä pinta-alaa kohti määritettyjen vaippa- ja kärkivastuksen otaksuttiin kasvavan kitkamaassa syvyyteen, joka oli 15 * paalun halkaisija, minkä jälkeen ne saivat vakioarvon. Brinch Hansenin mukaan kitkapaalun murtokuorma voidaan laskea kaavalla (Slunga 1974)

$$Q = 3N_q A_p \sigma_L + z_1 \int^L U_p \sigma_z \sin \varphi \cos \varphi dz \quad (5.4)$$

jossa	Q	on	paalun murtokuorma
	N_q		kantavuuskerroin
	A_p		paalun poikkileikkauspinta-ala
	U_p		paalun ympärysmitta
	σ_L		maan tehokas pystysuora jännitys paalun alapään tasolla
	σ_z		maan tehokas pystysuora jännitys syvyydellä z
	z_1		vaippavastusta aiheuttavan maan yläpinnan syvyys
	L		paalun kärjen syvyys maanpinnasta
	φ		maan sisäinen kitkakulma

6 KANTAVUUDEN MÄÄRITYS KOEPAALUTUKSEN JÄLKEEN DYNAAMISELLA KOEKUORMITUKSELLA

Koepaalutuksen avulla mm. tarkistetaan pohjatutkimusten perusteella arvioitua paalupituudet rakennusalueen eri osissa (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987). Koepaalutusten yhteydessä tehdään usein dynaamisia koe kuormituksia, joten tässä tutkimuksessa oli saatavilla laaja aineisto iskuaaltomittauksista. Staattiset koe kuormitukset ovat luotettavampia kuin dynaamiset, mutta suurten kustannusten vuoksi harvinaisia tavallisissa paalutuskohteissa. Dynaaminen koe kuormitus on nopea ja tehokas tapa määrittää paalun kantavuus, paaluun kohdistuvat lyöntijännitykset ja paalutuskaluston tehokkuus. Samalla voidaan varmistaa koe paalun ehjyys (Saari & Korhonen 1990). Tässä tutkimuksessa puristin-heijarikairauksen perusteella arvioitua paalun kantavuutta verrattiin dynaamisella koe kuormituksella määritettyihin staattisiin kantavuusarvoihin. Iskuaaltomittaukset oli tehty jälkilyönneistä yli viikon mittaisen lepoajan kuluttua paalujen lyönnistä.

Paalun geotekninen murtokantavuus oli määritetty kaikissa tässä tutkimuksessa käytetyissä kohteissa CASE-menetelmällä, joka on Suomessa yleisesti käytetty kantavuudenmäärittämis- menetelmä dynaamisten koe kuormitusten yhteydessä (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987). Kantavuuden määrittäminen tapahtuu iskuaaltomittauksesta määrittämällä kokonais- lyöntivastus kaavalla

$$R_t = \frac{F(t_1) + F(t_2)}{2} + \frac{Mc}{2L} [v(t_1) - v(t_2)] \quad (6.1)$$

jossa	R_t	on	paalun kokonaislyöntivastus
	F		voima
	c		iskuaallon nopeus paalussa
	v		paalun partikkelinopeus
	t_1		maksimivoiman/-nopeuden ajankohta
	t_2		$= t_1 + 2L/c$
	M		paalun massa
	L		iskuaallon mittauskohdan ja paalun kärjen välinen etäisyys

Paalun staattinen murtokuorma saadaan kokonaislyöntivastuksesta kaavalla

$$R_s = R_t - J_c [(F(t_1) + zv(t_1)) - R_t] \quad (6.2)$$

jossa	R_t	on	paalun kokonaislyöntivastus
	F		voima
	v		paalun partikkelinopeus
	t_1		maksimivoiman/-nopeuden ajankohta
	t_2		$= t_1 + 2L/c$
	R_s		paalun staattinen murtokuorma
	J_c		vaimennuskerroin
	z		paalun impedanssi

Vaimennuskerroin J_c määräytyy CASE-menetelmässä paalun kärkivyöhykkeessä olevan maalajin perusteella. Kantavuuslaskelmissa on maakerrokseen tunkeutuvan paalun vaimennuskerroin varmistettava vähintään yhdellä iskuaaltomittaukseen perustuvalla jatkoanalyysillä (RIL-212). Tässä tutkimuksessa käytettyjen mittausten jatkoanalyysit oli tehty Kallvikinpuistossa CAPWAP-tietokoneohjelmalla ja muissa kohteissa toista samantyyppistä Signal-matching-menetelmään perustuvaa simulointiohjelmaa käyttäen.

7 KENTTÄTUTKIMUKSET

7.1 Koealueet

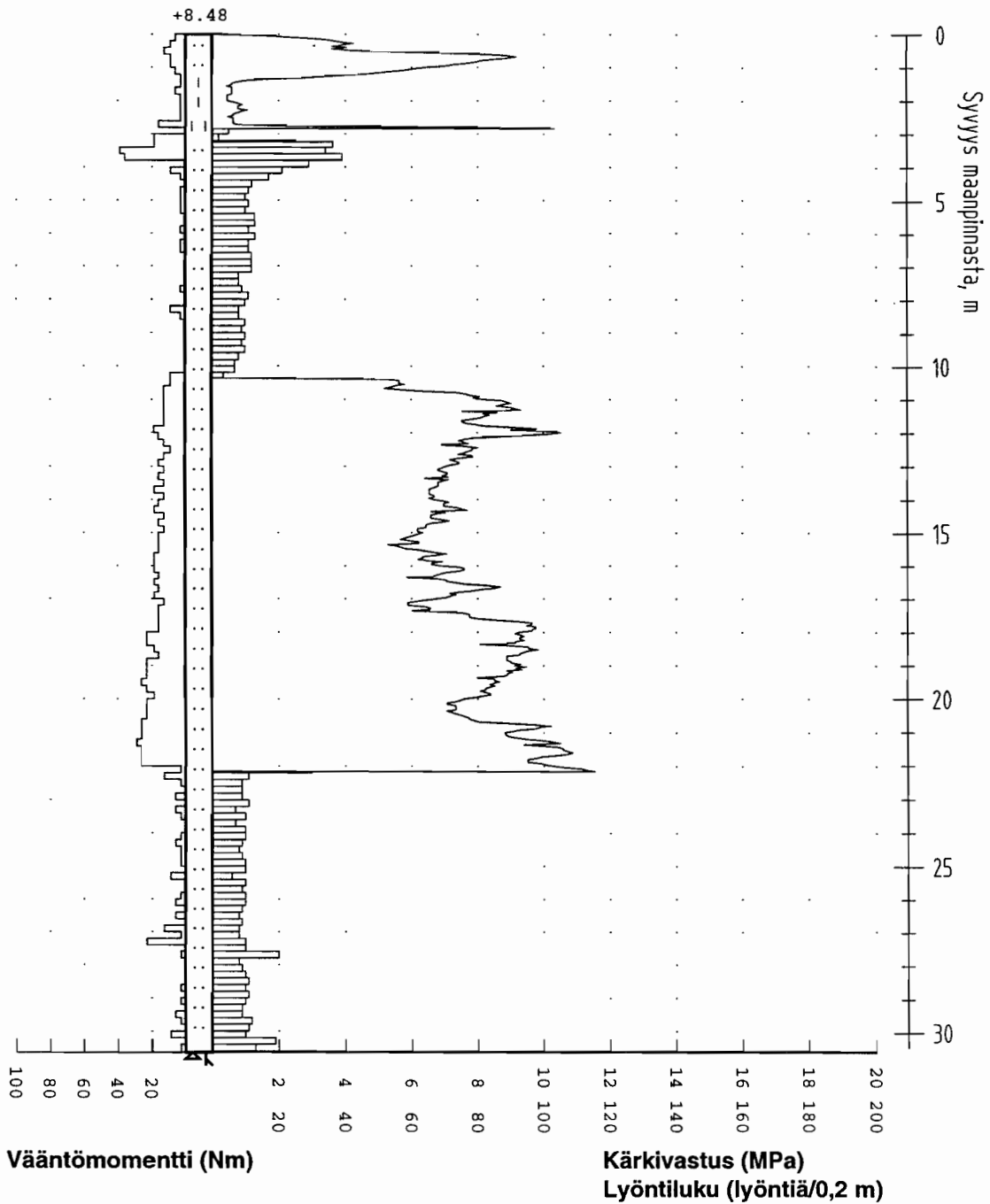
Kallvikinpuiston koealue

Kallvikinpuiston koealue Helsingin Vuosaassa on kiinteistösaakeyhtiö Kallvikinpuiston tontilla talon 1 kohdalla. Alue on kooltaan noin 40 m * 50 m. Tutkimusaineistona käytettyjen kairausten ja koepaalujen sijainnit selviävät liitteestä 1. Maanpinnan korkeus on tutkimusajana kesällä 1990 ollut alueella yleensä tasovälillä +8 – +9 m. Pohjavedenpinnan korkeustaso on samana ajanjaksona ollut havaintoputkissa noin +4 m.

Maanpinnassa on ylimpänä noin metrin paksuinen humus- ja hiekkakerros. Pintakerroksen alla on savea ja silttiä enimmillään noin 5 metrin syvyyteen. Savi- ja silttikerrosten alla on kivistä hiekkaa. Alimpana on kiviä ja lohkaraita sisältävää moreenia.

Pohjatutkimukset on tehty puristin-heijarikairauksina. Alueelle tyypillinen puristin-heijarikairausdiagrammi on esitetty kuvassa 7.1. Kiinteistösaakeyhtiö Kallvikinpuiston pohjarakennussuunnittelua varten tehtyjä, lähellä iskuaaltomitattuja paaluja sijaitsevia kairauksia on yhteensä 7 kpl. Niitä käytettiin tässä tutkimuksessa aineistona. Lisäkairauksia tätä tutkimusta varten ei pidetty tarpeellisina, koska olemassa olevissa kairauksissa mitattujen vääntömomenttien arvot jäivät pieniksi, ja paalutustyön aiheuttama tiivistyminen olisi saattanut vaikuttaa arviointituloksiin. Kairausolosuhteita voidaan pitää helppoina paalun kantavuuden arvioinnin luotettavuuden kannalta.

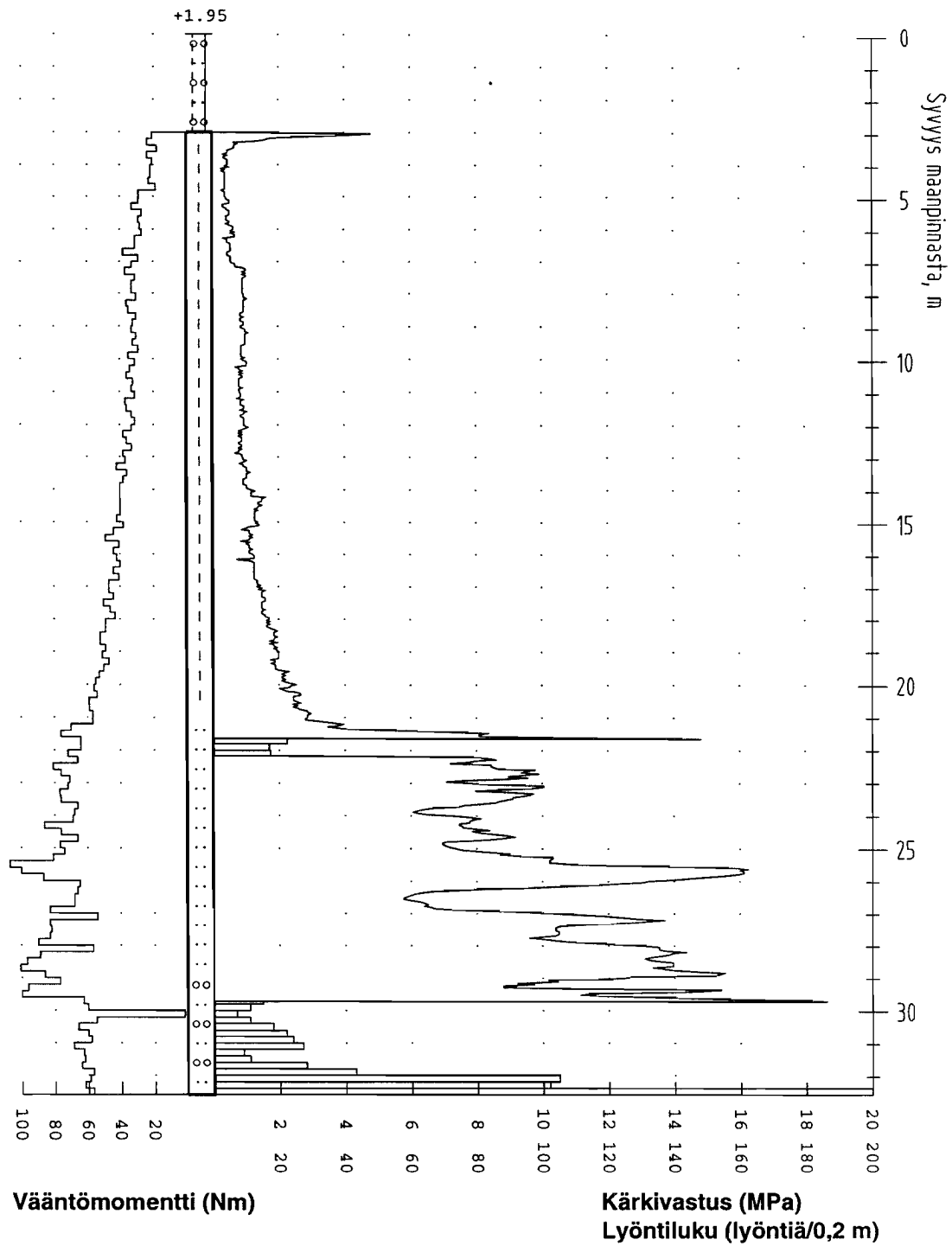
Koealueella oli tehty sivumitaltaan 300 mm:n paaluille 13 kpl iskuaaltomittauksia, jotka oli analysoitu CASE-menetelmällä. Paalulle numero 5 oli lisäksi tehty jatkoanalyysi CAPWAP-tietokoneohjelmalla. Mittaukset oli tehty 11 vuorokauden pituisen lepoajan kuluttua jälkilyönneistä. Paalutuksessa oli käytetty vapaasti putoavaa 50 kN järkälettä ja 300mm:n pudotuskorkeutta.



Kuva 7.1. Puristin-heijarikairausdiagrammi Kallvikinpuistosta pisteestä 1.

Paciuksen koealue

Paciuksen koealue Helsingin Pikku-Huopalahdessa on osittain Kiinteistöosakeyhtiö Lahdenpuiston tontilla. Alueelle tyypillinen puristin-heijarikairausdiagrammi on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2. Puristin-heijarikairausdiagrammi Paciuksen koealueelta pisteestä 2.

