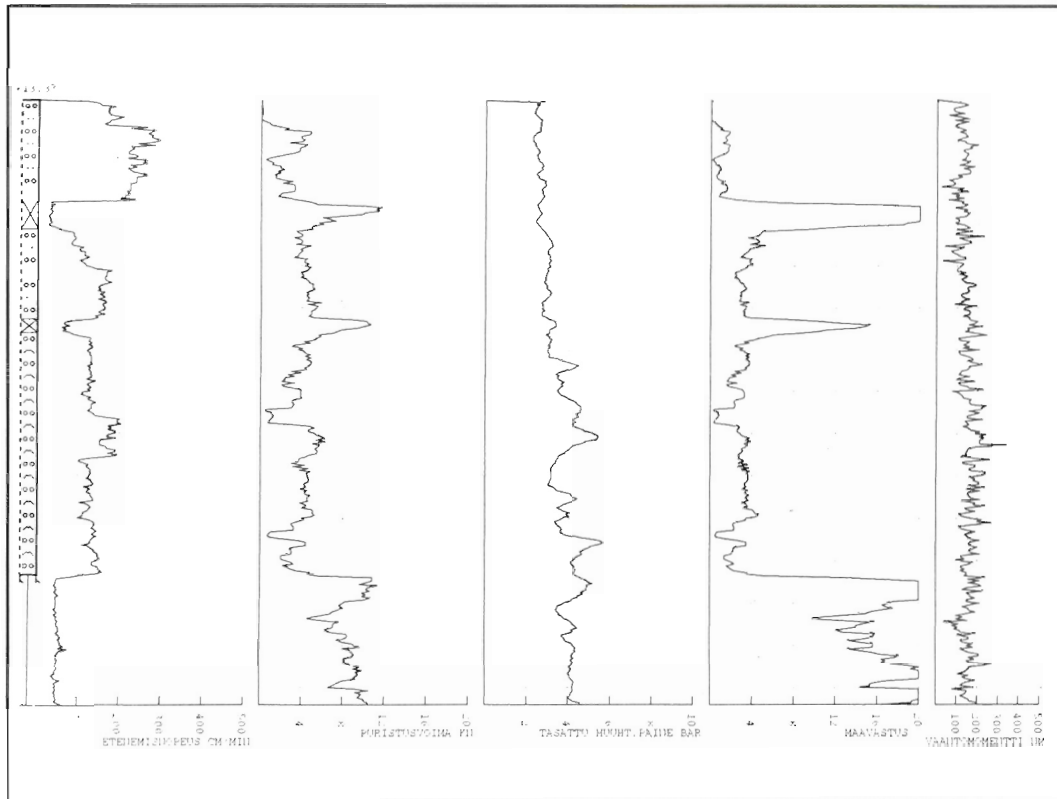




PURISTIN- PORAKONEKAIRAUS

Ola Ulmala • Hannu Halkola



HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO

ALKULAUSE

Tämä tiedote liittyy Geomachine Oy:n ja Helsingin kaupungin geoteknisen osaston vuonna 1990 käynnistämään yhteishankkeeseen porakonekairausmenetelmän kehittämiseksi.

Porakonekairausta käytetään mm. kallionpinnan ja täytekerrosten selvittämiseen. Kalusto on tavallisissa maakairauksissa käytettävään kalustoon verrattuna selvästi raskaampi ja siten myös kalliimpi.

Tiedotteessa on selvitetty porakonekairausmenetelmän kehittämistä perustuen nykyaikaisen monitoimiporakoneen ja monikanavaisen rekisteröintilaitteen tarjoamiin mahdollisuuksiin.

Esiteltävä puristin-porakonekairausmenetelmä tarjoaa nopean ja edullisen pohjatutkimusmenetelmän geoteknisiin yleistutkimuksiin. Lisäksi tiedotteessa on selvitetty ns. monikanava-porakonekairauksen tulosten tulkintaa etenkin maakerroksissa.

Tiedote perustuu tekn. yo. Ola Ulmalan diplomityöhön, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkolan ohjauksessa. Työn valvoja oli professori Jorma Hartikainen Tampereen teknillisestä korkeakoulusta.

Helsingissä lokakuun 7. päivänä 1994



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

MERKINNÄT

1. JOHDANTO	1
1.1. Puristinkairaus	1
1.1.1. Puristinkairauksen kehitys	1
1.1.2. Kansainvälinen CPT-referenssikairaus	3
1.1.3. Kärkityypit	6
1.2. Puristin-heijarikairaus	8
1.2.1. Menetelmän kehitys	8
1.2.2. Käytettävä kalusto	8
1.2.3. Suositeltu kairausta-	9
pa	
1.3. Porakonekairaus	12
1.3.1. Nykykäytäntö	12
1.4. Norjalainen totaalikairaus	13
1.4.1. Menetelmän kehitys	13
1.4.2. Kairaus	14
1.5. Puristin-porakonekairaus	16
1.5.1. Tavoitteet	16
1.5.2. Kehitettävä menetelmä	17
1.5.3. Puristin-pora-	
konekairauksen eri-	
tyisvaatimukset	18
1.5.4. Tulosten esittäminen	19
1.6. Parametrien määrittäminen puris-	
tinkkairauksilla	22
1.7. Parametrien määrittäminen pora-	
konekairauksilla	25
1.7.1. Energiakaava	26
1.7.2. Vaihtelu-indeksi	27
1.7.3. Somertonin indeksi	27
1.7.4. Tunkeutumaparametri B	28
1.7.5. Vesimenekki	29
2. LAITTEISTO	30
2.1. Käytettävä porauskalusto	30
2.1.1. Poravaunu	30
2.1.2. Tankokalusto	30
2.2. Kärki	31
2.2.1. Yleistä	31
2.2.2. Materiaalin valinta	32

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto	
2.2.3. Kokeillut materiaalit	32
2.2.4. Muodon valinta	33
2.2.5. Kärjillä tehdyt ko- keet	35
2.2.6. Kärki tavallisessa porakonekairaukses- sa	37
2.3. Rekisteröintilaitteet	39
2.3.1. Kairaustiedon rekis- teröinti	39
2.3.2. Syvyys ja nopeus	40
2.3.2. Puristusvoima ja kär- kivastus	40
2.3.3. Vääntö ja vaippavas- tus	41
2.3.4. Huuhtelupaine	42
2.3.5. Rekisteröinnin käyttö	42
3. KOEKENTÄT	43
3.1. Koekenttien valinta	43
3.2. Koekenttien esittely	44
3.2.1. Kupittaan koekenttä	44
3.2.2. Itäharjun koekenttä	45
4. PURISTUSVAIHE	46
4.1. Puristusvoima ja kärkivastus	46
4.2. Vääntömomentti ja vaippavastus	51
4.3. Maalajit	55
4.4. Muut parametrit	60
4.4.1. Leikkauslujuus	62
4.4.2. Kitkakulma	64
4.5. Vertailu muihin menetelmiin	64
4.5.1. Vertailu painokaira- tuloksiin	64
4.5.2. Vertailu heijari- kairatuloksiin	66
4.5.3. Vertailu CPT-kairauk- siin	68
5. PORAUSVAIHE	73
5.1. Puristusvoima	73
5.2. Vaippavastus	76
5.3. Poraparametrit	77
5.3.1. Yleistä parametrien tulostuksista	77
5.3.2. Tulostukset	78
5.3.3. Parametrien kehittä- minen	83

5.4. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto huuhtelupaine	85
5.4.1. Huuhtelu vedellä	85
5.4.2. Huuhtelu ilmalla	88
5.4.3. Muita huuhteluun liittyviä huomioita	91
5.5. Vertailu muihin menetelmiin	93
6. VIRHELÄHTEET	94
6.1. Laitteistosta aiheutuvat virheet	94
6.2. Käyttäjistä aiheutuvat virheet	96
7. KEHITYSTARPEET	97
7.1. Menetelmän kehitystarpeet	97
7.2. Laitteiston kehitystarpeet	98
8. JOHTOPÄÄTÖKSET	98
KIRJALLISUUSVIITTEET	101
LIITTEET	104

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto
TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennustekniikan osasto
Geotekniikka
ULMALA, OLA: Puristin-porakonekairauksen kehittäminen
Diplomityö, 103 s., 6 liites.
Tarkastaja: prof. Jorma Hartikainen
Rahoittaja: Geomachine Oy
Elokuu 1991

Tämä tutkimus tehtiin Geomachine Oy:ssä. Tutkimukseen osallistui myös Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto.

Työn tarkoituksena oli kehittää porakonekairausta siten, että maaperästä saataisiin nopeasti riittävät tiedot alustaviin pohjatutkimuksiin. Näin voitaisiin jättää nykyisiä päällekkäisiä paino-, heijari-, ja porakonekairauksia suorittamatta tulosten laadun silti heikkenemättä. Erityisenä etuna on menetelmän nopeus, 3.0 m/min, joka puristin-heijarikairaukseen verrattuna on kaksi- ja puolikertainen. Pyöritysnopeutena käytettiin 30 r/min. Toisaalta puristin-heijarikairauksella saadaan informaatiota, jota puristin-porakonekairauksella ei tämän tutkimuksen perusteella saada.

Tavoitteeseen pyrittiin jakamalla porakonekairaus puristus- ja porausvaiheeseen. Puristamisen porakruunua käyttäen, ilman huuhtelua, mahdollistaa työn yhteydessä kehitetty kertakäyttöinen porakruunun päälle asetettava kärkekappale. Kärkekappaleen perusvaatimukset olivat kruunussa sijaitsevien huuhtelukanaavien sulkeminen puristusvaiheen ajaksi ja rikkoutuminen poravasaran iskusta siten, ettei siitä jää porauksen jatkamista haittaavia kappaleita. Kärkekappale on muodoltaan lieriömäinen. Kartiokärjen kärkikulmaksi valittiin kansainvälisen CPT-standardiehdotuksen mukaisesti 60°.

Menetelmää voidaan puristusvaiheen osalta pitää puristin-kairauksena, jossa käytetään suurta puristusnopeutta ja tavallista suurempaa kärkeä. Kairattaessa puristamalla, kärkekappaleen avulla, oli mahdollista esittää alustavia arvioita CPT-kairausten ja puristin-porakonekairausten välisestä korrelaatiosta.

Vertailevat kairaukset oli suoritettu kahden kohteen tavanomaisina pohjatutkimuksina. Kallion yläpuoliset maakerrokset olivat toisella alueella koheesiomaata ja toisella kitkamaata. Poraukset suoritti sekä porakone- että CPT-kairausten osalta diplomityön kirjoittaja. Tästä johtuen uuden menetelmän kokonaisvaltainen tarkastelu ja tulosten arviointi on mahdollista.

Tulosten tulkinnessa tarvittavista poraparametreista on esitetty jo käytössä olevia parametreja. Lisäksi tutkimuksessa on esitetty uusia parametreja sekä kehitysehdotuksia.

Tutkitun menetelmän käyttöönotto on tehdyn selvityksen perusteella mahdollista. Varsinkin puristusosuudella, nopeana kairausmenetelmänä, puristin-porakonekairaus on tehokas pohjatutkimusmenetelmä.

This study was done at Geomachine Oy under the supervision of the Geotechnical Department of the city of Helsinki. The aim was to develop a rapid site investigation method providing f.ex. design parameters and the stratification of soil. The method is later on referred as penetration-drilling. This became possible by combining penetration testing and drilling as a soil investigation method with the help of a protective cone. The penetration rate used was 3.0 m/min and the rods were rotated 30 r/min.

The tests were performed mainly in two different specially chosen sites. The first site consisted of marine clay, gravel and finally the bed rock. The other one was situated in a sandy area where the soil consisted of sandlayers of different density. Several parallel tests were done with weight sounding, dynamic probing (DPSH-type) and CPT-testing methods. Also samples were taken.

One of the main tasks was the development of a protective cone on the drilling bit. Different materials were tested and based on the tests the material was chosen. The shape of the cone was decided to be as much as possible like the CPT-cone. So the apex angle of the cone was chosen to be 60 degrees. The other dimensions were decided according to the dimensions of the drilling bit.

As the results were analyzed correlation was found between CPT-results and the penetration-drilling. Concerning the values of cone resistances the CPT-values were under these conditions found to be about twice the values of the penetration-drillings. The side friction values are not recommended to be used directly although the suggested correlation is one.