Tutkimusalueen koko on 30 m * 40 m. Tutkimusalueen kartta on esitetty liitteessä 2. Tutkimusalueella on maanpinnan korkeusasema tasovälillä +0,5 – +2,0 m. Ylimpänä maakerrokse-

na on noin 3 – 6 metrin paksuinen täyterkerros, joka koostuu ylijäämämassoista ja rakennusjätteestä. Täytteen alla on noin 15 metrin paksuinen, yläosaltaan liejuinen savikerros. Saven alla on siltti-, hiekka- ja moreenikerrokset, yhteispaksuudeltaan noin 12 metriä. Pohjavedenpinta on noin 0,5 – 1,0 metriä maanpinnasta.

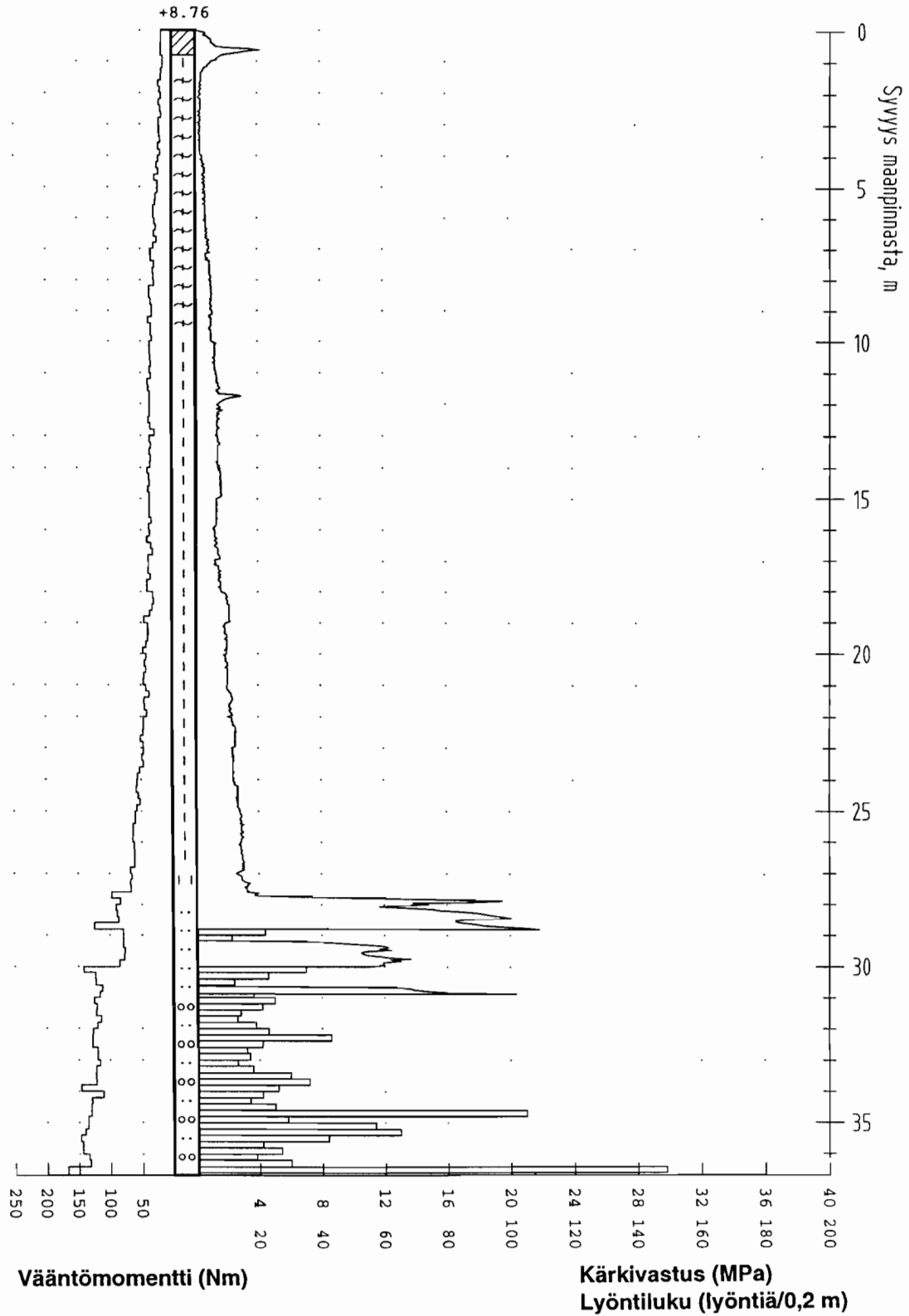
Paciuksen koepaalualueella on neljälle eri syvyydelle lyötynä 16 paalua, joille oli tehty iskuaaltomittaukset. Mittaukset oli tehty jälkilyönneistä 10 päivän pituisen lepoajan kuluttua. Kantavuus oli määritetty CASE-menetelmällä. Lisäksi yhdelle koepaalualueen ulkopuolella olevalle koepaalulle oli tehty Signal-matching -tyyppinen tietokoneanalyysi paalun toimintatavan toteamiseksi. Tutkimusalueella olevista puristin-heijarikairauksista valittiin kaksi kantavuuslaskelmiin soveltuvaa kairautta, joiden avulla paalujen kantavuutta arvioitiin suoralla menetelmällä.

Myllypellon koealue

Myllypellon koealueena on Asunto-osakeyhtiö Myllypellon tontti Helsingin Oulunkylässä. Kairauten ja paalujen sijainnit on esitetty liitteessä 3. Tontti on kooltaan 50 m * 150 m. Maanpinnan korkeus on alueella tutkimushetkellä ollut tasovälillä +7,9 – +9,3 m. Pohja- ja orsivedenpinnan tasot ovat lähellä maanpintaa ja vaihtelevat rajoissa +7,7 – +9,3 m.

Maanpinnassa on ylimpänä hiekka- ja soratäytettä noin 1,0 m paksuinen kerros. Täyte sisältää jonkin verran mm. rakennusjätettä. Täyterkerroksen alla on savista liejua ja savea 10 – 25 metriä. Savi- ja liejukerroksen alla on 2 – 5 metrin paksuinen silttikerros. Silttikerroksen alla on hiekkaa ja alimpana kiviä ja lohkareita sisältävää moreenia.

Myllypellossa pohjatutkimusmenetelminä olivat puristin-heijarikairaus ja CPT-kairaus. Alueelle tyypillinen puristin-heijarikairausdiagrammi on esitetty kuvassa 7.3. Koealueen rakennusten pohjarakennussuunnittelua varten tehtyjä kairauspisteitä oli runsaasti ja niitä käytettiin tässä tutkimuksessa vertailuaineistona, vaikka tarkkoja kairatangon vääntömomenttihavaintoja kairauten yhteydessä ei ollut tehty. Tätä tutkimusta varten Myllypellossa tehtiin viisi puristin-heijarikairautta ja kaksi CPT-kairautta.



Kuva 7.3. Puristin-heijarikairausdiagrammi.

ellon koealueelta pisteestä 6.

Puristin-heijarikairauksen aikana kairatangon vääntömomentin suuruusluokka varmistettiin

tangon jatkamisen yhteydessä momenttiavaimella jatkuvan rekisteröinnin lisäksi. CPT-kairaukset toimivat vertailukohtana laskettaessa puristin-heijarikairan nettokärkivastusta vääntömomentin avulla lähinnä puristinvaiheessa.

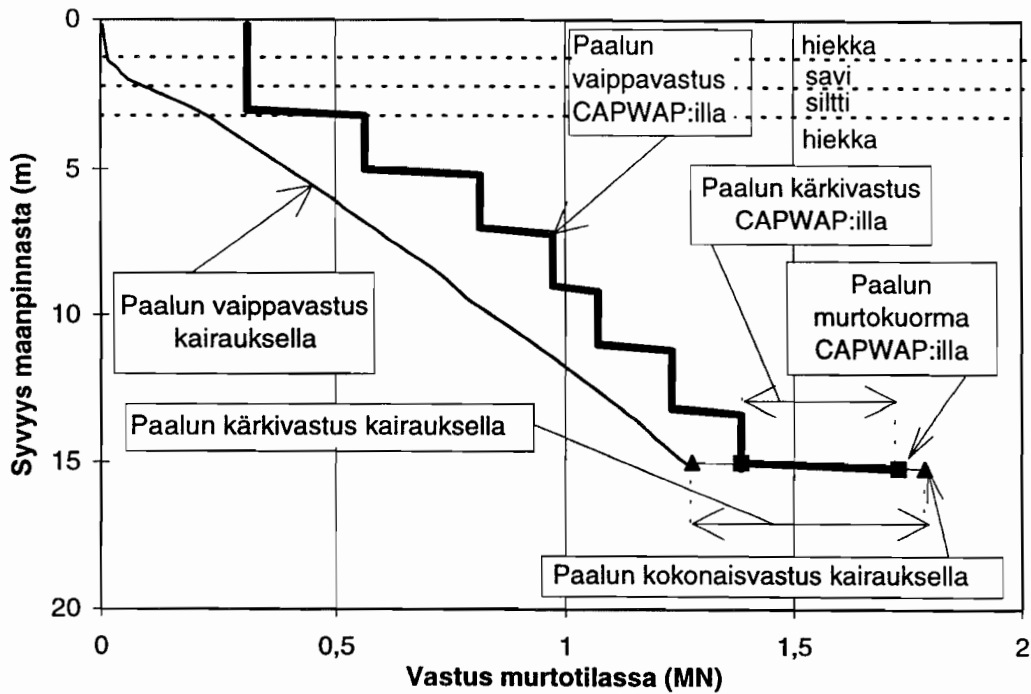
Asunto-osakeyhtiö Myllypellon alueella oli tehty iskuaaltomittauksia sivumitaltaan 350 mm:n paaluille 7 kpl, ja 300 mm:n paaluille 16 kpl. Kantavuus oli mitattu jälkilyönneistä 8 - 12 vuorokauden pituisen lepoajan jälkeen CASE-menetelmällä. Näistä vertailuaineistoksi valittiin yhteensä 16 paalua, joista neljälle oli tehty Signal-matching -tyyppinen analyysi.

7.2 Tutkimustulokset

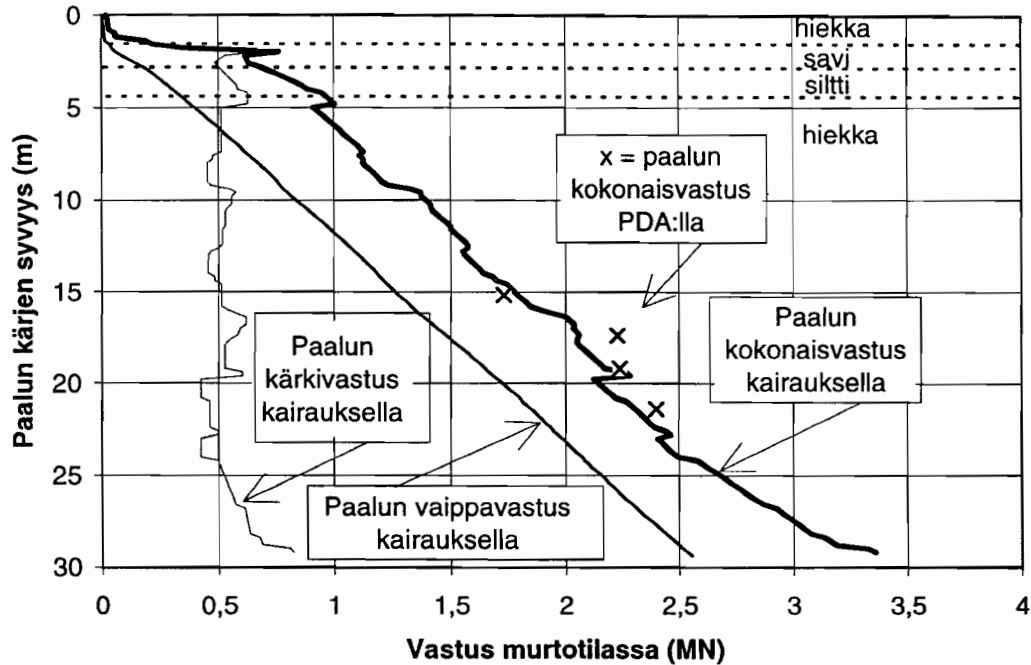
7.2.1 Kallvikinpuiston koealue

Suoralla menetelmällä tehty kantavuusarvio vastasi suuruusluokaltaan hyvin Kallvikinpuiston koealueella suoritettun CAPWAP-analyysin tuloksia sekä vaippavastuksen että kärkivastuksen osalta (kuva 7.4). Kairauksella määritetty vaippavastuskuvaaja vastasi muodoltaan hyvin CAPWAP-analyysillä määritettyä kuvaajaa. Arvioitu vaippavastuksen arvo oli pienempi, mutta kärkivastuksen arvo hieman suurempi kuin CAPWAP-analyysillä määritetyt vastukset. Paalun kantavuuden arvio puristin-heijarikairaustulosten perusteella kuvan 7.5 mukaisesti esitettynä tarjoaa suunnittelijalle monipuolista tietoa paalun kantavuudesta.

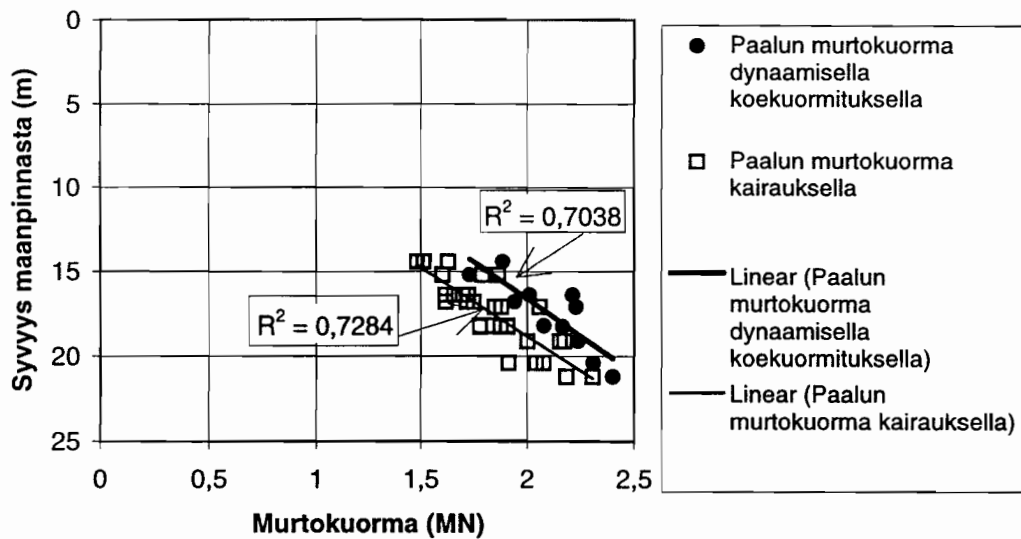
Kallvikinpuiston koealueella pohjasuhteet vaihtelevat suhteellisen vähän, ja paalut ovat tyypillisiä kitkapaaluja. Kairausten avulla suoralla menetelmällä määritettyjä kantavuuksia on vertailtu mitattuihin kantavuuksiin kuvissa 7.6 ja 7.7. Kallvikinpuiston koealueella kairaustuloksiin perustuva paalujen kantavuusarvio vastaa hyvin iskuaaltomittauksilla määritettyjä kantavuuksia, ja arviointivirheet painottuvat varmalle puolelle. Havaintojoukkoihin sovitettut suorat ovat yhdensuuntaisia, joten syvyydellä tai murtokuorman arvolla ei tässä tapauksessa ole vaikutusta kantavuusarvioiden virheen suuruuteen. Paalujen ja kairauspisteiden väliset etäisyydet ovat 2 – 27 metriä. Suoralla menetelmällä arvioidut murtokuormat olivat keskimäärin noin 12 % alle iskuaaltomittauksilla määritettyjen arvojen. Arviot poikkesivat mitatuista alaspäin enimmillään 27 % ja ylöspäin 8 %.