Despite of the development work that still has to be done, it is possible to get several advantages by using the new site investigation method, penetration-drilling.

α	kärkikulma °
$\xi_{\gamma q}, \xi_c$	muotokerroin
σ'	vallitseva tehokas jännitys kN/m ²
σ_{vo}	vallitseva jännitys kPa
ϕ	kitkakulma °
ϕ'	tehokas kitkakulma °
ω	tankojen pyöritysnopeus r/min
A	vaihteluindeksi
A_c	kärjen pinta-ala cm ²
B	laskennallinen poraparametri
C_u	häiriintymätön leikkauslujuus kN/m ²
D_r	suhteellinen tiiviys %
D_t	5 mm painumaan tarvittava aika
E_s	kimmomoduli
F	puristusvoima kN
f_r	kitkasuhde %
f_s	vaippavastus kPa, MPa
F_s	tankoja vääntävä voima kN
I_p	plastisuusluku
M_v	vääntömomentti Nm
$N_k, N_q, N_c, N_{\gamma c}$	kantavuuskerroin
P	tankojen kärjessä vaikuttava nettopuristusvoima kN
P_0	teoreettinen P:n maksimiarvo kN
P_{air}	poraamisessa käytetty huuhteluilmanpaine bar
P_k	painokairan puolikierrokset
P_{water}	poraamisessa käytetty huuhteluvedenpaine bar
q_c	kärkivastus kPa, MPa
Q_{rel}	vedenläpäisevyys
r	suojakappaleen tai kruunun säde mm, m
S_d	ns. Somertonin indeksi
V	nopeus m/min
V	käytetty puristusnopeus m/min
V_0	teoreettinen nopeuden maksimiarvo m/min
W	poraamiseen käytetty energia
W_{water}	käytetyn huuhteluveden määrä l/min

1. JOHDANTO

Porakonekairaus on Suomessa yleisesti käytetty pohjatutkimusmenetelmä. Menetelmä on yleistynyt monitoimivaunujen myötä, jolloin syöttölaitteella varustettuihin vauuihin voidaan asentaa poravasara. Suomessa ensimmäinen porakonekaira otettiin maaperäntutkimuskäyttöön vuonna 1966, joten pohjatutkimusmenetelmänä porakonekairaus on varsin nuori.

Porakonekairauksilla läpäistään kovan kerroksen yläpuoliset maalajit ja tutkitaan lähinnä kallionpinnan sijaintia. Porakonekairausta päätettiin lähteä kehittämään, koska saatava informaatio on kustannuksiin verrattuna vähäinen.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin maaperästä porauksen aikana saatavan kairaustiedon keräämisen monipuolistamista ja laadun parantamista samalla, kun tutkittiin kallionpinnan sijainti entiseen tapaan. Tällöin saavutettaisiin ratkaisevia etuja nykyisiin porakone-kairauksen tuloksiin verrattuna. Kustannuksia voitaisiin alentaa huomattavasti tehostamalla kairauksen aikaista tiedon keruuta ja käyttöä.

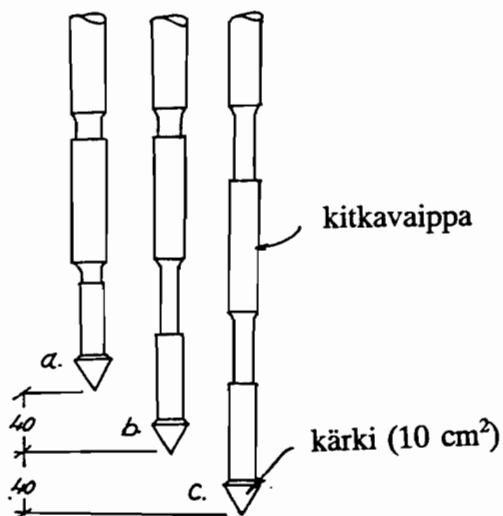
1.1. Puristinkairaus

1.1.1. Puristinkairauksen kehitys

CPT- kairaus (Cone Penetration Test) on Euroopassa yleisesti käytössä oleva tutkimusmenetelmä, jonka tarkoituksena on selvittää mm. maakerrosrajat ja geotekniset suunnitteluparametrit. Tutkimustyötä on tehty jatkuvasti myös erilaisten maaparametrien määrittämisen tarkentamiseksi ja esim. paalun kantokyvyn määrittämiseksi.

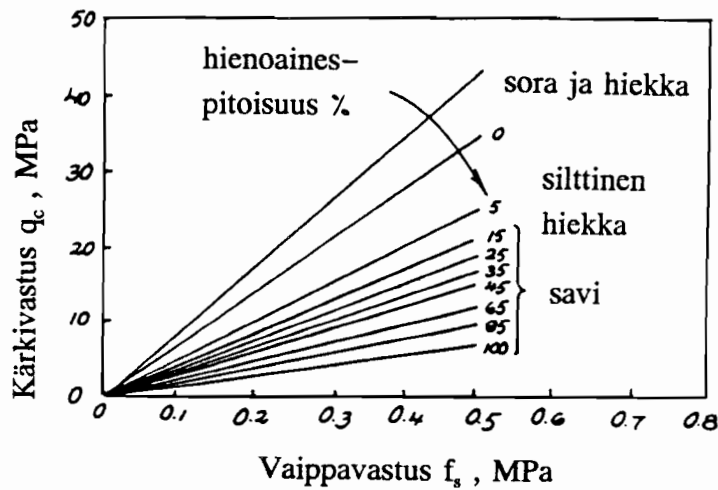
Hollantilaiset aloittivat puristinkairauksen kehittämisen jo 1930-luvulla /3/. Alunperin tavoitteina oli sel-

vittää täytön paksuus ja kantokyky. Merkittävä askel otettiin 1950-luvulla, kun Begeman esitti, että kärkivastuksen lisäksi tulisi mitata myös vaippavastusta 0.2 m:n välein erillisellä kitkavaipalla. Erikoistapauksissa mittausvälinä käytettiin 0.1 m. Vaipan halkaisija oli sama kuin kärjen, $\phi 36$ mm, pinta-ala 150 cm^2 ja kärjen pinta-ala oli 10 cm^2 . Begemanin metodi patenttoitiin 1955. Vaippavastus määritettiin siten, että ensin pelkästään kärki puristettiin maahan 40 mm, jonka jälkeen kitkavaippaa ja kärkeä puristettiin yhdessä toiset 40 mm. Vaippavastus määritettiin näistä saatujen lukemien erona (Kuva 1).



Kuva 1. Begemanin /3/ vuonna 1955 patentoima puristin-kairakärki.

Begeman esitti ensimmäisenä myös, että kitkasuhteeseen so. mitatun vaippa- ja kärkivastuksen suhde, vaikuttaa pääasiassa maa-aineksen raekoko (kuva 2). Laaditun taulukon avulla voitiin kärki- ja vaippavastuksen avulla karkeasti määritellä maalaji.



Kuva 2. Likimääräinen maalajimäärittäminen Begemanin /2/ mukaan.

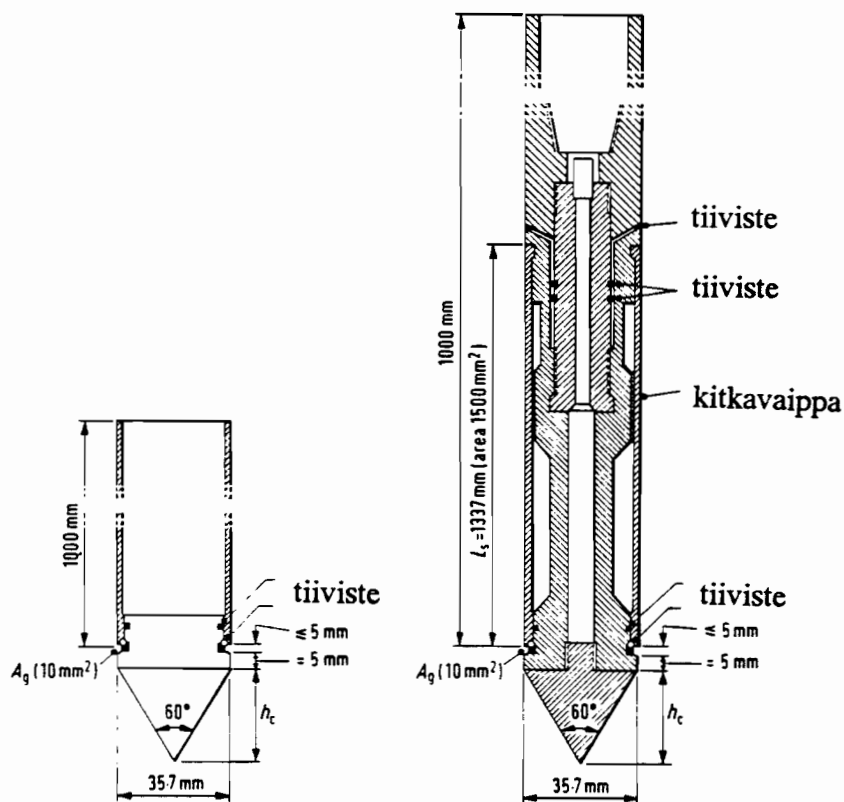
Puristinkairausta käytetään nykyään tutkimusmenetelmänä eri puolilla maailmaa /4/. Laajimmin menetelmää käytetään Keski-Euroopassa, jossa geologiset olosuhteet yleensä mahdollistavat puristinkairausten käytön. Puristinkairausta käytetään pohjatutkimusmenetelmänä myös Pohjois-Amerikassa. Puristinkairausten menetelmää tutkitaan erityisesti mm. Hollannissa ja Norjassa.

Koska CPT-kairauksissa käytettävät laitteet ja menetelmät vaihtelevat eri maiden välillä, on tässä yhteydessä mahdollista esitellä vain joitakin yksittäisiä menetelmiä.

1.1.2. Kansainvälinen CPT-referenssikairaus

Puristinkairaus on menetelmänä erittäin monimuotoinen. Laitteistot sekä kärkien, että puristuslaitteistojen osalta ovat varsin vaihtelevia. Myös tulkinnessa on suuria eroja. Tämän vuoksi menetelmien yhdenmukaistamiseksi ja tehtävien tutkimusten laadun parantamiseksi perustettu ISSMFE:n teknillinen komitea esitti 1980-

luvun lopulla nykyistä referenssi-kairauksen käyttöönottoa /11/. Sitä voidaankin pitää hyvänä pohjana CPT-kairauksen standardisoinnille. Esitetyn mukainen kairaus voidaan suorittaa kitkavaipalla varustetulla kärjellä tai kärjellä, jossa ei ole kitkavaippaa. Käytettäessä elektronista kärkeä voidaan tehdä myös huokosvedenpainehavaintoja kärkeen asennetun huokosvedenpaineanturin avulla. Standardiehdotuksen mukainen CPT-kärki on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Standardiehdotuksen mukainen /11/ puristinkaira-kärki huokosvedenpaineantureilla varustettuna. Kitkavai-palla varustettu on oikealla ja ilman kitkavaippaa oleva vasemmalla.