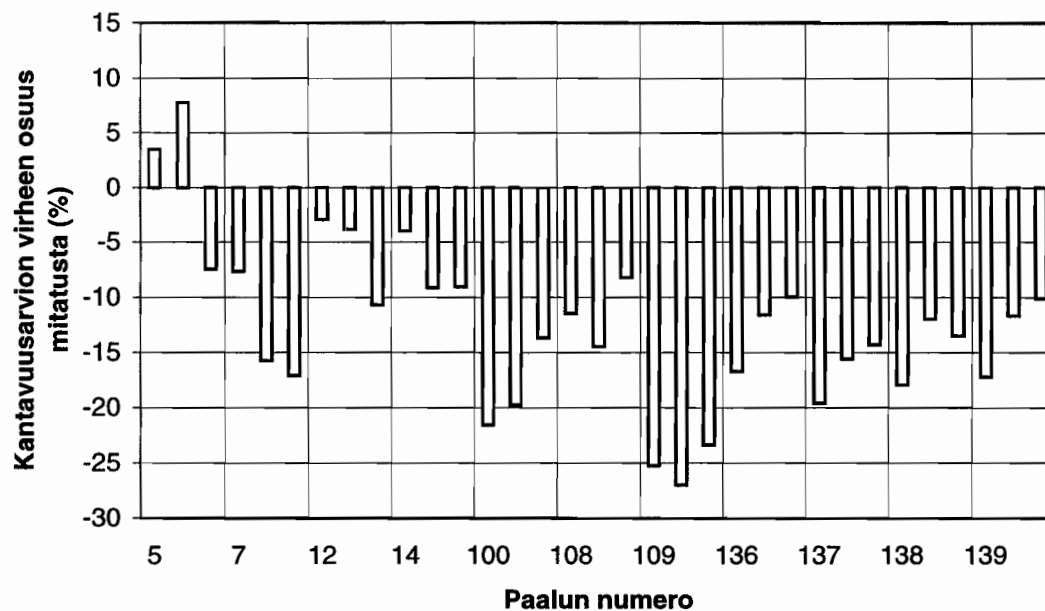
Kuva 7.4. Puristin-heijarikairausvastuksen perusteella määritetty CAPWAP:in esitystavan mukainen kantavuusjakauma verrattuna CAPWAP-analyysin tulokseen.



Kuva 7.5. Paalun vaippa-, kärki- ja kokonaisvastukset määritettynä puristin-heijari-kairausvastuksen perusteella sekä iskuaaltomittauksella määritetyt kokonaisvastukset.

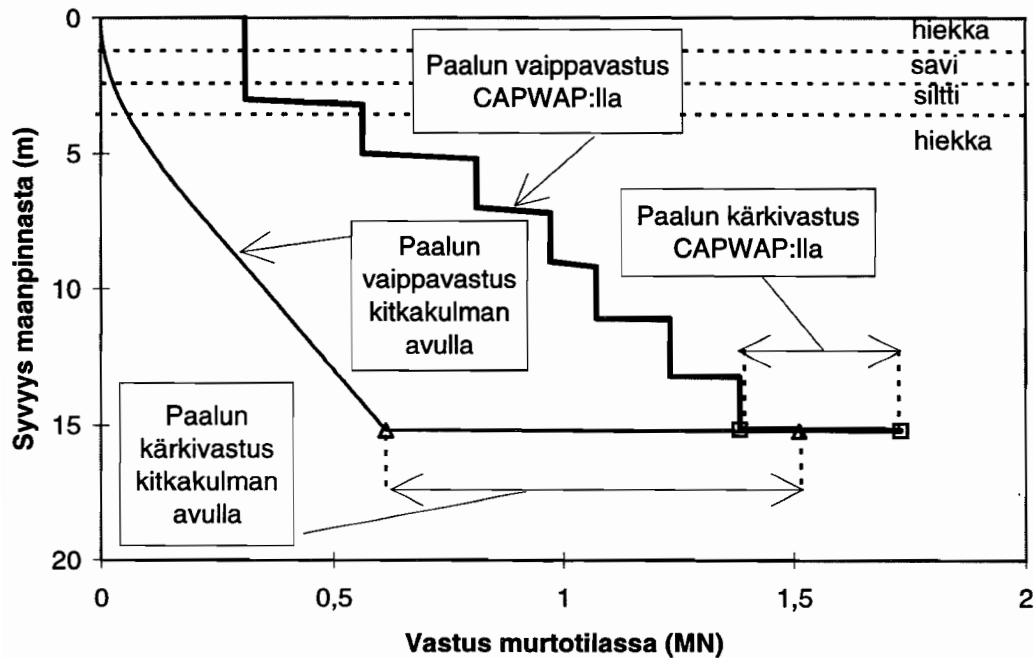


Kuva 7.6. Paalun kantavuuden arviot ja mitatut arvot Kallvikinpuistossa.



Kuva 7.7. Paalujen kantavuusarvion virhe verrattuna mitattuihin kantavuuksiin. Jokaista paalua kohti on tehty kantavuusarvio kolmen lähimmän kairauksen perusteella.

Kitkakulman avulla epäsuoralla menetelmällä määritettyä paalun kantavuutta verrattiin Kallvikinpuiston koalueella tehdyn CAPWAP-analyysin tuloksiin (kuva 7.8).

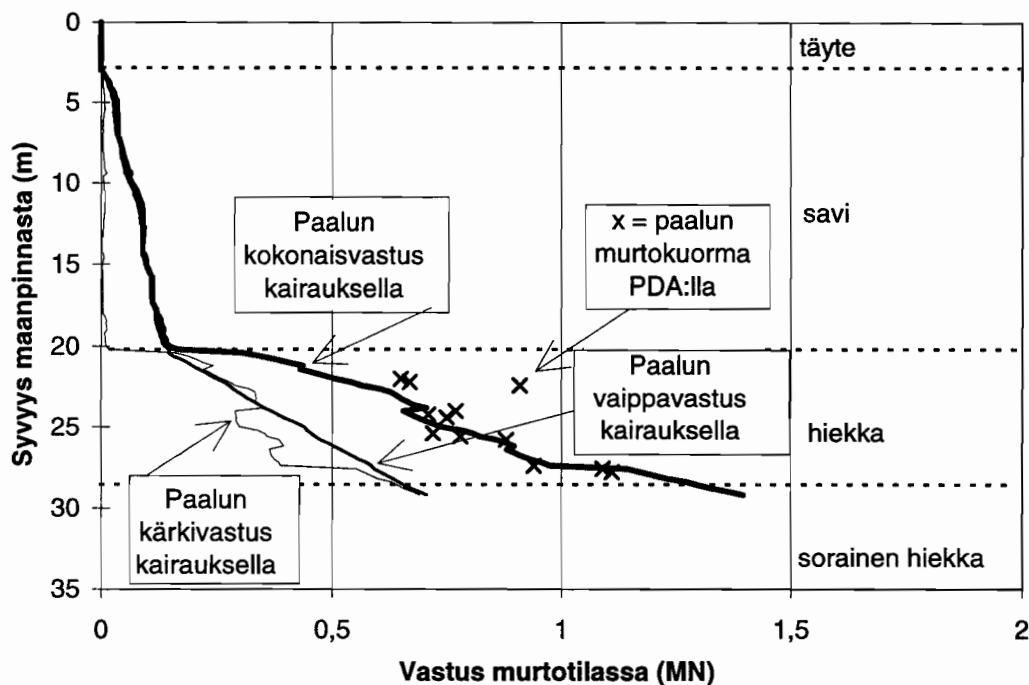


Kuva 7.8. Kitkakulman perusteella arvioitu paalun kantavuusjakauma ja kairauspisteen lähellä sijaitsevan paalun CAPWAP-analyysi.

Vertailun perusteella epäsuora menetelmä ei tässä tapauksessa sovellu käytettäväksi puristin-heijarikairaustulosten yhteydessä yhtä hyvin kuin suora menetelmä. Vaikka kokonaiskantavuus poikkeaa vain vähän suoralla menetelmällä ja CAPWAP:illa saaduista arvoista, ovat vaippa- ja kärkivastuksen suhteelliset osuudet erilaiset. Vaippavastuskuvaajan muoto poikkeaa vertailukuvaajasta ja aliarvioi vaippavastusta huomattavasti. Kärkivastuksen suuruus on puolestaan yliarvioitu. Syynä epäsuoralla menetelmällä saatujen tulosten epätarkkuuteen voi olla maan sisäisen kitkakulman arviointivirheet kairaustulosten perusteella (Heinonen & Hartikainen 1996) ja kitkakulman määrittämenetelmän vaikutus arvion suuruuteen (luku 4.2). Pienikin ero kitkakulman suuruudessa vaikuttaa voimakkaasti paalun arvioidun murtokuorman suuruuteen (Slunga 1974). Esimerkiksi kuvan 7.8 tapauksessa 2 asteen lisäys kitkakulman suuruudessa johtaisi kokonaisvastuksen yliarvioimiseen.

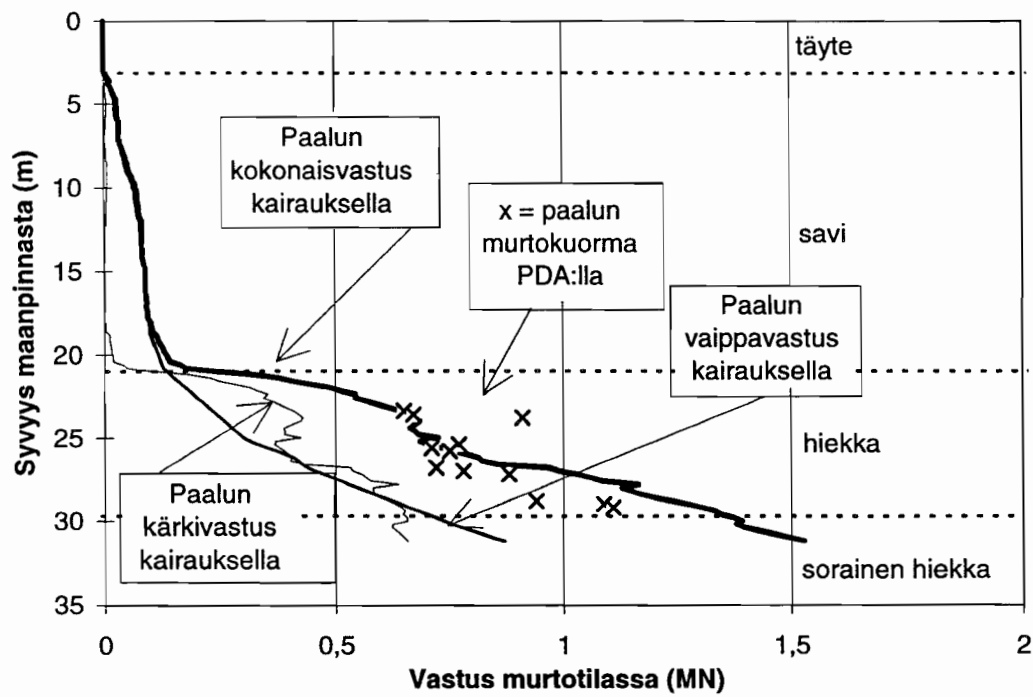
7.2.2 Paciuksen koalue

Paciuksen koalueella kairausdiagrammit eri pisteissä olivat hyvin samantyyppisiä, koska pohjasuhteet ovat tasaiset. Koepaalut oli lyöty neljään eri syvyyteen siten, että kussakin syvyydessä oli kolme paalua. Kuvissa 7.9 ja 7.10 on esitetty kairausten perusteella arvioidut kantavuuskäyrät ja mitatut kantavuudet.

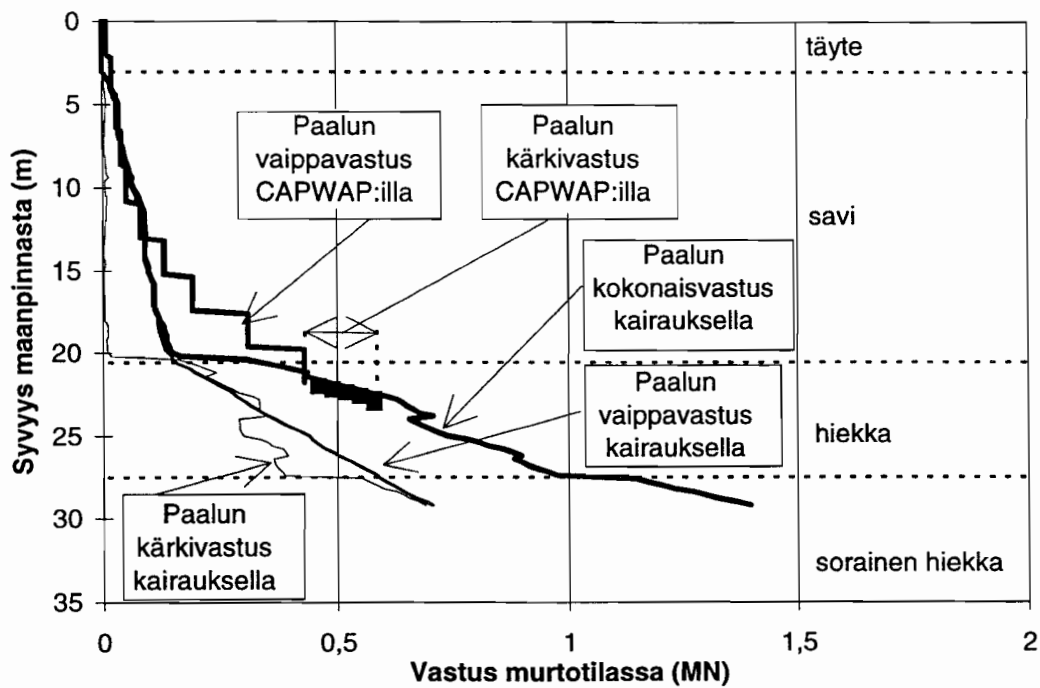


Kuva 7.9. Puristin-heijarikairauspisteen 1 perusteella arvioitu kantavuuskäyrä ja mitatut kantavuudet.

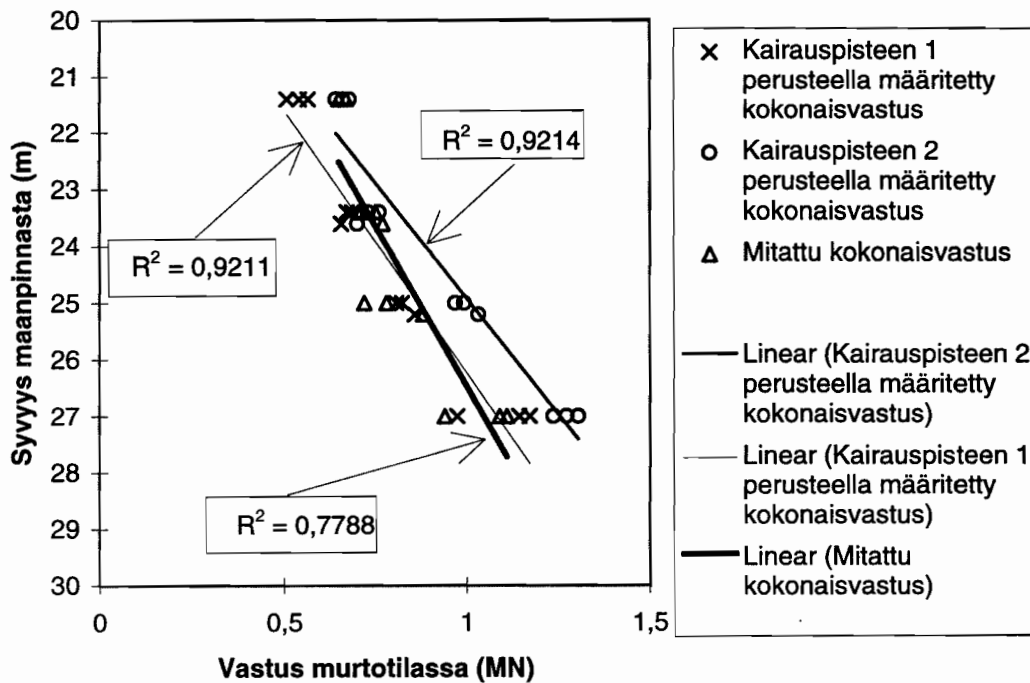
Paalujen arvioitu kokonaisvastus noudattelee mitattujen havaintojen parvea hyvin pisteessä 1 (kuva 7.9). Pisteessä 2 syvimpien kolmen paalun kohdalla arvio on hieman mitattuja arvoja suurempi, mikä saattaa johtua maakerrosrajojen korkeusvaihteluista (kuva 7.10). Kuvassa 7.11 on paalulle A240 tehty Signal-matching-tyyppinen analyysi. Analyysin tulos vastaa kantavuusarviota suuruudeltaan hyvin ja vaippavastuskuvajat ovat muodoltaankin kohtuullisen lähellä toisiaan. Paciuksen koalueella pohjasuhteet vaihtelevat suhteellisen vähän, ja paalut olivat tyypillisiä kitkapaaluja. Kairausten avulla suoralla menetelmällä määritettyjä kantavuuksia on vertailtu mitattuihin kantavuuksiin kuvassa 7.12. Kairaustuloksiin perustuva paalujen kantavuusarvio vastaa hyvin iskuaaltomittauksilla määritettyjä kantavuuksia.



Kuva 7.10. Puristin-heijarikairauspiste 2 perusteella arvioitu kantavuus ja mitatut kokonaisvastuksen arvot.



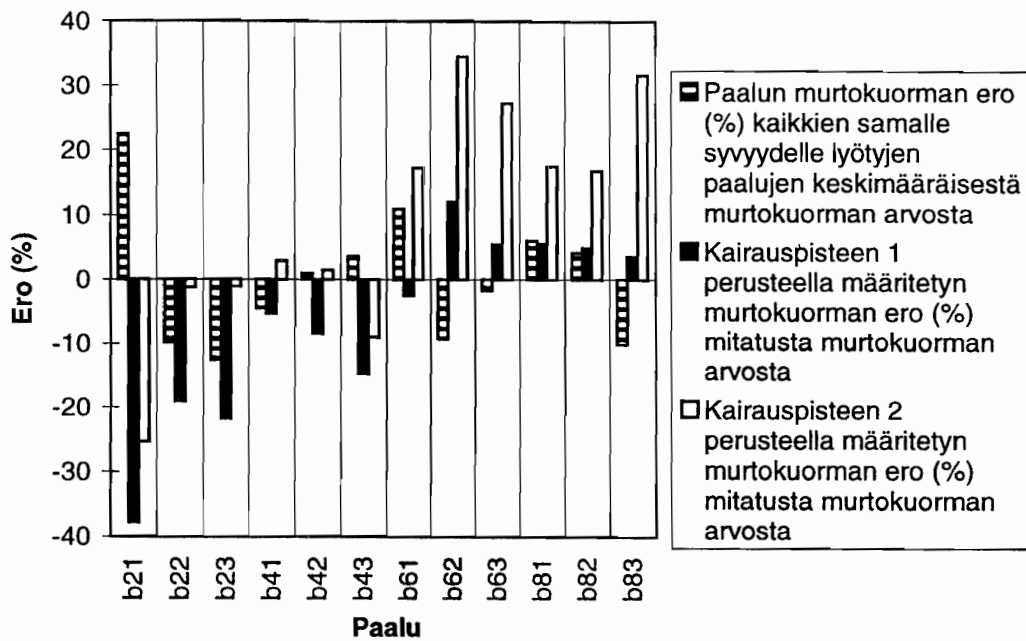
Kuva 7.11. Paalun kantavuusarvio ja Signal-matching -analyysi Paciuksen koealueelta.



Kuva 7.12. Paalun kantavuusarviot ja mitatut arvot Paciuksen koealueella.

Kuvassa 7.13 on esitetty paalun mitatun kantavuuden ero (%) kaikkien samaan syvyyteen lyötyjen paalujen keskimääräiseen kantavuuteen verrattuna. Vertailuaineistona käytettyjen iskuaaltomittaustulosten virhemarginaali on välillä -13 – +22 %. Samassa kuvassa on esitetty myös kairauksen perusteella arvioitujen murtokuormien ero mitattuihin arvoihin. Ero on keskimäärin noin 1 % vaihdellen välillä -38 – +34,5 %.

Kuvasta 7.13 nähdään että suurimpien arviointivirheiden kohdalla myös mitatun arvon ero muihin vastaaviin paaluihin on suuri. Kairauspisteiden ja koepaalujen välinen etäisyys on välillä 10 – 27 metriä, ja tämän vaikutusta tuloksiin on vaikea arvioida. Eri kairuksien perusteella arvioidut murtokuorman arvot poikkeavat kuitenkin toisistaan enemmän kuin samalle syvyydelle lyötyjen paalujen mitatut kantavuudet. Toisaalta paalujen keskinäiset etäisyydet ovat huomattavasti pienempiä kuin etäisyydet kairauspisteisiin.

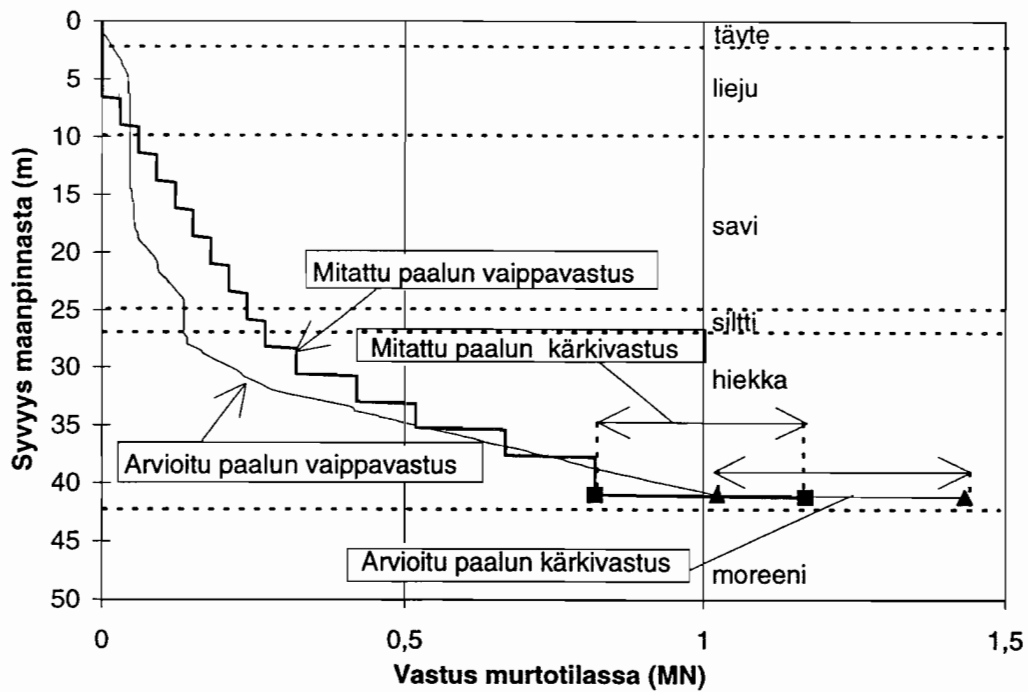


Kuva 7.13. Paalujen kantavuusarvioiden ero verrattuna mitattuihin kantavuuksiin.

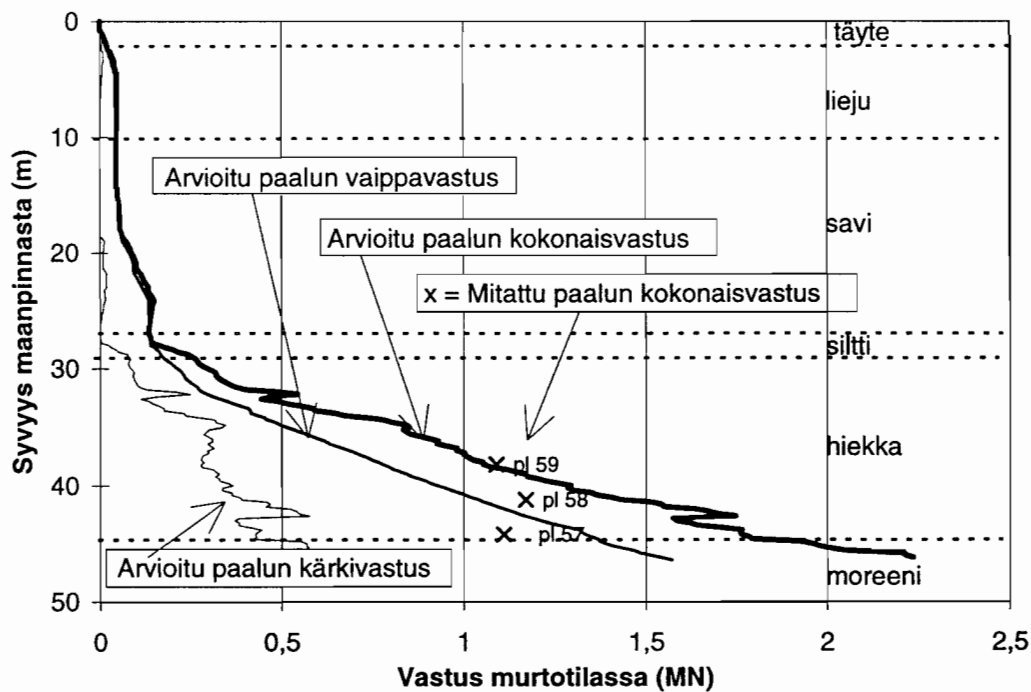
7.2.3 Myllypellon koalue

Paalujen kantavuuksia arvioitiin kairausten perusteella suoralla menetelmällä, ja niitä verrattiin dynaamisilla koekuormituksilla määritettyihin staattisen murtokuorman arvoihin. Myllypellon koalueella tutkimusmateriaalina käytettiin sekä vanhoja, pohjarakennussuunnittelua varten tehtyjä puristin-heijarikairauspisteitä, että tätä tutkimusta varten tehtyjä puristin-heijarikairauksia. Lisäksi tehtiin joitakin CPT-kairauksia, joilla testattiin puristin-heijarikairan momenttimittaukseen perustuvaa nettokärkivastuksen määrittämenetelmää. Menetelmä ja tulokset on esitetty luvussa 4.

Kuvassa 7.14 on esitetty poikkileikkaukseltaan 0,3 m * 0,3 m paalun 58 kantavuusarvio kairauspisteen 4 perusteella ja Signal-matching-menetelmään perustuvalla ohjelmalla simuloituna. Vaippavastuksen arvio myötäilee mitattuja arvoja kohtuullisen hyvin, ja kärkivastuksen arvotkin ovat lähellä toisiaan. Kuvassa 7.15 on kaikkien samaan paaluryhmään kuuluvien paalujen mitatut kokonaisvastukset ja arvioidut vastukset.



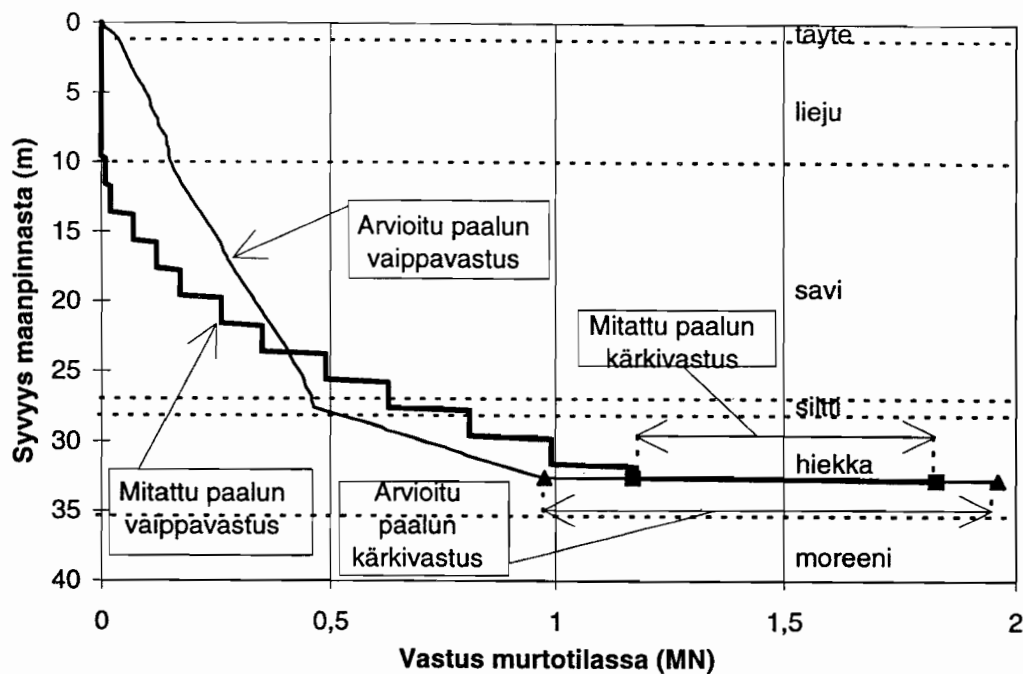
Kuva 7.14. Kairauspisteen 4 perusteella arvioitu vaippa- ja kärkivastuskuvaaja sekä vastaava Signal-matching-analyysi.