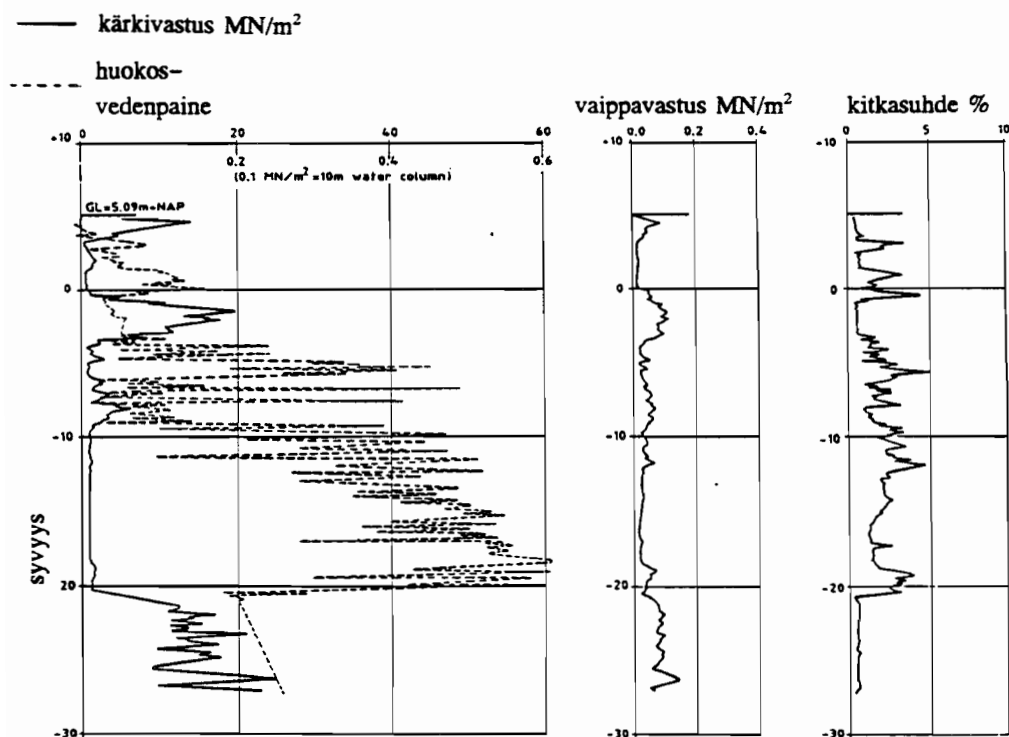
Referenssikairauksissa, kuten kairauksissa yleensäkin, erityistä huomiota on kiinnitettävä tankojen suoruuteen

ja yksittäisten tankojen liitosten tiukkuuteen sekä CPT-kärjessä sijaitsevien kitkavaipan ja kärkekartion saumojen tiiveyteen. Mahdollisimman häiriintymättömien tulosten saamiseksi on huomioitava lämpötilakorjaus ja etäisyys muihin kairauspisteisiin, jonka suositellaan olevan 25 kertaa kairaustankojen halkaisija tai vähintään 2 m.

Standardiehdotuksen mukaan mitatut tulokset esitetään kuvan 4 mukaisilla käyrillä, joiden perusteella määritellään suunnittelussa käytettävät parametrit.

Vertailumenetelmästä eroavissa menetelmissä poikkeamat ovat yleensä joitain seuraavista:

- poikkeamat kärjen mitoissa
- poikkeamat kärkekulmassa
- poikkeamat kitkavaipan pinta-alassa
- poikkeamat kitkavaipan sijainnissa
- poikkeamat kärjen muodossa
- poikkeamat kärjen liikkeessä suhteessa kairaustankoihin



Kuva 4. Puristinkairakomitean /11/ ehdottama tulostustapa.

1.1.3. Kärkityypit

Kärjet voidaan jaotella esimerkiksi mekaanisiin ja sähköisiin sen perusteella, miten tulokset rekisteröidään tai luetaan.

Mekaanisia kärkiä käytettäessä vaippa- ja kärkivastus mitataan maanpinnalla suoraan manometreista. Laitteiston etuna on suuri kuormituksen ja kovien maalajien aiheuttamien rasitusten kestävyys. Toisaalta heikkoutena on epätarkkuus johtuen eri mekaanisten osien välisistä kitkoista sekä lukematarkkuudesta ja -tiheydestä.

Mekaanisten kärkien rinnalle on kehitetty myös elektroninen kärki. Tietojen tallennus voi tapahtua joko suoraan kärjessä sijaitsevaan elektroniseen muistiin tai kaapelilla maan pinnalla sijaitsevaan muuhun tallennuslaitteistoon. Tiedonsiirto on mahdollista toteuttaa myös akustisesti lähettimen ja mikrofoniin avulla. Tällöin ääniaallot etenevät tankoja pitkin ja ne muutetaan numeerisiksi tuloksiksi maan pinnalla.

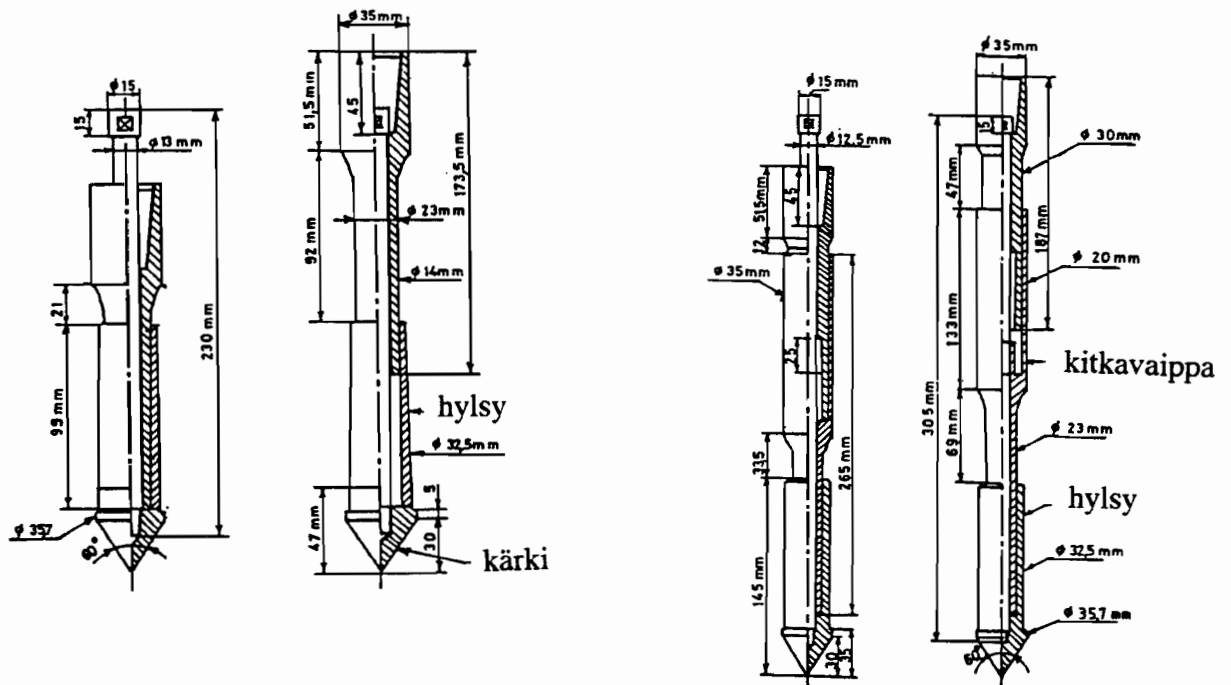
Elektronisten kärkien etuja mekaanisiin kärkiin verrattuna ovat mm. parametrien jatkuva mittaus syvyyden funktiona ja suurempi herkkyys. Tällöin mittaustarkkuus on riittävä myös löyhässä hiekassa, siltissä ja pehmeässä savessa. Myöskään kairaustangot eivät aiheuta vääristymiä kairaustuloksissa, koska mittaukset suoritetaan in situ eikä tankojen yläpäässä. Lisäksi sähköiseen kairakärkeen voidaan asentaa esimerkiksi inklinometri, jolla voidaan tarkkailla kairareian pystysuoruutta.

CPT-kärkien huonoina puolina voidaan mainita korkea hinta, rikkoutumisherkkyys kivisissä maaperissä tai puristettaessa kärkeä liian suurella voimalla esimerkiksi läpäistäessä kuivakuorikerrosta. Kärki voi rikkoontua myös lyötäessä tiiviisiin kerroksiin. Suomessa elektronisista kärjistä käytetyin on nykyään Memocone-kärki, joka varastoi kairausdatan kärjessä olevaan muistiin.

Memocone on käytössä joko kaksi- tai kolmekanavakärkenä. Kaksikanavaisena kärki mittaa erillisillä voima-antureilla vaippavastusta ja huokosvedenpainetta tai vaippa- ja kärkivastusta. Kolmekanavaisena rekisteröidään kärki- ja vaippavastusten lisäksi huokosvedenpainetta.

Itse kairaus tapahtuu samoilla menetelmillä ja tankojen puristusnopeutena käytetään 2 cm sekunnissa eli 1.2 m/min. Tankoja ei pyöritetä kairauksen aikana.

Yleisesti käytössä olevia, standardiehdotuksesta poikkeavia kärkiä ovat mm. hollantilainen puristinkairakärki, joka voi olla varustettu myös kitkavaipalla (kuva 5) ja neuvostoliittolainen puristinkairakärki. Lisäksi kairauksia suoritetaan yleisesti Andina ja Perez-kärjillä /4/.



Kuva 5. Hollannissa käytettävät standardiehdotuksesta poikkeavat puristinkairakärjet /4/.

Poikkeavana kärkenä voidaan tässä yhteydessä mainita myös puristin-heijarikairauksen irtokärki. Se poikkeaa sekä dimensioiltaan että karkikulmaltaan standardiehdotuksen mukaisesta kärjestä. Puristin-heijarikärki on esitetty kuvassa 6.

1.2. Puristin-heijarikairaus

1.2.1. Menetelmän kehitys

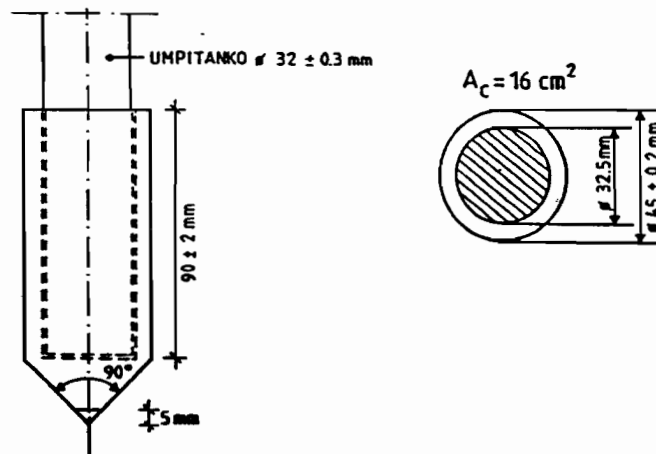
Suomessa geologisista olosuhteista johtuen pelkkä CPT-kairaus ei riitä koko maaperän profiilin selvittämiseksi. Sen tunkeutuminen pysähtyy viimeistään tiiviisiin maakerroksiin kuten moreeniin. Pienestä puristusvoimasta johtuen kärjen tunkeutuminen voi pysähtyä jo tiiviiseen silttikerrokseen. Tästä johtuen Helsingin kaupungin geoteknisen osaston johdolla kehitettiin puristin-heijarikairaus /12/, jossa yhdistettiin puristinkairaus ja perinteinen heijarikairaus, jossa käytetään pyöritystä. Menetelmän avulla saadaan puristinkairaamalla informaatiota pehmeämmistä maakerroksista ja heijarikairaamalla myös tiiviimmistä kerroksista. Tällöin heijarikairausvaiheen tuloksista voidaan arvioida esimerkiksi lyöntipaalujen tunkeutuvuutta, kun taas puristusvaiheessa saadaan maakerrosrakenne hyvin esille.

1.2.2. Käytettävä kalusto

Tankokalustona suositellaan käytettäväksi $\phi 32$ mm tankoja ja kärkenä tavallista $\phi 45$ mm heijarikairakärkeä (kuva 6).

Kairaukseen voidaan käyttää joko traktoriin tai monitoimivaunuun asennettuja menetelmään sopivia laitteita. Puristuskapasiteetin tulee olla vähintään 16 Kn ja vääntömomentin vähintään 200 Nm. Tällä pyritään varmistamaan, että puristukseen ja pyöritykseen on voimaa paksunkin savikerroksen jälkeen. Lisäksi laite on varustet-

tava riittävän tarkalla rekisteröintilaitteistolla. Käytännössä rekisteröinti suoritetaan puristusvoiman osalta 2 cm välein toisin kuin vääntömomentti, joka mitataan vain 20 cm välein.



Kuva 6. Puristin-heijarikairauksessa käytettävä irtokärki /12/.

1.2.3. Suositeltu kairautapa

Kairaus aloitetaan maaperän salliessa heti maanpinnalta puristamalla 1.2 ± 0.3 m/min nopeudella samalla pyörittäen tankoja 12 ± 3 r/min. Huomattavana erona tavalliseen heijarikairaukseen on tankojen pyöritys myös heijarointivaiheen aikana. Näin pyritään rekisteröimään vaippavastusta. Puristamista jatketaan, kunnes puristamiseen tarvittava voima on vähintään 16 Kn. Tämän jälkeen siirytään heijarikairaukseen, jolloin tankoja pyöritetään edelleen ja iskutiheytenä käytetään 25 - 45 iskua/min. Jos kyseessä on ollut vain ohut välikerros voidaan siirtä takaisin puristusvaiheeseen.