Kuva 7.15. Pisteen 4 perusteella määritetyt vaippa-, kärki- ja kokonaisvastuskuvaajat sekä läheisille paaluille iskuaaltomittauksella määritetyt kantavuudet.

Kuvasta 7.15 nähdään, että paalujen mitattu kokonaisvastus korreloi erittäin heikosti syvyyden kanssa. Tämä vaikeutti kantavuusarvioiden ja mitattujen arvojen vertailua Myllypellon koealueella muissakin pisteissä. Syynä ilmiöön saattaa olla pohjasuhteiden voimakas vaihtelu tai paalujen lyönnistä johtuva tiivistyminen, mikä lyöntijärjestyksestä riippuen voi aiheuttaa vierekkäisille paaluille erisuuruisia kantavuudenlisäyksiä. Ensin syvemmälle lyöty paalu voi tiivistää maakerroksia niin, että seuraava paalu saavuttaa saman kantavuuden jo ylempänä.

Kuvassa 7.16 on pisteen 6 perusteella arvioitu kantavuus paalulle 16, jonka sivumitta on 350 mm. Arvio on lähellä tietokoneanalyysin tuloksia. Vaippavastusta on jonkin verran aliarvioitu ja kärkivastusta hieman yliarvioitu päinvastoin kuin paalun 58 tapauksessa.



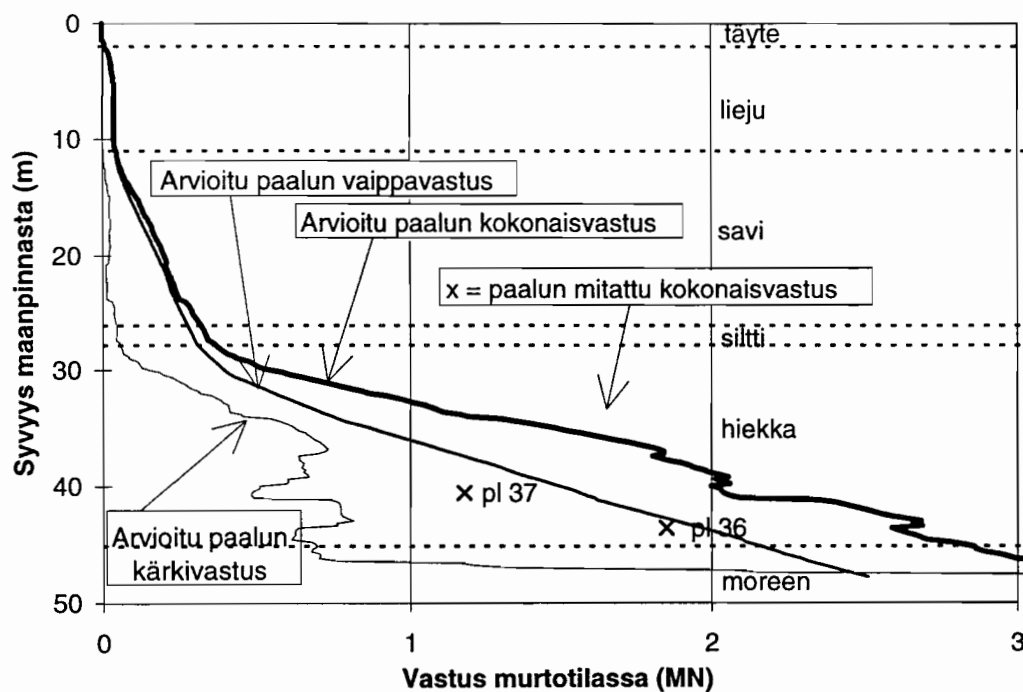
Kuva 7.16. Kairauspisteen 6 perusteella arvioidut vaippa-, kärki- ja kokonaisvastuskuvaajat sekä vastaava Signal-matching -analyysi paalusta 16.

Kuvassa 7.17 on kairauspisteen 3 perusteella arvioituna paalun kantavuus ja lähellä olevien paalujen iskuaaltomittaukset. Tässä tapauksessa kokonaisvastusta on kairauksen perusteella huomattavasti yliarvioitu. Syy on selvästi ainakin vaippavastuksen yliarvioiminen, koska se ylittää jo itsessään mitattujen kokonaisvastusten arvot. Arvioitu kokonaisvastuskäyrä on

kuitenkin yhdensuuntainen mitattujen arvojen muodostaman linjan kanssa, joten kumuloituvan vaippavastuksen arviointivirhe on luultavasti tapahtunut ylemmissä maakerroksissa.

Kuvassa 7.18 on vertailun vuoksi arvioitu samojen paalujen kantavuutta läheisen, ennen paalutusta tehdyn puristin-heijarikairauksen numero 634 perusteella. Käytetyn koneen kalibrointia ei ollut suoritettu, joten kairaustuloksia käytettiin kantavuudenarviointiin ilman puristusvoiman ja vääntömomentin korjauskertoimia.

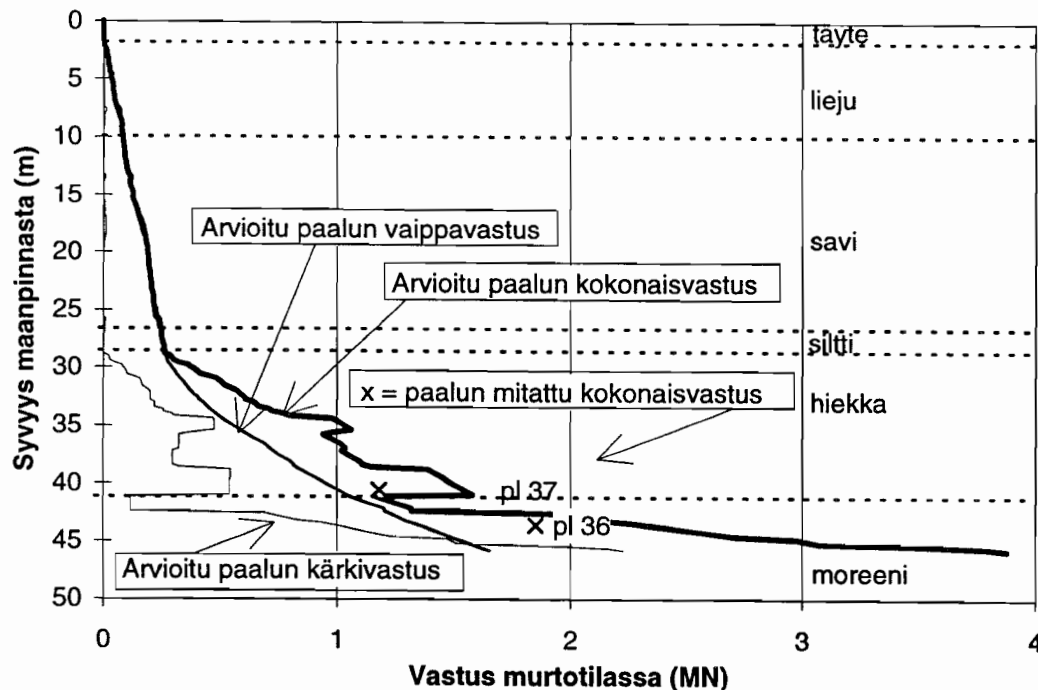
Kuvassa 7.18 kantavuusarvio on hyvin lähellä mitattuja arvoja. Arvioitujen kärkivastusarvojen vaihtelu on voimakkaampaa kuin paalutuksen jälkeen tehtyjen kärkivastusarvioiden kuvaajissa. Paalutus on ilmeisesti tiivistänyt löyhiä kerroksia enemmän kuin tiiviitä.



Kuva 7.17. Kairauspisteen 3 perusteella arvioitu vaippa-, kärki- ja kokonaisvastus sekä läheisistä paaluista mitatut murtokuorman arvot.

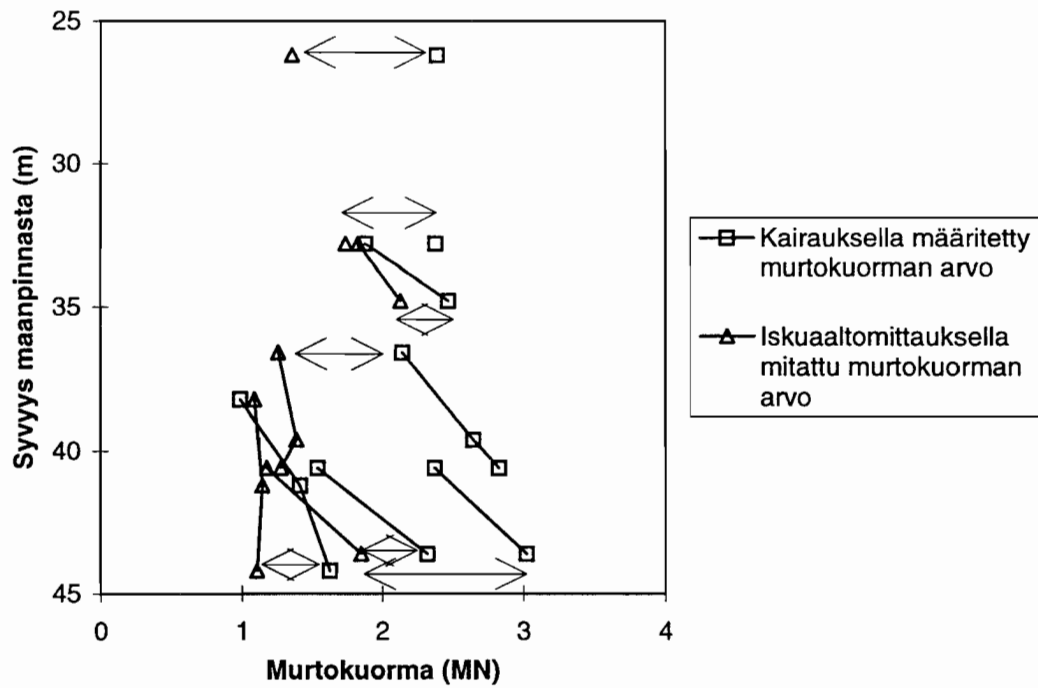
Kuvassa 7.19 on esitetty kaikki Myllypellon arviointi- ja mittaustulokset. Samaan paaluryhmään kuuluvat arvot on yhdistetty yhtenäisellä viivalla. Mitatun ja arvioidun murtokuorman eroa paaluryhmittäin on kuvattu kaksipäisellä nuolella. Mitatut ja arvioidut murtokuorman

arvot eivät edelläkuvattujen syiden vuoksi juurikaan kasva 20 metrin matkalla. Tällaisissa olosuhteissa on paalun tavoitetaso syytä arvioida suoraan kairausten päättymissyvyyden mukaan.

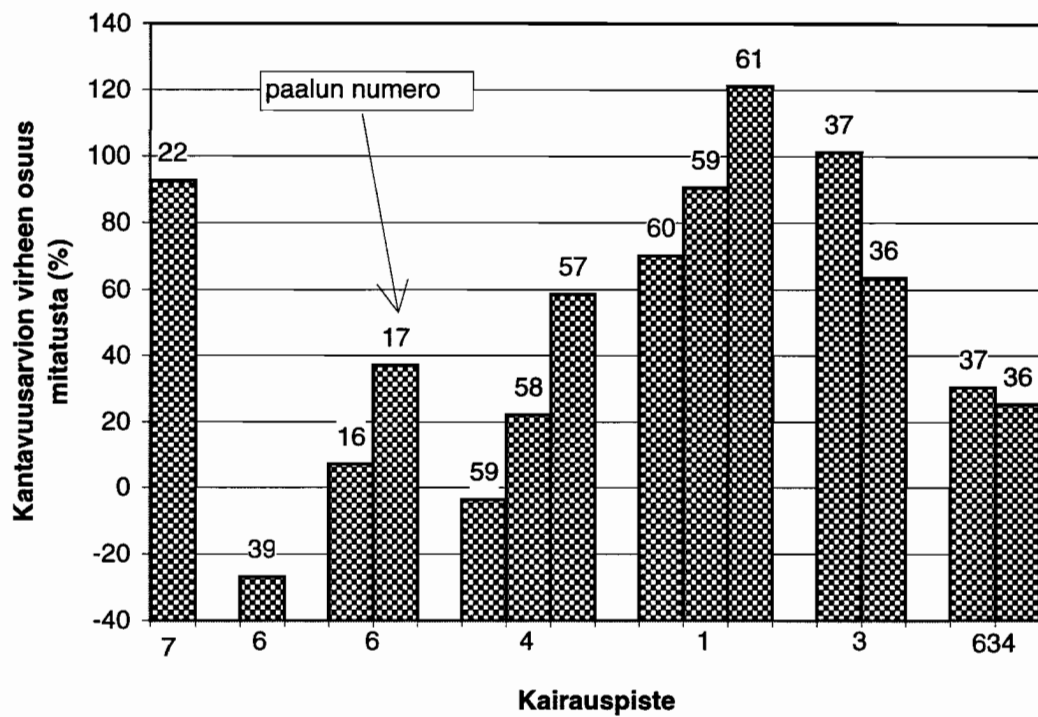


Kuva 7.18. Ennen paalutusta tehdyn kairauksen numero 634 perusteella arvioitu kantavuus ja mitatut arvot kairauspisteen 3 lähellä.

Kuvassa 7.20 on esitetty arvioidun murtokuorman virheen suuruus iskuaaltomittauksella määritettyyn kokonaisvastukseen nähden Myllypellon koealueella. Suurin osa paalujen murtokuormista on yliarvioitu verrattuna mitattuihin arvoihin. Arvioidut murtokuorman arvot ovat keskimäärin 49% mitattuja arvoja suuremmat. Erot arvioitujen ja mitattujen arvojen välillä vaihtelevat 26%:sta 121%:iin. RIL-121:n (1988) mukaan kokonaisvarmuusluvun minimiarvo on $F = 2,2$, kun paalun kantavuutta arvioidaan koepaalutuksen ja kairausvastuksen perusteella. Suurintakin eroa vastaava kantavuus on lähellä mitattua arvoa, jos arvioitu murtokuorman arvo jaetaan tällä varmuusluvun minimiarvolla. Varmuusluvulla 2,5 jaettuna kaikki arvot ovat selvästi alle mitattujen. Tässä tarkastelussa mitattujen murtokuorman arvojen oletetaan sinällään ilman varmuuskertoimia vastaavan keskimäärin todellista murtokuorman arvoa.



Kuva 7.19. Myllypellon koealueella arvioidut ja mitatut murtokuorman arvot.



Kuva 7.20. Kantavuusarvion virheen osuus mitatusta arvosta Myllypellon koealueella.

Myllypellon koealueella pisteessä 7 kairaus ei ulottunut riittävän syvälle pohjasuhteiden jyrkistä vaihteluista johtuen, joten paalun 23 kantavuutta ei pystytty arvioimaan kairauspisteessä 7 tulosten avulla. Toisaalta kairauspisteen siirtäminen lähemmäksi paalua olisi saattanut aiheuttaa kantavuuden yliarvioimisen paalutustyön aiheuttaman tiivistymisen vuoksi.