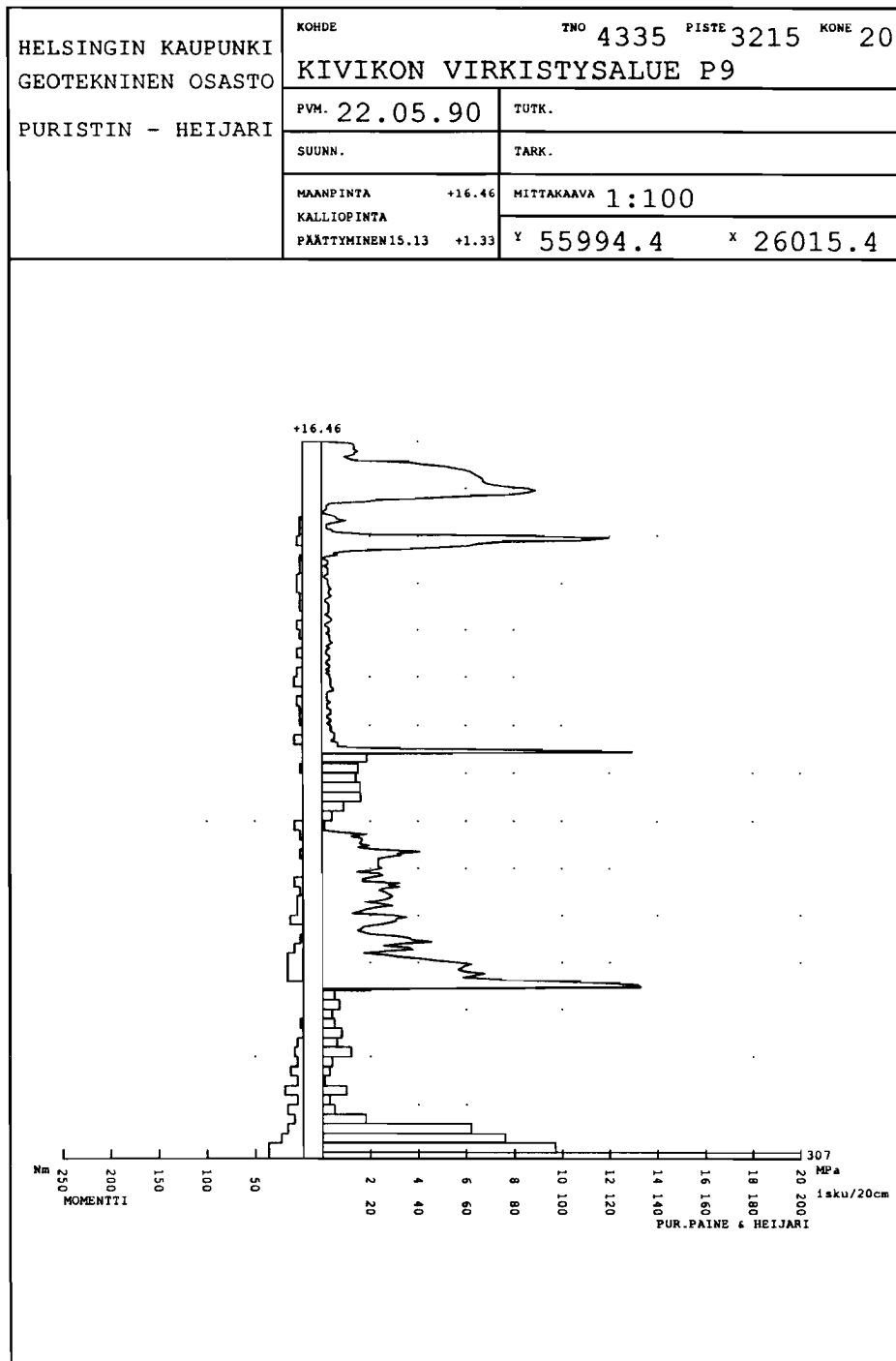
Puristin-heijarikairauksella voidaan määrittää kairausvastusten perusteella maalajit ja maakerrosrajat. Kärki- ja vaippavastuksen mahdollisten paikallisten erityisominaisuuksien selvittämiseksi on syytä suorittaa ver-

tailukairauksia CPT:llä. Maalajimääritysten sovittaminen paikallisiin olosuhteisiin tapahtuu vertaamalla mitattuja vasteita otettuihin näytteisiin. Puristin-heijarikairauksen soveltuvuus maaparametrien määrittämiseen on esitetty kuvassa 7 /12/.

SUURE	SOVELTUVUUS			
	SAVI	SILTTI	ÄIEKKA	MOREENI
1. KERROSRAJAT	+++	+++	++	++
2. MAALAJI	+++	++	++	++
3. KÄRKIVASTUS	++	+++	+++	+
4. VAIPPAVASTUS	+	+	+	-/(+)
5. SULJETTU LEIKKAUSLUJUUS	+	+	-	-
6. KITKAKULMA	-	-	+	-
7. PAINUMAOMI- NAISUUDET	-	+	+	-
8. TIIVIYS	-	+	++	++
9. SYVÄSTABILOI- TUIJEN PILAREI- DEN LEIKKAUS- LUJUUS	++	+	-	-

Kuva 7. Puristin-heijarikairauksen soveltuvuus maaparametrien määrittämiseen /12/. Merkinnot: +++ erinomainen, ++ keskimääräinen, + soveltuu jossain määrin, - ei sovellu

Kairaustulokset suositellaan esitettäväksi kuvan 8 mukaisesti. Tulostuksessa ero tavalliseen CPT-kairaukseen on lähinnä heijarin lyöntien lisääminen tulostusdiagrammiin. Lisäksi heijarikairausvastus tulostetaan pylväinä tavallisen diagrammin sijasta.



Kuva 8. Puristin-heijarikairauksen esimerkkitulostus
(Helsingin kaupunki, Geo)

1.3. Porakonekairaus

1.3.1. Nykykäytäntö

Suomessa porakonekairausta käytetään ensisijaisesti kalliopinnan määrittämiseen. Lisäksi sitä käytetään suoja-putkien ja pohjavesiputkien asennukseen sekä näytteiden ottoon tiiviistä maakerroksista /18/.

Kairaus aloitetaan maanpinnalta käyttäen ilma- tai vesihuuhtelua. Informaatio, joka kerätään kalliopinnan yläpuolisista kerroksista, on kairajaan tekemiä subjektiivisia havaintoja, joihin vaikuttavat kairajaan ammatitaito ja motivaatio. Kairauspöytäkirjaan merkitään mm.

- maalajit ja maakerrosrajat
- kairauksella lävistetyt kivet ja lohkat
- kalliopinnan sijainti
- tunkeuma
- kallion rikkonaiset vyöhykkeet ja merkittävät raot

Arvioidun kalliopinnan saavuttamisen jälkeen jatketaan kairausta yleensä 3 m kallioon, jolla varmistetaan kalliopinnan havainto oikeaksi. Kalliokairauksen aikana voidaan mitata 0.2 m tunkeutumaan tarvittava aika, jota mitattaessa on mahdollista arvioida kallion eheyttä ja mahdollista rakoilua sekä ruhjeita.

Tarkemman analyysin suorittamiseksi kallion rakenteesta voidaan suorittaa reikäkiikarointia ja vesimenekko-keitä. Paksun maapeitteen läpäisyn alapuolisen reiän kiikarointi edellyttää kuitenkin suojaputkien käyttöä.

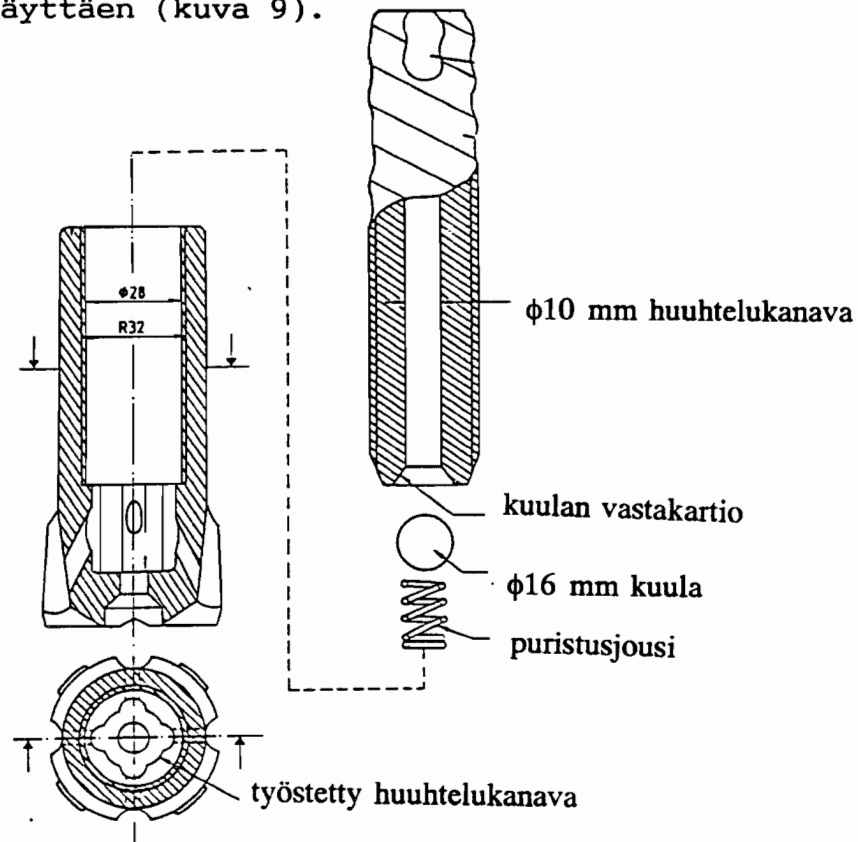
Meillä porakonekairausta ei ole käytetty maakerrosten tutkimukseen. Sitä vastoin porakonekairauksen kevyempi sovellutus, tärykairaus, on käyttökelpoinen karkea menetelmä esimerkiksi lohkatien kartoittamiseen putkilinjalla. Kairaus pysähtyy yleensä tiiviiseen maakerrokseen tai kiveen. Tärykairauksen käyttö ei nykyään ole yhtä yleistä kuin muiden pohjatutkimusmenetelmien käyttö. Syynä on saatavan tiedon vähäisyys ja epätarkkuus.

1.4. Norjalainen totaalikairaus

1.4.1. Menetelmän kehitys

NGI:n kehittämässä "totaalikairauksessa" /13/ on mahdollista selvittää maakerrosrajat, mutta erona kevyempiin menetelmiin kairausta voidaan jatkaa myös tiiviisiin maakerrokseen ja kallionpintaan asti.

Kehitetyssä menetelmässä käytetään kierto-puristinkairauksen ja iskuporauksen yhdistelmää. Kairaustankoina käytetään 1.0, 2.0 tai 3.0 metrin pituisia, $\phi 44$ mm poratankoja. Erillistä kairauskärkeä ei käytetä, vaan kierto-puristusosuuskin kairataan venttilöityä porakruunua käyttäen (kuva 9).



TOTAALIKAIRAUS

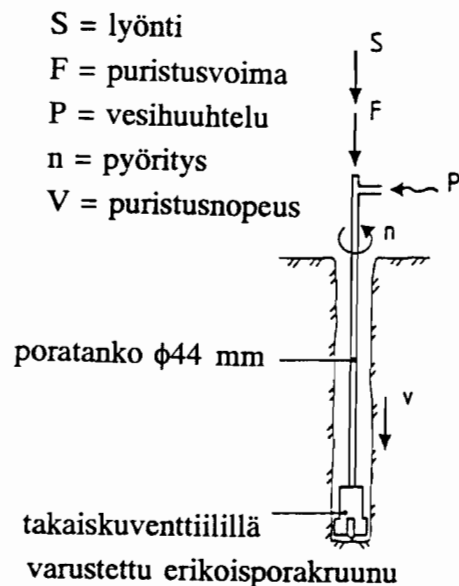
Kuva 9. Norjalaisten "totaalikairauksessaan" käyttämä venttilöity porakruunu /13/.

Porakruunun halkaisija voi olla $\phi 51$ mm, $\phi 57$ mm tai $\phi 64$ mm. Pienimmän kruunukoon käyttöä ei kuitenkaan suositella.

Menetelmää käytetään jonkin verran Norjassa, mutta laajempaan käyttöön esimerkiksi Skandinaviassa sitä ei vielä ole otettu. Syynä on ehkä kruunun mekanismi, jonka kestävyydestä ei ole kokemusta kruunun erittäin kovissa olosuhteissa.

1.4.2. Kairaus

Kairaus alkaa kierto-puristinkairauksena, jolloin tanko ja puristetaan maahan samalla pyörittäen. Kun puristusnopeutta ei enää voida pitää määrätyn suuruisena tiiviimmistä maakerroksista johtuen, lisätään tankojen kiertonopeutta, aloitetaan huuhtelu, iskuporaus tai käytetään näiden yhdistelmää (kuva 10). Puristusnopeuden vakiointipyrkimyksistä huolimatta sille on ollut pakko antaa huojuntamahdollisuus. Tämä näkyy myös kuvasta 11.

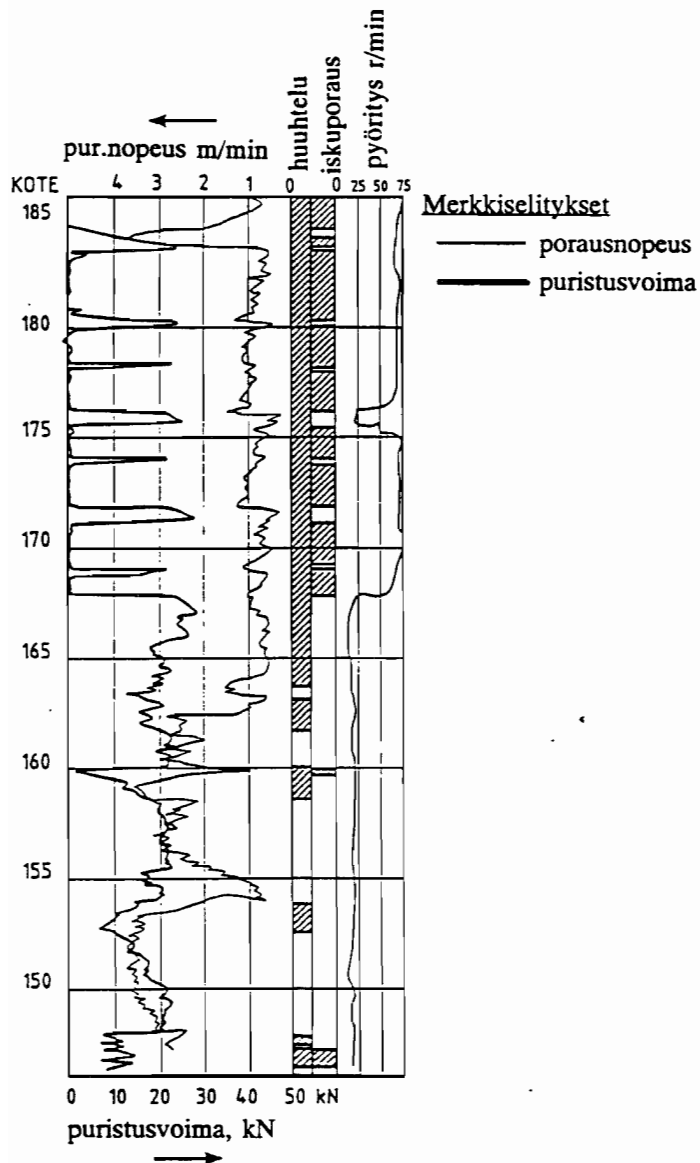


Kuva 10. Periaatekuva "totaalikairauksesta" /13/.

Puristusnopeutena pyritään käyttämään $3 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m/min}$ ja pyöritysnopeutena $25 \pm 5 \text{ r/min}$.

Kairaustulosten rekisteröinti tapahtuu automaattisesti. Puristusvoima mitataan vähintään 5 cm välein ja muut parametrit vähintään 20 cm välein. Kairauksen aikana mitataan mm. seuraavia parametreja (kuva 11):

- syvyys
- etenemiseen tarvittava puristusvoima
- tankojen pyöritysnopeus
- tunkeutumisnopeus
- huuhteluvedenpaine



Kuva 11. Totaalikairauksen esimerkkitulostus /13/.

Tiiviimmissä maakerroksissa vaaditaan huuhtelua ja tällöin mitataan huuhteluvedenpainetta. Huuhtelu aiheuttaa kuitenkin hankaluuksia maalajitulkinnessa kierto-puristinkairaosuudella. Tästä johtuen norjalaismenetelmässä sitä ei käytetä muulloin kuin iskevän porauksen aikana.

Rekisteröintiin käytetään samoja laitteita kuin tässäkin työssä käytettiin.

1.5. Puristin-porakonekairaus

1.5.1. Tavoitteet

Kehittämällä porakonekairausta pyrittiin hyödyntämään myös kallionpinnan yläpuolella olevasta maaperästä saatava informaatio. Perinteisessä porakonekairauksessa kairaaja merkitsi pöytäkirjaan tekemiään havaintoja maalajeista, kivistä, lohkarista yms. Kehitettävässä puristin- porakonekairauksessa pyrittiin selvittämään myös maalajit, mikä on useimmissa tapauksissa riittävä tieto alustavaa suunnittelua varten. Suunnittelun alkuvaiheessa hankittavilla alustavilla maaperätiedoilla voidaan vähentää päällekkäisten lisätutkimusten tarvetta. Lisäksi selvitettiin iskuporauksen aikaisten ns. poraparametrien hyödyllisyyttä tiiviiden kerrosten ominaisuuksia tutkittaessa.

Kehitettävän menetelmän tavoitteena oli yhdistää kaksi erillisinä yleisesti käytössäolevaa menetelmää: puristin- ja porakonekairaus. Tämän mahdollistaa tavallisen porakruunun suojana puristusvaiheen aikana käytettävä CPT-kairakärjen muotoinen kertakäyttöinen kartiokärki, joka sulkee huuhtelukanaavat puristusvaiheen ajaksi. Puristaminen ja pyörittäminen tapahtuu vakionopeuksilla. Puristusvoiman noustessa tietyn rajan yli siirrytään porakonekairaukseen, jolla pystytään tunkeutumaan tiiviiden moreenikerrosten läpi kallionpintaan asti. Tässä vaiheessa kärjen huuhtelukanaavat sulkenut kärkekappale

rikkoontuu ja huuhtelu aloitetaan joko ilmalla tai vedellä.

Geoteknisen suunnittelijan näkökulmasta ongelmana on selkeän tulkintatavan puuttuminen. Maalajien tunnistettavuuden tulisi olla hyvä ja toisaalta kehitettävän kairausparametrin tulisi olla mahdollisimman havainnollinen maakerrosten ominaisuuksien selvittämiseksi. Varsinainen kerrosrakenne on havaittavissa jo puristusvoimasta, joten sitä varten ei parametrien kehittäminen ole tarpeen.

1.5.2. Kehitettävä menetelmä

Kehitettävässä porakonekairauksessa käytettiin soveltuvin osin CPT-kairausta ja samaa menetelmää kuin NGI:n kehittämässä "totaalikairauksessa". Norjalainen totaalikairaus oli esikuvana monessakin suhteessa, koska kyseessä oli samankaltaisen porausmenetelmän kehitystyö. Vaikka yhtymäkohtia löytyy myös toiseen norjalaiseen tutkimusmenetelmään, kierto-puristinkairaukseen, pyrittiin välttämään siinä esiintyviä tulkintaa hankaloittavia seikkoja. Tällaisia seikkoja ovat kairauksen edetessä lisääntyvät pyöritysnopeudet ja puristusvoimat. Suomessa yleistyvään puristin-heijarikairaukseen erona on suurempi nopeus ja kyky läpäistä kaikki maakerrokset ja varmistaa kallion pinta.

Kairaus aloitetaan puristinkairauksena käyttäen 3.0 m/min puristusnopeutta ja 30 r/min pyöritysnopeutta. Näin edetään tiiviisiin maakerroksiin asti mitaten koko kairauksen ajan puristusnopeutta ja puristamiseen tarvittavaa voimaa sekä kiertämiseen tarvittavaa vääntöä. Tiiviisiin kerroksiin saavuttaessa, kun puristusvoima ei enää riitä, siirrytään porakonekairaukseen. Porausta jatketaan tiiviiden maakerrosten läpi havaittuun kallionpintaan, josta voidaan porata edelleen kolme metriä kalliopinnan varmistamiseksi. Kairattaessa ilman suoja-

kappaletta rekisteröidään myös huuhteluvedenpaineen muutokset.

Ongelmatilanne muodostuu, kun porauksella läpäistäänkin esimerkiksi kivinen maakerros tai täyte, jolloin kartiokärki rikkoutuu ja kairaus jatkuu kivisen kerroksen alaisessa pehmeässä maakerroksessa jälleen puristin-kairauksena. Kun tunkeutumisnopeus kairattaessa on niinkin suuri kuin 3.0 m/min voidaan reikä tarvittaessa kairata uudestaan kovan kerroksen läpäisemisen jälkeen. Kairaus voidaan tehdä joko samassa reiässä tai useimmisssa tapauksissa voidaan reiän paikkaa siirtää ja tehdä uusi kairaus.

1.5.3. Puristin-porakonekairauksen erityisvaatimukset

Tavallisesta porauksesta puristin-porakonekairauksen erottaa vain vakionopeuksien, ennalta määriteltujen voimien ja automaattinen kairaustulosten rekisteröinti.

Tutkimuksessa käytettyyn koneeseen tehtyjen helppokäyttöisten sähköisten ohjausten avulla uuteen menetelmään siirtyminen ei vaadi porarilta suuria ponnisteluja. Kaikki nopeudet - sekä puristus- että porausvaiheen aikana - ovat vapaasti säädettävissä käyttöpaneeliin sijoitetuista potentiometreistä. Myös puristusvoima on säädettävissä erillisestä paineenalennusventtiilistä. Halutun kuorman säätöön tarvittava puristusvoimaa osoittava analogimittari on sijoitettu käyttökytkinten yhteyteen. Ensimmäisten porausten jälkeen todettiin, että myös vääntömomenttia on voitava rajoittaa kalustohukan estämiseksi.

Puristusvoima rajoitettiin puristusvaiheen aikana 15 kN ja porausvaiheen aikana käytettiin 8-10 kN. Vääntö rajoitettiin 500 Nm, jotta 1"1/4' porakalusto kestäisi väännön. Laitteistovalmistajat ilmoittavat kalustolle usein erittäin suuria puristus- ja pyöritysvoimien arvoja, mutta ne täytyy kuitenkin olla säädettävissä kul-

loisenkin kaluston mukaisiksi, kuten tässäkin työssä tehtiin. Suurimmat voimat tulevat kyseeseen esimerkiksi suojaputkikalustoa käytettäessä ja näytteitä otettaessa.

Vaikein vaatimus uuden menetelmän käyttämiseksi onkin nopeuksien ja voimien vakiointi. Tämä saattaa olla erityisesti vanhoissa laitteissa vaikeata toteuttaa, jopa mahdotonta. Projektilaitteessakin ilmeni ongelmia nopeuden vakioinnin suhteen. Toisaalta, koska nopeuden muutokset mitattiin ja ne olivat luonteeltaan säännöllisiä, oli niiden merkitystä mahdollista arvioida. Käytännössä puristusnopeus kasvoi lineaarisesti syöttöpituuden matkalla alaspäin mentäessä. Puristusvoimakäyristä todettiin nopeudenmuutoksen aiheuttavan erittäin vähän muutoksia maan vasteessa. Tämän suuntaisia tuloksia on myös Kari Melander esittänyt diplomityössään /12/.

1.5.4. Tulosten esittäminen

Tekstin yhteydessä tarkastellaan vain valikoiduista pisteistä tehtyjä kairauksia. Yhteensä tutkimusprojektissa käytettiin referenssikairaukset mukaanlukien noin 80 tutkimuskairausta.