8 KANTAVUUSARVION TARKKUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Nykyinen kairauslaitteisto mahdollistaa teknisesti tankovastuksen määrittämisen riittävällä tarkkuudella paalun kantavuuden määrittämistä varten. Sen sijaan puristin-heijarikairan nettokärkivastuksen määrittäminen paksuissa pehmeissä savikerroksissa on ongelmallista mittaustuloksiin ja määritysmenetelmään liittyvien epätarkkuustekijöiden vuoksi. Tällaisissa tapauksissa hydraulipaineeseen perustuvalla momenttimittauksella määritetty tankovastus voi olla moninkertainen kärkivastukseen verrattuna. Kun tankovastuksen osuus on yli 90 % kokonaiskairausvastuksesta tai kokonaislyöntiluvusta, saattaa kärkivastus hävitä mittauksen epätarkkuudesta aiheutuvaan kohinaan, eikä kärkivastuksen arvoa enää voida pitää luotettavana. Toisaalta nettokärkivastuksen suuruus voi olla samaa luokkaa kuin koneen nolla-asetuksen tarkkuus käytännössä (0...0,3 kN). Tätä pienempien nettokärkivastuksien määrittäminen tarkasti ei puristin-heijarikairalla tällä hetkellä ole mahdollista eikä tarpeenkaan, jos on mahdollista käyttää CPT-kairaa tai siipikairaa puristin-heijarikairan ohella.

Laboratoriotutkimuksissa todettiin, että kairauksessa käytetty irtokärki ei pyöri tankojen mukana. Vääntömomentin avulla määritetty tankovastus tulee siis kokonaan tangon vaipalta. Laskennallisena momenttivartena käytetään siksi tankojen sädettä $r = 0,016$ m aikaisemmin käytetyn kärjen säteen $r = 0,022$ m sijasta.

Momentin mittaustarkkuutta voidaan mahdollisesti parantaa käyttämällä venymäliusmatekniikkaa, jota käytetään jo puristusvoiman mittauksessa. Näin päästään eroon puristusvoiman aiheuttamasta pyörityslaitteiston sisäisen kitkan arvioinnista ja hydraulioöljyn lämpötilavaihteluista johtuvista mittausepätarkkuuksista. Puristusvoiman mittaustarkkuutta on vaikea lisätä, eikä siitä käytännössä olisi hyötyäkään muiden nettokärkivastuksen määrittämiseen liittyvien epätarkkuustekijöiden vuoksi.

Signal-matching-menetelmään perustuvalla jatkoanalyysillä saadaan selville paalun vaippa- ja kärkivastuksen osuus. Tavanomaisissa paalutuskohteissa tehdään usein vain yksi kitkapaalun iskuaaltomittauksen jatkoanalyysi dynaamisen vaimennuskertoimen määrittämiseksi. Tällöin saadaan vain yhden tietyllä syvyydellä lyödyn kitkapaalun vaippavastuksen jakauma ja kärkivastuksen suuruus paalun kärjen syvyydellä mittaushetkellä. Kairausvastuksen

perusteella sen sijaan saadaan paalun kantavuudesta monipuolista tietoa jatkuvien vaippa-, kärki- ja kokonaisvastuskuvaajien muodossa maan pinnasta lähes kairauksen päättymissyvyyyteen saakka useiden kairauspisteiden kohdalla. Näitä tietoja voidaan käyttää paalun kantavuuden arvioinnissa, eri pituisten paalujen toimintatavan tutkimisessa sekä arvioitaessa paalun poikkileikkauksen vaikutusta paalutuksen tavoitetasoon ja kustannuksiin.

Kärkivastuksen ja etenkin lyöntiluvun voimakkaat vaihtelut, kairajaan kivihavainnot ja samassa yhteydessä tapahtuva vääntömomentin lisääntyminen hyppäyksittäin saattavat olla merkinä kairatangon poikkeamisesta pois alkuperäisestä suunnastaan. Tällaisessa tilanteessa momenttiarvot jäävät koholle muodostaen vääntömomenttikuvaajaan portaan. Myllypellon koealueella tällainen porras on havaittavissa kairauspisteen 6 kuvaajassa 30 metrin syvyydellä maanpinnasta (kuva 7.3). Tällaisen taipumisen vaikutusta on vaikea huomioida nettoarvojen määrittämisessä, jos tanko nurjahtaa puristettaessa tai lyötäessä kairareiän seinämiä vasten.

Puristinkairauksessa tangon taipumisesta aiheutuva virhe ei ehkä ole merkittävä, koska periaatteessa vääntömomentti kasvaa tangon hirtäessä kairareiän seinämää entistä tiiviimmin, ja tankovastus tulee näin huomioitua. Tangon suunnanmuutoksen jälkeen heijarikairaukseen siirryttäessä ongelma on monimutkaisempi, sillä lyöntienergiaa häviää tangon nurjahtamisesta ja epäkeskisestä lyönnistä aiheutuvaan sivuttaiseen liikkeeseen, jolloin lyöntiluku virheellisesti kasvaa. 200 mm välein tapahtuva vääntömomentin rekisteröinti ei anna luotettavaa kuvaa lyönnin aikana tapahtuvista vääntömomenttiarvojen muutoksista, eikä tässä työssä käytetty nettolyöntiluvun määrittäminen ole luotettava.

Hiekassa tankokitkaa ei todettu juurikaan syntyvän laboratoriotutkimuksessa eikä Kallvikin ja Paciuksen koealueiden hiekkakerroksissa. Myllypellon koealueella vääntömomentin arvot sen sijaan kasvoivat kitkamaakerroksissa poikkeuksetta. Kitkamaassa vääntömomentin kasvu saattaa johtua kivistä, jolloin varsinkin heijarikairaustuloksien luotettavuus saattaa heikentyä.

Kairaukseen perustuva kantavuusarvio kertoo paalun murtokuorman tietyllä varmuudella ainoastaan paaluryhmän ensimmäiselle paalulle kairauspisteen kohdalta. Arvion luotettavuus pienenee etäisyyden ja paaluryhmän koon kasvaessa. Kriittisen etäisyyden määrittymiseen vaikuttaa pohjasuhteiden vaihtelevuus. Mitä lähempänä paalun kärkeä on kova, jyrkästi

vaihteleva maakerros, sitä pienempi on kriittinen etäisyys kairauspisteestä.

Paalun kärki- ja vaippavastuksen arvioinnin virhelähteet poikkeavat osittain toisistaan. Kärkivastuksen suuruus saattaa vaihdella jyrkästi syvyyden mukaan. Tämän vuoksi sekä paalun kärjen että kairakärjen syvyysmittauksen tarkkuuden vaikutus korostuu kärkivastusarvion luotettavuutta tutkittaessa. Tässä tutkimuksessa paalun kärjen taso iskuaaltomittausketkellä on ilmoitettu vähintään 0,1 metrin tarkkuudella, mitä voidaan pitää riittävänä.

Tutkimustuloksiin aiheuttaa virhettä vertailuaineistona käytetyn iskuaaltomittauksen epätarkkuus ja mittausajankohta. Myllypellon koealueella yksi paalu mitattiin uudelleen kahden viikon kuluttua edellisestä mittauksesta, jolloin paalun kantavuus oli kasvanut 10 %. Valmiin rakenteen aiheuttamaan kuormitustilanteeseen verrattuna dynaamisen koekuormituksen antamat arvot ovat tältä osin varmallalla puolella, koska mittauksen jälkeistä kantavuuden kasvua on vaikea huomioida. Iskuaaltomittauksen tulokseen vaikuttaa myös, monennestako jälkilyönnistä mittaus on tehty, sillä kitkapaalu saattaa irrota jo ensimmäisellä lyönnillä. Jos ensimmäisestä lyönnistä ei saada mitattua, saattaa seuraavasta lyönnistä mitattu kantavuus jo olla pienempi. Tämän tutkimuksen kannalta vertailuarvoja voidaan kuitenkin pitää näiltä osin oikeansuuruisina, koska tarkoituksena on ollut verrata saatuja arviointituloksia nimenomaan iskuaaltomittauksilla määritettyihin kantavuusarvoihin.

9 SUOSITUKSET

Suoraa paalun kantavuuden arviointimenetelmää käytettäessä laskenta kannattaa suorittaa tietokoneella. Tässä tutkimuksessa laskennassa käytettiin Microsoft Excel 5.0 -taulukkolaskentaohjelmaa.

Kairaustuloksiin perustuvaa kantavuuden arviointimenetelmää käytetään varovaisen keskiarvon periaatteen mukaisesti siten, että useiden kairausten perusteella määritettyjen kantavuusarvioiden joukosta valitaan edustavat, varmalla puolella olevat arviot. Paalujen tavoitetason määrittämisessä kokonaisvastuskäyrän vaakasuorilta osuuksilta saadaan tavoitetasot määritettyä luotettavimmin. Muutenkin kärki- ja vaippavastusten suhteellisia osuuksia kokonaisvastuksesta tulee seurata, ja kannattaa kokeilla myös sivumitoiltaan erilaisia paaluja.

Tässä tutkimuksessa käytetty arviointimenetelmä ei huomioi negatiivisen vaippahankauksen aiheuttamaa kantavuuden pienenemistä, kuten ei iskuaaltomittauskaan. Kantavuuslaskelman kuvaajaa on koheesiomaakerroksissa syytä pitää vain suuntaa antavana negatiivisen vaippahankauksen suuruuden arvioinnissa. Hyvin pehmeissä kerroksissa saadaan negatiivinen vaippahankaus luotettavimmin määritettyä siipikairaustulosten perusteella. Suunnittelijan tehtävänä on arvioida negatiivista vaippahankausta aiheuttavan kerroksen paksuus.

Sellaisia kairauksia, joissa nettokärkivastuksen arvoja ei voida pitää luotettavina kairatangon huomattavasta käyristymisestä tai muusta syystä johtuen, ei pidä käyttää paalun kantavuuden arvioimiseen. Tankojen mahdollista käyristymistä on seurattava kairauksen yhteydessä tehtävillä havainnoilla ja tuloksia tulkittaessa momentti- ja kairausvastusarvojen perusteella.

Kantavuudenarvioinnissa tarvittavat kairaustiedot ovat puristusvoima F_k , vääntömomentti M_t ja maalaji. Tässä tutkimuksessa käytettiin vääntömomentin rekisteröintivälinä 200 mm, jota laskennassa käytettiin kantavuusarvojen laskentatiheytenä. Tiheämpi vääntömomentin rekisteröintitiheys tarkentaisi laskentaa varmalle puolelle erityisesti minimipolkuperiaatteen käytön yhteydessä. Maalajin merkitys kantavuuslaskennassa tarvittavaan α -kertoimeen näkyy taulukossa 5.1.

Paalun kantavuuden arvioiminen ATK:lla suunnittelijan valitsemista rutiinikairaustuloksista vaatii kaluston kalibroinnin sekä puristusvoiman että vääntömomentin osalta. Tässä tutkimuksessa käytettiin GM 4000-4 -koneella määritettyjä vakioita (μ_l ja k_n), joiden käyttökelpoisuus muissa koneissa on tarkistettava erikseen. Nolla-asetusten tarkkuudessa kairauksen yhteydessä on esiintynyt laitteistosta johtuvia ongelmia. Tämän vuoksi vääntömomentin nolla-asetuksen tarkistus ja tarvittaessa korjaus tulee tehdä kairautietojen perusteella siten, että momentin arvo kairauksen alussa on mahdollisimman lähellä nollaa, mutta ei kuitenkaan missään vaiheessa mene negatiiviseksi. Nettokärkivastus määritetään kaavalla 4.7 ja netto-lyöntiluku kaavalla 4.11. Tässä tutkimuksessa saatujen kokemusten mukaan mittausepä-tarkkuudesta johtuen tankovastuksen maksimi-arvona voidaan käyttää 90 % kokonaiskairausvastuksesta tai kokonaislyöntiluvusta.

Kärkivastus q_c määritetään käyttämällä nettokärkivastusten arvoja sinällään tai kertomalla ne arvolla 1,07. Nettolyöntiluvut kerrotaan luvulla 0,8 tai 0,83. Pienemmillä kertoimilla päästään epävarmoissa olosuhteissa varovaisempaan arvioon. Kärkivastuksien keskiarvojen tulee kuitenkin olla kussakin maakerroksessa positiivisella puolella siten, että keskiarvo vastaa maakerrosta vastaavia ohje-arvoja. Muussa tapauksessa on nolla-asetusten arvot tarkistettava tai kyseinen kairauspiste hylättävä mahdollisten rekisteröintivirheiden vuoksi.

Dynaamisten koekuormitusten perusteella loppulyöntiohjeita määritettäessä käytetään varmuuslukuna vähintään $F = 2$. Lyöntipaalutusohjeiden (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) mukaan varmuusluvun tulee yleensä olla vähintään $F = 3$ ja tapauskohtaisen kalibroinnin perusteella vähintään $F = 2,2$, kun paalun sallittua geoteknistä kantavuutta arvioidaan alustavasti kairausvastuksen ja staattisten kantaavuuskaavojen avulla. RIL-121:n (1988) mukaan kokonaisvarmuusluvun minimiarvo on $F = 2,2$, kun paalun kantavuutta arvioidaan koepaalutuksen ja kairausvastuksen perusteella. Tämän tutkimuksen yhteydessä käytettyn suoran kantavuudenarviointimenetelmän yhteydessä suositellaan käytettäväksi varmuuskerrointa $F=2,5$ silloin, kun kairauksella määritettyjä nettokärkivastuksen arvoja voidaan pitää luotettavina ja kantavuusarvio tarkistetaan koepaalutuksella ennen varsinaisen paalutustyön alkua. Kun kokemuksia menetelmän käytöstä kertyy lisää, voidaan varmuuskertoimen arvoa tarvittaessa pienentää.

10 YHTEENVETO

Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairauksella -projektin tavoitteena oli kehittää puristin-heijarikairauksen tulkintaa siten, että se soveltuu paalun kantavuuden arvioimiseen. Kairaustulosten soveltuvuutta kantavuudenarviointiin tutkittiin alunperin CPT-kairaukselle kehitetyillä kantavuudenlaskentamenetelmillä.

Vertailuarvoina käytettiin paalujen iskuaaltomittauksilla saatuja murtokuorman arvoja, joiden perusteella pohjarakennussuunnittelija yleensä määrittää myös paalujen loppulyöntiehdot. Dynaaminen koekuormitus on luotettavimmillaan, kun tarkistetaan kantavuutta karkearakeiseen maakerrokseen ulottuvista paaluista, jollaisia tässä tutkimuksessa aineistona käytetyt paalut ovat. Tällaisissa olosuhteissa paalun dynaaminen kantavuus on likimäärin yhtä suuri kuin staattinen kantavuus (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987).

Sekä paalun vaippa- että kärkikantavuus arvioitiin kairan nettokärkivastuksen perusteella. Ongelmana oli puristinheijarikairan tankovastuksen ja kärkikappaleen tunkeutumisvastuksen erottaminen kokonaiskairausvastuksesta. Kärjen kokonaisvastus määritettiin vähentämällä tangon tunkemiseen tarvittavasta voimasta tankovastus, joka laskettiin tangon pyörytykseen tarvittavan vääntömomentin avulla.