Tulosten voidaan sanoa olevan edustavia, joskin hajontaa esiintyy. Hajonta johtuu etenkin Itäharjun alueella maaperän epähomogeenisuudesta. Myös kairauspisteiden etäisyydellä on ko. alueella merkitystä. Alunperin tarkoitus oli kairata reiät 2.5 metrin etäisyydelle toisistaan, mutta maasto-olosuhteista johtuen ne jouduttiin pahimmissa paikoissa kairaamaan jopa yli viiden metrin etäisyydelle toisistaan. Myös se, että porauspisteiden korkeuskoordinaatteja ei mitattu, aiheuttaa tuloksissa pieniä eroavaisuuksia.

Työssä esitettyjen tulosten ja havaintojen pohjana ovat porauksen aikaiset havainnot. Kirjoittaja on kairannut CPT-kairaukset ja puristin-porakonekairaukset kahta porakonekairausta lukuunottamatta.

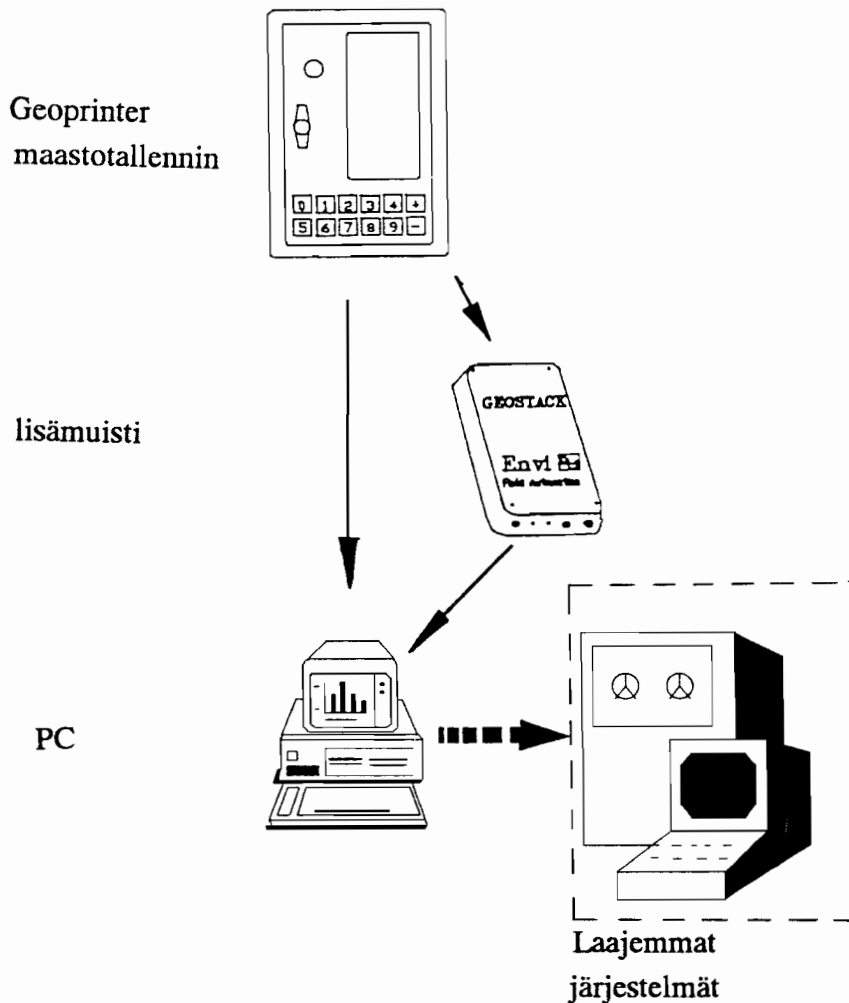
Geoprinter-maastotallentimesta tiedot voidaan purkaa mikrotietokoneelle joko suoraan maastossa tai toimistossa. Myös lisämuistin käyttö on mahdollista. Huomattavaa on, että tiedon purku kuten koko Geoprinterin käyttökin on suunniteltu kairaajan näkökulmasta, jolloin kairaaja itse voi suorittaa datan siirrot ja mahdollisen käsittelyn. Erityisesti Intergraf-ympäristöön sovitettut ohjelmat on kehitetty siten, että maastohenkilöstö voi itse tehdä tulosteisiin tarvittavat muutokset. Tämä edellyttää luonnollisesti käyttäjiltä halua ja valmiuksia tiedon käsittelyyn.

Tietoa voidaan jalostaa edelleen erilaisilla cad-ohjelmistoilla haluttuun muotoon. Tieto voidaan tallettaa tietokantoihin tai kairauspisteet voidaan arkistoida suoraan diagrammeina käytettäväksi edelleen suunnittelussa. Tietokannoissa on huomattavana etuna koko maastopisterekisterin hallintamahdollisuus. Jokainen kairauspiste on käyttäjän ulottuvilla aina tarvittaessa.

Geoprinterin keräämää, PC:llä käsiteltyä dataa on mikroympäristön lisäksi käytetty hyvällä menestyksellä suuremmissa järjestelmissä esimerkiksi Intergraf- ja Tekla-sovelluksissa. Tämä vaatii kuitenkin joko ohjelman, joka muokkaa datan uuden järjestelmän käyttöön sopivaksi, tai se vaatii uudelta ohjelmistolta kykyä käsitellä "konekielisen" formaatin tiedostoja oikein. Koko tiedonkeräysjärjestelmän laitteistokaavio maastosta toimistoon on esitetty kuvassa 12.

Diagrammit on tulostettu GeoAuto-ohjelmalla. Tällä ohjelmalla voidaan tutkimusvaiheessa erittäin joustavasti muuttaa piirretyn diagrammin parametreja. Piirrettäväksi haluttavat, rekisteröidyt kanavat voidaan tulostaa halutussa järjestyksessä ja halutussa mittakaavassa. Tämän lisäksi voidaan laskea ja tulostaa tarvittava määrä mitä tahansa laskennallisia parametreja. Laskentarutiinit määritellään ohjelman käyttämissä ns. filttäreissä, joiden avulla GeoAuto tulostaa diagrammit cad-järjestelmien yleisesti hyväksymään DXF-muotoon. Tämän jälkeen voidaan

tuloksia muuttaa vain graafisesti tai muuttamalla filtteriä ja suorittamalla laskenta ja käännös uudestaan. Toisaalta, kun halutaan tehdä laskennallisia systemaattisia muutoksia, on aina mahdollista muokata filtteriä ja muodostaa ja tulostaa uudelleen DXF-tiedosto.



Kuva 12. Laitteistokaavio: Kairaustieto kulkee toimistolle joko suoraan tai lisämuistin avulla. Tiedot voidaan siirtää PC:ltä laajempiin järjestelmiin.

Yleisesti tulostuksen yhteydessä käytetään myös tasointa. Tyypillisiä tasoitettavia käyriä ovat esimerkiksi puristusvoima ja -nopeus. Mittaamalla valituista suureista esimerkiksi viiden havainnon keskiarvo ja antamalla suurimmalle poikkeamalle raja arvo saadaan käyrät tasaisemmiksi ja helpommin tulkittaviksi.

1.6. Parametrien määrittäminen puristinkairauksilla

Maakerrosrajojen ja tiiviyyden lisäksi puristinkairaus-tuloksista pyritään selvittämään myös mm. maan kitkakulma, leikkauslujuus, tiiviys ja painuman laskennassa tarvittavia parametreja. Tulkinta on selvästi erilainen koheesio- ja kitkamaakerroksissa. Tässä rajoitutaan kuitenkin esittämään vain suuntaviivoja.

Sisäisen kitkakulman määrittämiseksi Hans Eklund ja Stefan Eriksson /6/ esittivät käytettäväksi Robertsonin ja Campanellan /16/ kuvaajasta kehittämää yhtälöä (1):

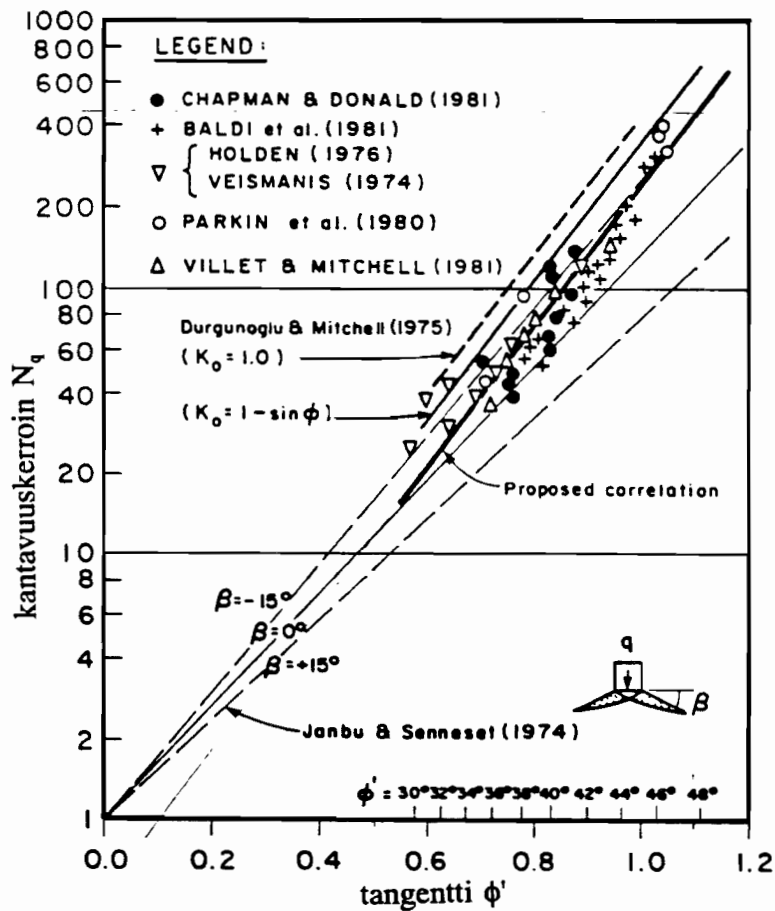
$$\phi' = \arctan (0.096 + 0.386 \log N_q) \quad (1)$$

N_q saadaan kaavasta (2)

$$N_q = \frac{q_c}{\sigma'_{vo}} \quad (2)$$

missä q_c on kärkivastus
 ϕ' on tehokas kitkakulma
 σ'_{vo} on tehokas jännitys

Graafisesti kitkakulman määrittäminen on esitetty kuvassa 13, jossa on myös muiden tutkijoiden käsityksiä kitkakulman ja kärkivastuksen suhteesta. Merkittävä ero esimerkiksi Meyerhofin aikaisemmin esittämiin /3/ tuloksiin on tehokkaan jännityksen huomioiminen kitkakulmaa määritettäessä.



Kuva 13. Kitkakulman määrittämisessä käytetty, Robertsonin ja Campanellan /16/ laboratoriokokeisiin perustuva määrittäysdiagrammi.

Puristinkairalla voidaan häiriintymätöntä leikkauslujuutta arvioida käyttäen kokeellisesti määritettyä kaavaa (3) /11/:

$$c_u = \frac{(q_c - \sigma'_{v0})}{N_c} \quad (3)$$

missä c_u on häiriintymätön leikkauslujuus
 q_c on kärkivastus
 N_c on kokeellinen laaduton suure.
 σ'_{v0} on tehokas jännitys

Koska mm. N_c vaihtelee suuresti jopa samantyyppisissä savissa /9/, on luotettavampien leikkauslujuusarvojen määrittämiseksi kärkevaston avulla syytä tehdä vertailevia tutkimuksia esimerkiksi siipikairalla. Tällöin saadaan paikallisia maaperäolosuhteita vastaavat tarkemmat arviot leikkauslujuuden ja kärkevaston suhteesta.