Tampereen teknillisen korkeakoulun koealtaaseen rakennettiin 4,5 metrin paksuinen tiivistetty hiekkatäyttö, jossa määritettiin puristin-heijarikairan puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksen ja heijarikairausvaiheen nettölyöntivastuksen suhde CPT-kairan kärkivastukseen q_c . Koetulosten perusteella $q_{c:n}$ (MPa) arvo saadaan puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksesta q_n (MPa) kertoimella 1,07 ja nettölyöntiluvusta (lyöntiä/0,2 m) kertoimella 0,83. Koealtaalla tutkittiin lisäksi kärkikappaleen kiinnityksen vaikutusta kairaustuloksiin sekä kairattiin ilman kärkikappaletta, jolloin arviointiin tangon ja kärjen muodon vaikutusta kärkivastukseen ja vääntömomenttiin.

Kärkivastukseen q_c perustuvan suhteellisen tiiviyyden D_r arviointimenetelmällä saatuja arvoja verrattiin koealtaan hiekan tiiviystarkkailussa määritettyihin arvoihin. Puristin- ja heijarikairauksilla määritetyt nettoarvot muunnettiin arviointia varten ensin q_c -arvoiksi edellä

esitetyillä kertoimilla. Eri kairausmenetelmillä arvioidut tiiviydet vastasivat vesivolymetrillä määritettyjä arvoja. Koeallas- ja kenttätutkimusten perusteella puristin-heijarikairaustuloksista voidaan vaativissakin olosuhteissa määrittää kärkivastus q_c varsin luotettavasti.

Paalun kantavuutta voidaan arvioida joko epäsuorasti kairaustulosten avulla määritettyjen maaparametrien perusteella kantavuuskaavoilla tai suoraan nettokärkivastukseen perustuvilla laskentamenetelmillä. Kallvikinpuiston koealueella kokeiltiin epäsuoran menetelmän käyttöä, mutta menetelmään liittyvien epätarkkuustekijöiden vuoksi tässä työssä päädyttiin suoran menetelmän käyttöön.

Kantavuuden arviointiin sovellettiin laskukaavaa, joka on SIPT-kairausmenetelmää käyttäen todettu toimivimmaksi (Honkaniemi, Lempinen 1995). Koska SIPT-kairaus suoritetaan puristin-heijarikairauslaitteistoa käyttäen, nämä kairausmenetelmät vastaavat kärkivastuksen osalta toisiaan teoriassa, mutta käytännössä kantavuuden arvioinnissa käytetyt kärkivastussuhteet ovat erisuuruiset. Kaava on muodostettu yhdistämällä kaksi CPT-kärkivastukseen perustuvaa kaavaa. Paalun kärkivastus määritetään Begemannin (1963) teoriaan perustuvalla kaavalla (Schmertmann 1978) ja vaippavastus Bustamanten ja Ganesellin (1982) mukaan.

Koetäyttötutkimuksella määritettyjen kärkivastussuhteiden ja vääntömomenttimittaukseen perustuvaan tankovastuskorjaukseen nojautuen siirryttiin kenttätutkimuksiin. Niiden avulla tarkistettiin käytännössä laboratoriotutkimuksen tulosten pätevyys arvioimalla paalujen kantavuutta iskuaaltomittauksella analysoitujen paalujen läheisyydessä tehtyjen kairausten perusteella. Kenttätutkimuksia tehtiin kolmessa maaperäolosuhteiltaan erityyppisessä maastossa: Kallvikinpuiston koealueella Vuosaaren harjumaisilla hiekkamuodostelmilla sekä Paciuksen pohjasuhteiltaan tasaisilla ja Myllypellon pohjasuhteiltaan vaihtelevilla savialueilla. Puristin-heijarikairalla rekisteröityjen vääntömomenttimittauksien lisäksi momenttia mitattiin tulosten varmistamiseksi metrin välein momenttiavaimella tangon jatkamisen yhteydessä. Pehmeitä kerroksia kairattiin vertailun vuoksi CPT:llä.

Kairausten perusteella arvioidut kantavuudet olivat lähellä iskuaaltomittauksilla määritettyjä arvoja Kallvikin ja Paciuksen koealueilla, joissa kairausolosuhteita voidaan pitää paalun kantavuuden arvioinnin kannalta hyvinä. Myllypellon koealueella olosuhteet olivat vaativam-

mat, joten arvioitujen ja mitattujen kantavuuksien väliset erot olivat odotetusti jonkin verran suurempia.

Myllypellon koealueella selvitettiin menetelmän käyttökelpoisuutta vaativissa olosuhteissa. Samalla tutkittiin virhearvioiden syitä ja kartoitettiin mahdollisuuksia niiden havaitsemiseen ja ennaltaehkäisyyn. Myllypellon koealueella kairausolosuhteet olivat vaativia, koska kantavien kitkamaakerrosten ala- ja yläpinnan korkeudet vaihtelivat voimakkaasti. Kantavat maakerrokset sijaitsivat paksun, jopa 30-metrisistä pehmeistä maa-aineksista muodostuvien kerrostumien alla. Tällaisissa olosuhteissa tangot saattavat taipua, jolloin nettokärvivastuksen arvo antaa maakerrosten kantavuusominaisuuksista todellisuutta paremman kuvan. Lisäksi kairautulosten perusteella määritettyjen kantavuusarvioiden luotettavuutta heikensi paalutustyön aiheuttama maakerrosten tiivistyminen.

Kallvikin koealueella paalujen arvioitujen murtokuormien arvot olivat keskimäärin noin 12 % alle iskuaaltomittauksilla määritettyjen arvojen. Paciuksen koealueella arvioidut arvot olivat keskimäärin noin 1 % ja Myllypellon koealueella keskimäärin noin 49 % mitattuja arvoja suuremmat. Tässä tutkimuksessa arvioidun murtokuorman arvo oli maksimissaan mitattuun arvoon verrattuna noin 2,2-kertainen, jolloin sallittu kuormitus Lyöntipaalutusohjeiden (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) mukaista varmuuslukua $F \geq 2,2$ käytettäessä oli lähellä iskuaaltomittauksella määritettyä murtokuorman arvoa. Tämän tutkimuksen perusteella puristin-heijarikairauksella määritettyä paalun kantavuutta voidaan käyttää paalujen tavoitetasojen määrittämiseen suunnitteluvaiheessa, kun kantavuus tarkistetaan koepaalutuksella ennen varsinaisen paalutustyön alkua.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Bergdahl, U. & Möller, B. 1981. The Static-Dynamic Penetrometer. Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm 15.-19. June, 1981. Vol 2. A.A. Balkema, Rotterdam. s. 439-444.

Bergdahl, U. & Ottosson, E. 1988. Soil characteristics from penetration test results: A comparison between various investigation methods in non cohesive soils. Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing. Orlando 20.-24.March, 1988. Vol 1. A.A. Balkema, Rotterdam. s. 399-405.

Bottiau, M. 1995. Comparative assessment of the bearing capacity out of CPT-results. International Symposium on Cone Penetration Testing. Linköping 4.-5. October, 1995. Vol 2. Swedish Geotechnical Society, Linköping. s.399-406.

Broms, B.B. 1975. General reports, Scandinavia. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. Stockholm 5.-7. June, 1974. Vol. 2:1. National Swedish Building Research, Stockholm. s. 14-23.

Broms, B. B. & Flodin, N. 1988. History of soil penetration testing. Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing. Orlando 20.-24.March, 1988. Vol 1. A.A. Balkema, Rotterdam. s. 157-220.

Bustamante, M. & Gianselli, L. 1982. Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam 24.-27. June, 1982. Vol 2. A.A. Balkema, Rotterdam. s. 493-500.

Dahlberg, R. & Bergdahl, U. 1974. Investigations on the Swedish Ram-Sounding Method. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. Stockholm 5.-7. June, 1974. Vol. 2:1. National Swedish Building Research, Stockholm. s. 93-101.

Eslami, A. & Fellenius, B.H. 1995. Toe Bearing Capacity of Piles from Cone Penetration

Test (CPT) Data. International Symposium on Cone Penetration Testing. Linköping 4.-5. October, 1995. Vol 2. Swedish Geotechnical Society, Linköping. s.453-460.

Heinonen, J. & Hartikainen, J. 1996. Determination of pile bearing capacity based on dynamic probing resistance. NGM-96, vol 1. Reykjavik 26.-28.6.1996. Icelandic Geotechnical Society, Reykjavik. s. 233-238.

Honkaniemi, M. & Lempinen, T. 1995. SIPT-method in determination of soil parameters and point resistance for driven piles. International Symposium on Cone Penetration Testing. Linköping 4.-5. October, 1995. Vol 2. Swedish Geotechnical Society, Linköping. s. 479-484.

Hunt, R.E. 1986. Geotechnical engineering analysis and evaluation. McGraw-Hill Book Company. 729 s.

Slunga, E. 1974. Perustaminen. RIL 95, Pohjarakennus. Helsinki 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. S 187-330.

Lojander, M. 1985. Geomekaaniset ominaisuudet. RIL 157-I, Geomekaniikka I. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto., s. 91-124.

Meigh, A.C. 1987. Cone penetration testing, methods and interpretation. Letchworth 1987. 141 s.

Melander K. 1989. Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä, Helsingin kaupunki, Geotekninen osasto 1989, tiedote 48. Helsinki. 99 s.

RIL 121. Pohjarakennusohjeet 1988. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. Helsinki. 92 s.

RIL 212. Suurpaalutusohje SPO-95. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y., Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. Helsinki. 141 s.

Robertson, P.K., Campanella, R.G., Davies, M.P. & Sy, A. 1988. Axial capacity of driven piles in deltaic soils using CPT. Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing. Orlando 20.-24. March, 1988. Vol 1. A.A. Balkema, Rotterdam. s. 919-928.

Robertson, P.K. & Campanella, R.G. 1983. Interpretation of cone penetration tests. Part I: sand. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20. Number 4. Ottawa. s. 718-733.

Saari, M. & Korhonen, O. 1990. Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla, Helsingin kaupunki, Geotekninen osasto 1990, tiedote 53. Helsinki. 127 s.

Scarff, R.D. 1989. Penetration testing in the UK. Thomas Telford. s 129-132.

Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1980. Kairausopas I, paino- täry- ja heijarikairaus. Helsinki. 40 s.

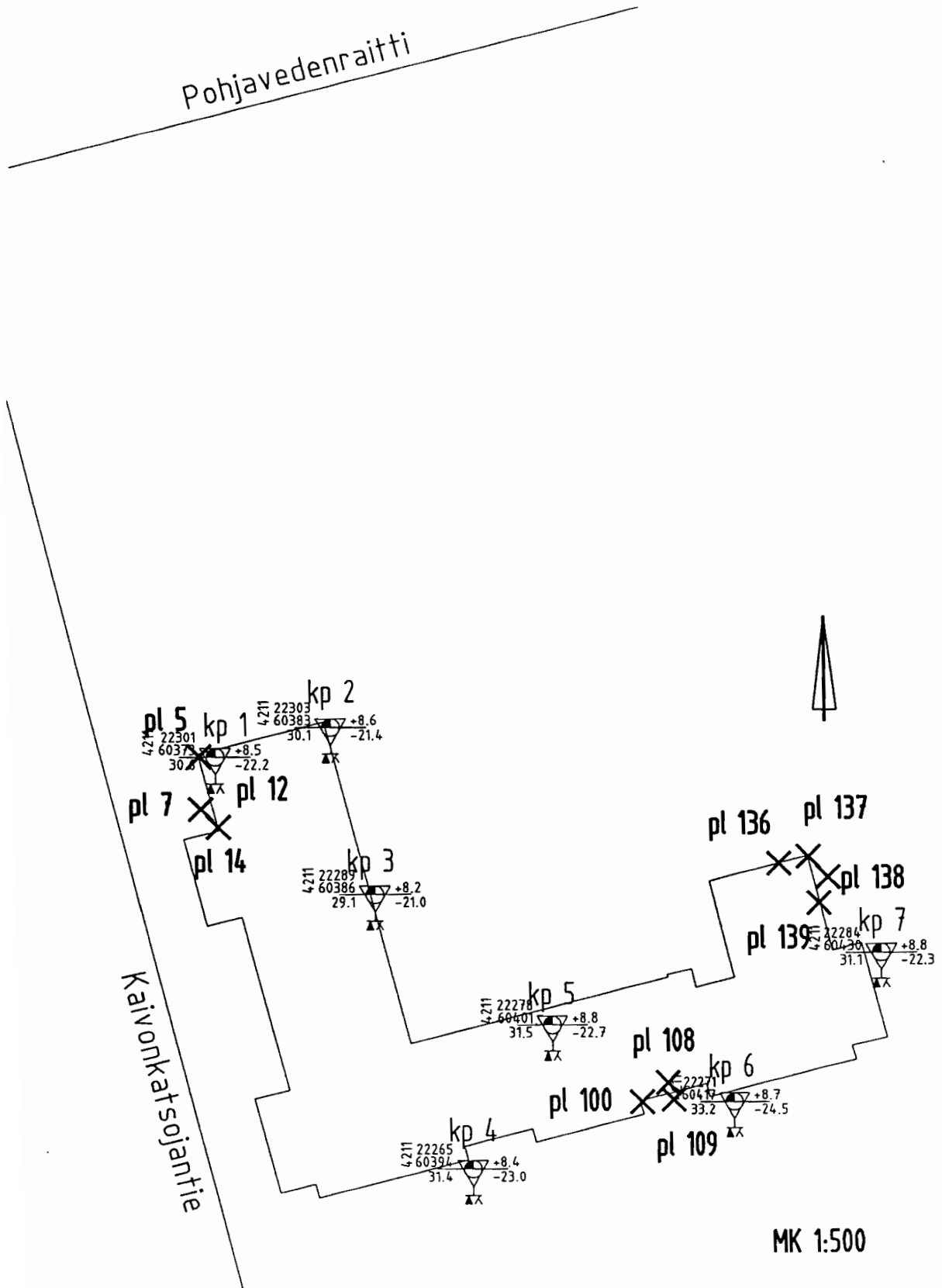
Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987. Lyöntipaalutusohjeet LPO-87. Vaasa. 120 s.

Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1993. Pohjatutkimusmerkinnät. 5 s.

Silvestri, V., Dakroub, H. & Fahmy, Y. 1997. Analysis of cone penetration and indentation tests in clayey soils. Canadian Geotechnical Journal, vol. 34. Number 2. Ottawa 1997. s. 254-263.

Tirkkonen O. 1991. Sovelletun heijarikairauksen käyttö maaparametrien määrittämisessä. Diplomityö. TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Otaniemi. 68 s.