Erittäin tärkeä CPT-tulkinnassa käytettävä suure on ns. kitkasuhde. Sen avulla voidaan helpottaa mm. maalajitulkintaa. Kitkasuhde määritetään kaavan 4 mukaisesti.

$$f_r = f_s / q_c \quad (4)$$

missä f_s on vaippavaston arvo
 q_c on kärkevaston arvo

Painumaa voidaan arvioida /3/ esimerkiksi kimmo-modulin E_s avulla:

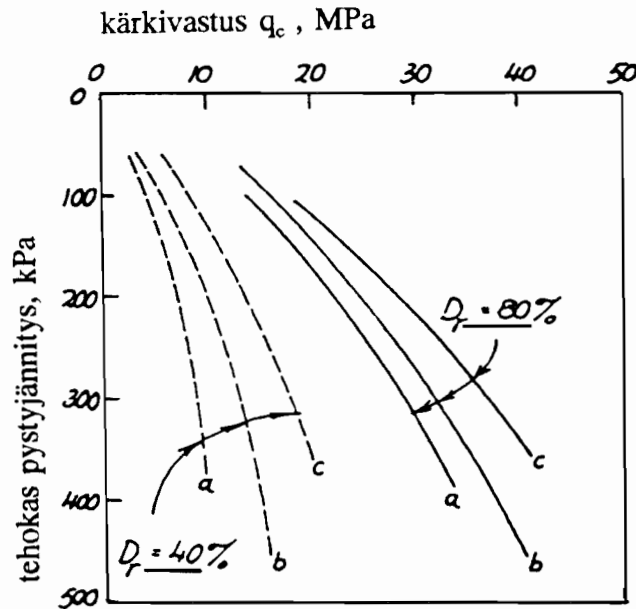
$$E_s = \alpha * q_c \quad (5)$$

missä E_s on kimmo-moduli
 α on kokeellisesti määritetty

$$\alpha = 2 * (1 + D_r^2) \quad (6)$$

ja D_r on hiekan suhteellinen tiiviys

Puristinkairauksella pystytään arvioimaan myös maalajin suhteellista tiiviyyttä. Eri tutkijoiden esityksiä kärkevaston ja tiiviyn suhteesta tehokkaan jännityksen funktiona on esitetty kuvassa 14 /3/.



Kuva 14. Suhteellisen tiiviyden vaikutus kärkivastukseen /3/. a: Schmertmann (1975), b: Boldi et al (1982), c: Villet ja Mitchell.

1.7. Parametrien määrittäminen porakonekairauksilla

Poraparametrit ovat jatkuvan kehittelyn alaisia. Näin ollen on tärkeätä, että tällä hetkellä käytössä olevissa ohjelmissa on mahdollisuus laskea parametrit uudelleen. Näin on mm. tässä työssä käytetyssä ohjelmistossa.

Poraparametrien tehtävänä on kuvata maan tai kallion ominaisuuksia ja pystyä minimoimaan suunnittelijalle annettavien diagrammien määrää. Suunnittelijan olisi helpointa käyttää vain yhtä puristinkairatulosten omaista diagrammia, joka sisältäisi kaiken tarvittavan informaation. Ongelma on kuitenkin erittäin vaikea, koska lähes jokainen mitattu suure sisältää informaatiota, joka erilleen piirrettynä saattaa olla hyvinkin havainnollinen. Näin ollen tarpeellisten kahden, kolmen tai jopa useamman suureen yhdistäminen yhdeksi diagrammiksi siten, että kaikista suureista diagrammiin tulevat vain tulkintaa helpottavat seikat, on lähes mahdotonta. Esi-

merkiksi ranskalaiset käyttävät automaattista maalajitulkintaa, mutta silti suunnittelijalle annetaan diagrammit kaikista mitatuista suureista. Tällä eliminoidaan automaattisen tulkinnan käsittelemät, mahdolliset virherekisteröinnit.

Ranskalaiset ovat kokeilleet poraparametrien käyttöä jonkin aikaa ja muodostaneet joko teoreettisia tai kokeellisia laskennallisia parametreja /15/.

1.7.1. Energiakaava

Teoreettinen tunkeutumiseen käytetty energia /15/ laskeaan kaavasta (7 a) tai (7 b). Kaavat ovat periaatteessa samat, vain esitysmuoto on erilainen.

$$W = C \cdot \omega \cdot D_t \quad (7a)$$

$$W = C \cdot \frac{\omega}{V} \quad (7b)$$

missä	C	on vääntömomentin arvo
	ω	on pyöritysnopeus
	V	on nopeus
	D_t	on 5 mm etenemiseen tarvittu aika

Eo. kaavojen tulkinta on ranskalaisten mukaan osoittautunut hyödylliseksi ja käyttökelpoiseksi kovissa maaperissä ja tulkittaessa kivistä tai kalliosta rekisteröityä dataa. Suomessa näistä kaavoista saattaisi olla hyötyä esimerkiksi moreenia porattaessa. Kaavan käyttökelpoisuutta tässä työssä rajoitti kuitenkin se, ettei pyöritysnopeutta mitattu, vaan se jouduttiin oletamaan vakioksi. Todellisuudessa pyöritysnopeus kuitenkin vaihtelee. Johtuen siitä ettei pyöritysnopeutta tässä työssä

mitattu, ei perusteita kaavan käyttömahdollisuuksien arvioinnille ole.

1.7.2. Vaihtelu-indeksi

Ns. Vaihtelu-indeksi /15/ on Pfisterin artikkelin mukaan käyttökelpoinen helposti läpäistävissä maakerroksissa. Indeksien laskenta tapahtuu kaavalla (8).

$$A = 1 + \frac{P}{P_0} - \frac{V}{V_0} \quad (8)$$

missä P on kärjessä vaikuttava nettovoima. Puristusvoimassa huomioidaan siis tankojen ja kruunun paino.
 P_0 on teoreettinen P :n maksimiarvo
 V, V_0 ovat nopeudet vastaavasti

Vaihteluindeksien käyttöalueina kannattaisi kokeilla puristusosuuden ja helposti läpäistävien porausvaiheen aikaisten maalajien tulkintaa. Näin tehtiinkin myöhemmissä tulosteissa. Kuitenkin, jotta tulkinnessa säilytettäisiin jonkinlainen selkeys, pyritään puristusvaiheen aikainen tulkinta tekemään samoilla perusteilla kuin CPT-kairauksenkin tulkinnot.

1.7.3. Somertonin indeksi

Somertonin indeksi /15/ on laboratoriossa pyörittävästä porauksesta tehdyn tutkimuksen perusteella määritelty arvo, jolla pyritään kuvaamaan samoja asioita kuin kaavoissa (7 a, 7 b) lasketulla poraamiseen käytetyllä energiallakin. Somertonin indeksi on esitetty kaavassa (9). Symbolit ovat samat kuin aikaisemmissakin kaavoissa.

$$S_d = P \cdot \sqrt{\frac{\omega}{V}} \quad (9)$$

Somertonin indeksistä ei ole laskettu vertailudiagrammia, koska sen käyttöalue rajoittuu artikkelin mukaan kiven poraukseen.

1.7.4. Tunkeutumaparametri B

Tutkimuksen edetessä havaittiin, että maa-aineksen tiiviyttä kuvaa hyvin parametri B, joka lasketaan kaavalla (10).

$$B = \frac{F}{V} \quad (10)$$

missä F on puristusvoima
 V on tunkeutumisnopeus

Puristusvoima F on esitetyissä tulosteissa suoraan koneesta rekisteröity voima eikä siinä ole huomioitu tankojen eikä kruunun painoa. Poratangot painavat noin 10 kg/metri. Käytetyt voimat ovat kuitenkin suuruusluokkaa 10-15 kN.

Parametri B on otettu mukaan kaikkiin työssä tehtyihin tulostuksiin, koska se on yksinkertaisuudestaan huolimatta käyttökelpoinen. Sen avulla on mahdollista havainnollistaa kerrosrakennetta sekä puristus- että porausvaiheessa, jonka lisäksi se pystyy erottelemaan saman maakerroksen tiiviysvaihtelut. Perusoletuksena on kuitenkin nopeuden vaihtelun salliminen.

1.7.5. Vesimenekki

Vesimenekkiä on käytetty maalajien tulkintaan pääasiassa Ruotsissa ja Norjassa. Suomessakin kokeiluja on tehty, mutta laajemman kokemuksen puuttuminen johtuu lähinnä siitä, ettei tarvittavaa rekisteröintivalmiutta ole kuin yhdessä koneessa. Helsingin kaupungin kokemusten mukaan vesimenekki ei kuvaa vedenläpäisevyyttä porattaessa tavallisella porauskalustolla. Sitä vastoin timanttikairauksessa ja kairauksissa putkikalustolla, voi menetelmällä olla käyttöä.

Vesimenekki lasketaan kaavalla (11)

$$Q_{rel} = \frac{P_{water}}{W_{water}} \quad (11)$$

missä Q_{rel} on vesimenekki
 P_{water} on huuhtelupaine
 W_{water} on huuhtelun määrä

2. LAITTEISTO

2.1. Käytettävä porauskalusto

2.1.1. Poravaunu

Tässä työssä käytettiin Geomachine Oy:n valmistamaa keskiraskasta monitoimiporakonetta GM 3000. Koneen kapasiteetti on porausteknisesti riittävä. Lisäksi vaunuun sijoitetulla rekisteröintilaitteistolla voidaan mitata tarvittavat kairautiedot. Puristusvaiheen aikana käytettyyn noin 15 kN puristusvoimaan tarvittava vastapaino muodostui koneen omasta painosta. Tällöin välttyttiin hankalalta ja aikaavievältä ankkuroimiselta.

GM 3000 soveltuu tässä työssä kehitettävän puristinporakonekairauksen lisäksi mm. timanttikairaukseen ja kallionporaukseen (kuva 15). Myös muiden kairauksen suorittaminen ja näytteiden otto on mahdollista vaunun varustuksesta riippuen.

Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat mm.

- puristuskapasiteetti, joka on ankkuroituna 50 kN
- poravasaran jatkuva iskuteho n. 6.5 kW
- porakoneen jatkuva vääntömomentti: 570 Nm

2.1.2. Tankokalusto

Kairauskalustona käytettiin 1"1/4' kuusikulmaisia, sisäkierteellisiä poratankoja. Kairausta aloitettaessa porakruunuun asennettiin kärkekappale, jolla suoritettiin puristinkairausosuus. Tankopituutena käytettiin pääosin 1.5 m. Myös 1.8 metrin muhvollisia tankoja kokeiltiin. Muhvillisilla 1.8 metrin pituisilla ja 1.5 metrin muhvitomilla ei havaittu muita eroja kuin se, että muhvollisia tankoja ylös nostettaessa esiintyi kiinnikiilautumista.



Kuva 15. GM 100 , keskiraskas monitoimiporakone

2.2. Kärki

2.2.1. Yleistä

Kärjen suunnittelussa suurimpana ongelmana oli materiaalin valinta. Kärjen tuli olla riittävän luja, jotta se kestäisi kairauksen ensimmäisessä vaiheessa siihen kohdistuvan puristuspaineen ja kiertämisestä aiheutuvan kulutuksen. Riittävästä kestävyyydestään huolimatta sen oli hajottava porakonekairaukseen siirryttäessä niin pieniin osiin, ettei siitä ollut haittaa jatkettaessa

kairausta iskevänä porakonekairauksena. Lisäksi suojakappale oli suunniteltava siten, että sen käyttö on mahdollista kuluneenkin, useaan kertaan teroitettun, kruunun suojana.

2.2.2. Materiaalin valinta

Materiaalivalinnassa tärkeimmät huomioon otettavat seikat olivat riittävä kestävyys, valmistuksen helppous ja edullisuus. Toisaalta kärjen täytyi kuitenkin murtua ja hajota pieniin osiin, kun kuormitusta kasvatetaan riittävästi. Tästä johtuen ensisijaisia materiaali-vaihtoehtoja olivat hauraat metallit tai kovat muovit. Ne olivat valmistusteknisesti suhteellisen helppoja, koska kärki voidaan joko valaa tai sorvata. Lisäksi ne ovat riittävän kestäviä. Kärjen rikkoutuminen ei aiheuta ongelmia, koska yleisesti käytettävien iskuvasaroiden iskuteho on vanhanakin riittävä rikkomaan kärjen.

2.2.3. Kokeillut materiaalit

Onnistuneimmat kokeet tehtiin kärjillä, jotka oli valmistettu erilaisista muoveista. Molemmat kokeillut muovit olivat polyeetteripohjaisia polyuretaanielastomeerejä. Toinen oli selvästi sitkeämpi ja pehmeämpi ja toinen taas hauraampi ja kovempi. Myöhemmin näihin viitataan vastaavasti "musta" ja "harmaa". Kärkikappaleet valmistettiin valamalla. Yksittäisten kärkimateriaalien mahdollisia eroja pyrittiin eliminoimaan suorittamalla useita kokeita samalla kärkimateriaalilla.