Kallvikinpuiston koealue



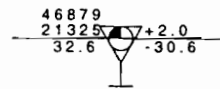
86

LIITE 2

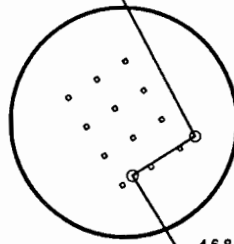
Paciuksen koealue

Mittakaava 1:500

Kairauspiste 2



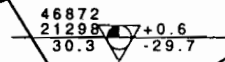
2
↑
Koepaalu A240



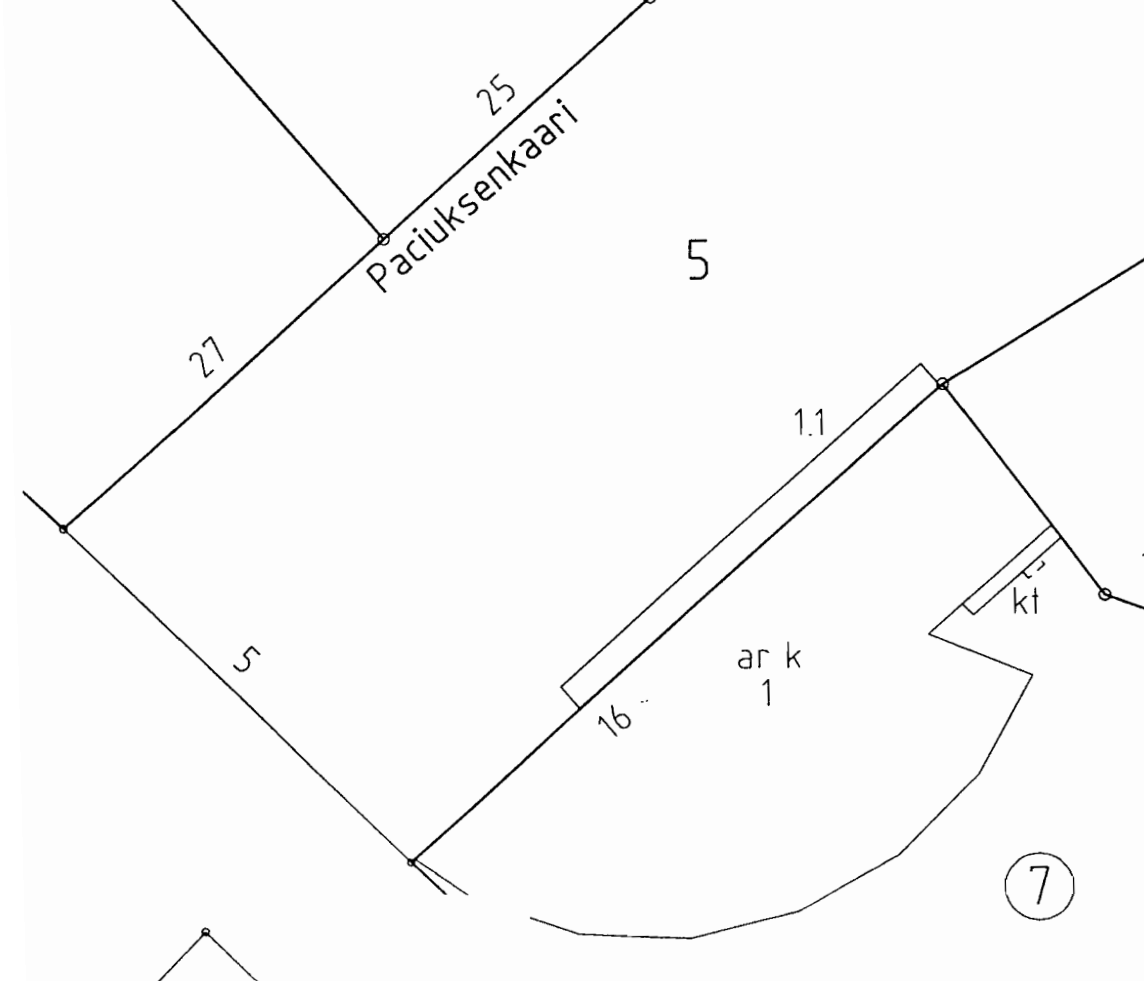
Koepaalut

300 mm * 300 mm

12 kappaletta

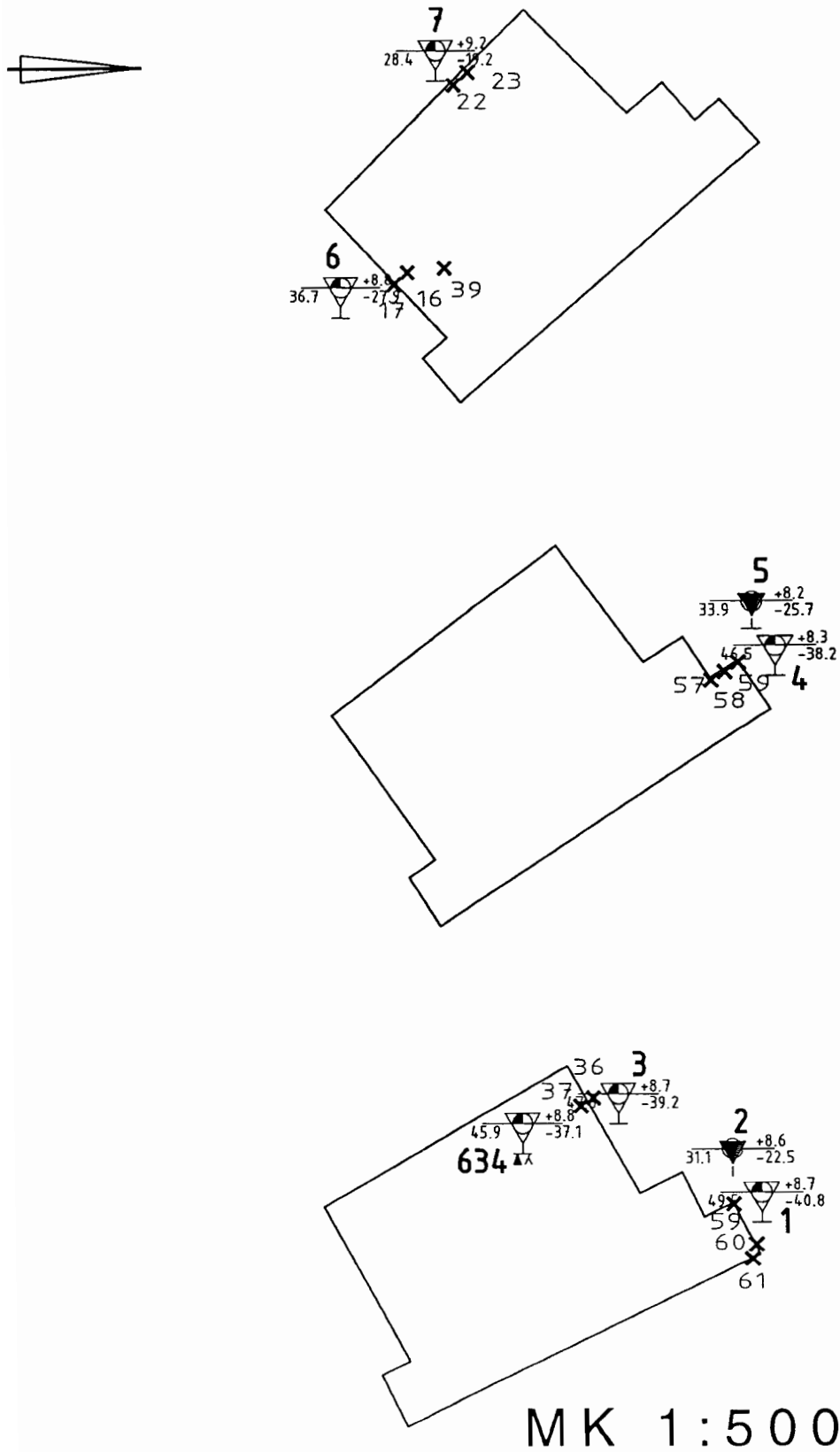


Kairauspiste 1



Myllypellon koealue

LIITE 3



Julkaisija HELSINGIN KAUPUNGIN KIIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO MALMIN ASEMATIE 3 A 00700 HELSINKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 http://www.kv.hel.fi/geo		Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston tiedotteet 74/1997 Marraskuu 1997	
		Projektinnumero(t) 6522	
Tekijä(t) Kalle Rantala Hannu Halkola		Toimeksiantaja(t)	
Nimike Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla			
Tiivistelmä Tämä tutkimus on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla tavoitteena kehittää puristin-heijarikairauksen tulkintaa siten, että tulokset soveltuvat paalun kantavuuden arvioimiseen. Paalun kantavuuden arviointiin sovellettiin alunperin CPT-kairan kärkivastukseen perustuvaa menetelmää. Puristin-heijarikaira rekisteröi puristusvoiman, lyöntiluvun ja vääntömomentin arvot, ja niiden perusteella vastaavat kärkikappaleen tunkemiseen tarvittavat nettoarvot on määritettävä laskennallisesti. Nettoarvot muutettiin vastaamaan CPT-kairauksen kärkivastusarvoja laboratorio-olosuhteissa määritettyjen kärkivastuskertoimien avulla. Laboratoriokokeet tehtiin 4,5 metrin syvyyseen koealtaaseen rakennetussa tiivistetyssä hiekkatäytössä, jossa vertailtiin CPT-kärkivastuksen suhdetta puristin-heijarikairauksen nettokärkivastukseen ja nettolyöntilukuun. Tulosten perusteella CPT-kärkivastus saadaan puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksesta kertomalla 1,07 ja heijarikairausvaiheen nettolyöntiluvusta kertomalla 0,83. Paalujen kantavuutta kairaustulosten perusteella arvioitiin Helsingissä kolmella erityyppisellä koealueella. Koealueilla tehtyjen kairausten perusteella määritettiin paalun vaippa-, kärki- ja kokonaisvastusten arvot murtotilassa, ja niitä verrattiin paaluista iskuaaltomittauksella määritettyihin arvoihin. Kallvikin koealueella paalujen arvioitujen murtokuormien arvot olivat keskimäärin noin 12 % alle iskuaaltomittauksilla määritettyjen arvojen. Paciuksen koealueella arvioidut arvot olivat keskimäärin noin 1 % ja Myllypellon koealueella keskimäärin noin 49 % mitattuja arvoja suuremmat. Tässä tutkimuksessa arvioidun murtokuorman arvo oli maksimissaan mitattuun arvoon verrattuna noin 2,2-kertainen, jolloin sallittu kuormitus Lyöntipaalutusohjeiden (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) mukaista minimivarmuusluku $F = 2,2$ käytettäessä oli lähellä iskuaaltomittauksella määritettyä murtokuorman arvoa. Tässä työssä käytettyä puristin-heijarikairaustuloksiin perustuvaa suoraa kantavuudenarviointimenetelmää voidaan käyttää suunnitteluvaiheessa kitkapaalujen käyttömahdollisuuksien sekä paalupituuksien ja sallitun geoteknisen kantavuuden arvioimiseen edellyttäen, että kairaukset on tehty kalibroidulla kalustolla ja kairaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Paalujen lyöntisyvyydet ja kantavuudet tarkistetaan koepaalutuksien ja -kuormituksien ennen varsinaista paalutustyötä.			
Avainsanat puristin-heijarikairaus, paalun kantavuus, PDA			
ISSN 0788-6209	ISBN 951-718-020-9	Luokitus (UDK) 624.13	
Kieli suomi, engl. tiivistelmä	Sivuja 87 s.		

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION MALMIN ASEMATIE 3 A FIN-00700 HELSINKI PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555 http://www.kv.hel.fi/geo	Series title, number and date Geotechnical Division, report 74/1997 November 1997	
	Project number(s) 6522	
Author(s) Kalle Rantala Hannu Halkola	Commissioned by	
Title Estimating the bearing capacity of piles by static-dynamic penetration test		
Abstract This research project was conducted at the geotechnical department of the real estate office of the City of Helsinki. The study was aimed at developing the interpretation of the static-dynamic penetration test to make results more suitable for the pile bearing capacity estimating. A method initially based on CPT cone resistance was applied to the pile bearing capacity estimating. The static-dynamic penetration test equipment measures values of penetration force (kN), number of blows (blows/0,2 meter) and torque (Nm). The net values of point force needed to penetrate soil have to be determined by calculation based on these measured values. The net values were converted to be equal with CPT cone resistance values by means of a cone resistance factor determined in laboratory. The laboratory tests were made in a test basin with a depth of 4,5 meters and filled with compacted sand, where CPT cone resistance values were compared with the net values of cone resistance and the number of blows. On the basis of test results the CPT cone resistance is 1,07 times the net cone resistance in static penetration phase and 0,83 times the net number of blows in dynamic probing phase. Pile capacities based on penetration test results were estimated in three test sites of different types in the city of Helsinki. The ultimate values of shaft- point- and total resistances of a pile were calculated by means of penetration tests made in test sites. The calculated ultimate values were compared with the resistance values determined by pile driving analysis. On the test site of Kallvik the estimated ultimate bearing capacity values were on the average about 12 % smaller than the values determined by pile driving analysis. On the test site of Pacius the estimated values were on the average about 1 %, and on the test site of Myllypelto on the average about 49 % smaller than the measured values. In this research project the estimated ultimate value of the bearing capacity of a pile was in maximum about 2,2 times higher than the measured value. This value is close to measured value when a minimum safety factor of $F = 2,2$ according to Lyöntipaalausohjeet (Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 1987) is used with estimated values. The direct method for estimating the bearing capacity of a pile in this work may be used in a design phase when comparing facilities of using friction piles, and determining the length and the allowable bearing capacity of piles provided the penetration test equipments are calibrated and the test results are reliable. The piling depths and bearing capacities of piles have to be corrected by test piling and test loadings.		
Keywords static-dynamic penetration test, bearing capacity of piles, PDA		
ISSN 0788-6209	ISBN 951-718-020-9	Class (UDC) 624.13
Language Finnish, Engl. abstr.	Sivuja 87 p.	

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

57	Nieminen, Jarmo & Johansson, Erik & Holopainen, Pekka	Viikkinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	1992
58	Ahola, Jukka & Viitala, Raimo	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	1992
59	Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	1992
60	Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	1992
61	Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu	Ylijäämäsavien massastabilointi	1993
62	Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko	Maankäytön geotekninen suunnittelu	1993
63	Anttikoski, Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo	Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti)	1993
64	Rekonen, Rita & Halkola, Hannu	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	1994
65	Ulmala, Ola & Halkola, Hannu	Puristin-porakonekairaus	1994
66	Havukainen, Jorma	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus)	1995
67	Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	1996
68	Puimalainen, Niina & Havukainen, Jorma	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	1996
69	Mehdälä, Jani & Korhonen, Osmo	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	1996 **
70	Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	1996
71	Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko	Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96	1996
72	Wegelius, Arto & Viitala, Raimo	Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	1996
73	Vähäaho, Ilkka	Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset	1996
74	Rantala Kalle & Halkola Hannu	Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla	1997

KARTTAKIRJAT

GEO 10 K	Kallioperäkartta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1978
GEO 10 M	Maaperäkartta - Jordmånskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1989

*) painos loppuunmyyty

**) ilmestyy lähiaikoina

Hinnat

tiedotteet	1 kpl 90 mk, 2-3 kpl 80 mk, 4-6 kpl 70 mk, 7- kpl 65 mk (sis. alv)
karttakirjat	450 mk/kpl (sis. alv)

Tilauslomake <http://www.kv.hel.fi/geo/tilaus.html>