Mustan muovin tärkeimpiä ominaisuuksia olivat seuraavat:

- | | | |
|-------------------|-----------|--------|
| - Vetomurtolujuus | DIN 53455 | 18 MPa |
| - Murtovenymä | DIN 53455 | 80 % |
| - Kovuus | DIN 53505 | 65 SHD |

Harmaan muovin vastaavat ominaisuudet olivat :

- Vetomurtolujuus	DIN 53455	35 MPa
- Murtovenymä	DIN 53455	8.8 %
- Kovuus	DIN 53505	75 SHD

Kärkimateriaalien alustavaa sopivuutta tutkittiin tavallisen porakonekairauksen yhteydessä traktoriin jälkiasennetun Tamrockin HLR 438 porakoneen avulla. Kärkimateriaaleja kokeiltaessa puristettiin suojattu kruunu pehmeiden kerrosten läpi, kunnes kairaus ei enää edennyt pelkästään pyörittämällä ja puristamalla. Tämän jälkeen siirryttiin tavalliseen poraukseen huuhtelua käyttäen.

2.2.4. Muodon valinta

Koska kairaus aloitetaan puristinkairauksena, pyrittiin irtokärjen muoto valitsemaan puristinkairakärjen muotoiseksi. Tällöin voitiin valita halkaisija ja kärkikulma.

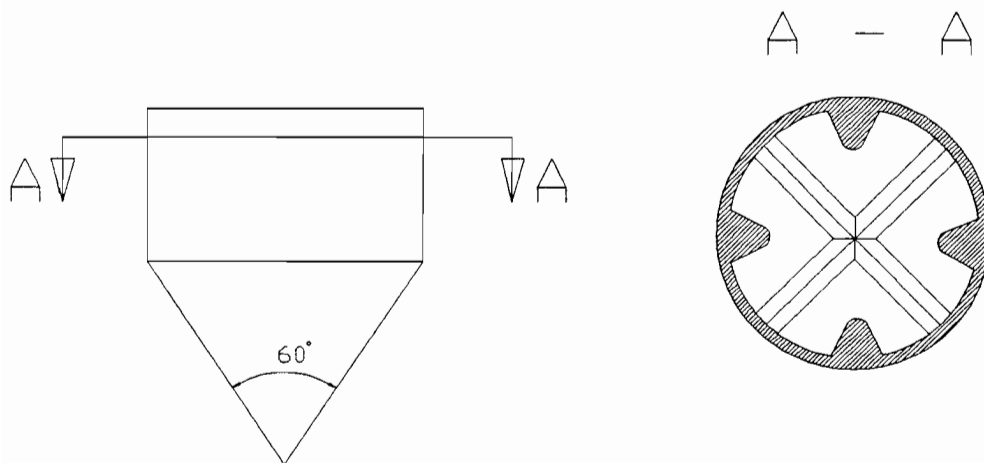
Irtokärjen halkaisija on riippuvainen porakruunun halkaisijasta, jona tutkimuksessa käytettiin $\phi 57$ mm. Tällöin kärkikappaleen halkaisijaksi saatiin $\phi 63$ mm. Näin ollen kärki oli halkaisijaltaan yli 20 mm suurempi kuin tangot. Kansainvälisen puristinkairakomitean suosituksen mukaan kärkikartion ja kitkavaipan halkaisijoiden tulisi olla samat. Tähän ei tämän kärjen osalta ollut mahdollisuuksia, mutta toisaalta mm. NGI:n tutkimusten mukaan /13/ suurempi kärjen halkaisija pienentää tankoihin kohdistuvaa vaippavastusta. Täten tankojen vaippavastuksella on vähemmän merkitystä, jos rekisteröitävää puristusvoimaa käsitellään kärkivastuksena ja vastaavasti sillä on vähemmän merkitystä laskettaessa vaippavastusta väännöstä. Myös Melander totesi /12/, että käytettäessä suurempaa kärjen halkaisijaa onnistuu vaippakitkan erottaminen väännöstä paremmin kuin silloin kun tankojen ja kärjen halkaisijat ovat lähellä toisiaan.

Yleisesti käytettyjen puristinkairakärkien kärkikulmat ja halkaisijat on kerätty taulukkoon 1. Taulukossa ei ole esitetty eri kärkien toleransseja, mutta useimpien kärkien halkaisija on käytännössä sama, noin 36 mm. Porakruunun suojana käytettävän kärkikappaleen kärkikulmaksi valittiin 60 astetta, koska se on kansainvälisen CPT- referenssikairauksen suositus ja sitä käytetään muutenkin yleisesti.

Kärki	Kärkikulma	Halkaisija
Dutch	60	35.7
Degebo	60	35.7
U.S.S.R.	60	36.0
Puristin-		
Heijari	90	45.0
Standardi-		
ehdotus	60	35.7

Taulukko 1. Käytössä olevien erilaisten kärkien halkaisijoita.

Kärkisuojaus sisäpuoli valettiin mahdollisimman tarkasti porakruunun ja sen huuhteluaukot peittäväksi. Tästä johtuen muottina käytettiin palakruunusta valmistettua muottia. Muottikruununa käytettiin Sandvik Coromant -kruunua, joten kärkikappaleen sisälle tuli neljä uloketta, jotka sulkevat kruunun sivussa olevat huuhteluaukot. Kärkikappaleen pohjalle tuli kovapalojen muotoiset syvennykset (kuva 16). Ne edesauttavat suojuksen paikallaanpysymistä puristusvaiheen pyörimyksen aikana. Huuhtelukanavien mahdollisimman tiivis sulkeminen on tärkeää, jotta maa-aines ei pohjaveden avulla paineellisenakaan pystyisi tukkimaan niitä.



Kuva 16. Kaaviokuva kärkisuojuksesta. Suojuksia on valmistettu $\phi 51$ mm, $\phi 57$ mm ja $\phi 64$ mm kruunuille. Suojuksen sopivuus on tarkastettu yleisimpien valmistajien kruunuihin. Kärkikulma on 60° .

2.2.5. Kärjillä tehdyt kokeet

Kokeet suoritettiin puristamalla ja pyörittämällä poratankoja kehitettävän menetelmän mukaisesti, siis 3 m/min ja 30 r/min. Kokeita tehtiin alkuun maanpinnalla kairamalla suoraan esimerkiksi maahan ja kallioon, jotta nähtäisiin kärkikappaleen puristuksen ja pyörityksen kesto. Maahan kairauksen jälkeen tarkastettiin aina huuhtelukanavien toimivuus, joka on edellytyksenä kairauksen jatkamiselle porakonekairauksena. Kokeita kärjen murto-kuorman määrittämiseksi ei tehty sen jälkeen, kun oli löydetty materiaali, jolla koko vaunun paino voitiin käyttää puristamiseen kärjen silti rikkoutumatta.

Mustalla muovikärjellä tehdyissä kokeissa ilmeni, että se vaati iskuporausta varsin pitkän aikaa, jopa 20 se-

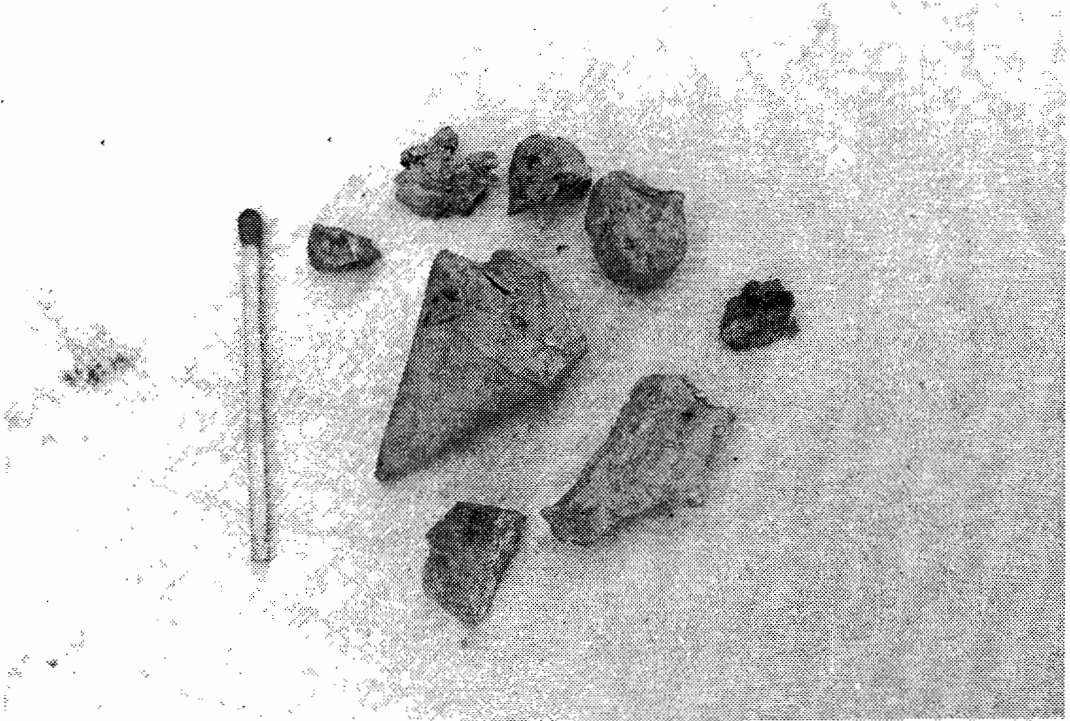
kuntia, ennenkuin se lopullisesti hajosi. Toisaalta läpäistäessä kova maakerros muodonmuutokset olivat lähinnä pyörityksestä aiheutuvasta suuresta kulumisesta johtuen suuria. Pahimmillaan syntyneet urat olivat 50 cm kairauksen jälkeen jo noin 5 mm syviä. Tämä aiheuttaa ongelmia varsinkin, jos kulumisen tapahtuu suojuksen ohuimmalta kohdalta, kartion pohjan tasolta. Tällöin suojus saattaa hajota kahteen osaan ja kruunun sivulla oleva rengas voi jäädä haitallisesti tankojen ympärille pyörimään ja kartio-osa siirtyä syrjään kruunun edestä. Ongelmia aiheutui myös siitä, että kärkekappale hajosi usein vain kahteen osaan. Suurin ongelma kuitenkin oli se, että kartio-osa jäi iskusta huolimatta kruunun eteen tulppaantuen porakruunun keskihuuhtelukanaavaan.

Harmaalla muovilla tehtiin vastaavat kokeet vastaavilla järjestelyillä. Kokeissa ilmeni, että harmaa muovi soveltuu huomattavasti paremmin kärkekappaleen valmistusmateriaaliksi. Maan pinnalla tehdyissä kokeissa kärkekappale hajosi jokaisessa tehdyssä kokeessa vähintään neljään isompaan osaan ja loppuosa kärjestä meni pieniksi muruiksi. Näin ollen porauksen jatkamista haittaavia palasia ei jäänyt eikä huuhtelukanaavien tulppaantumista esiintynyt. Huuhteluveden mukanaantuomia kärkisuojuksen paloja on esitetty kuvassa 17.

Puristamalla kärkeä silttikerroksen läpi samalla pyörittäen simuloitiin kehitettävän menetelmän mukaista kairausta. Kokeissa kärkekappale säilyi ehjänä ja suojausi kärkeä puristusvaiheen aikana. Kun siirryttiin varsinaiseen porakonekairaukseen, kärkekappale hajosi iskun voimasta toivotulla tavalla. Porakonekairauksessa huuhtelukanaavat pysyivät auki puristamisen aikana, ja kairauksesta voitiin jatkaa eteenpäin porakonekairauksena ilman ylimääräisiä toiminpiteitä. Todettiin myös, että suojakappaleen käyttöä tavallisessa porakonekairauksessa pitäisi aikanakin harkita. Tällöin työolosuhteet ja työnkulku paranisivat merkittävästi, koska huuhtelua ei tarvitsisi käyttää ennen varsinaiseen poraukseen siirtymistä. Näin ollen suojakappaletta käytettäessä huuhtelu-

veden tai -ilman mukana kulkeutuva maa-aines ei olisi kairaajien haittana puristusvaiheen aikana.

Harmaalla materiaalilla tehtyjen kokeiden onnistumisesta johtuen teetettiin kärkikappaleita lisää testattavaksi myös "tavallisessa" porakonekairauksessa.



Kuva 17. Huuhteluveden mukana pinnalle nousseita kärkisuojuksen kappaleita. Mittakaavana on tulitikku.

2.2.6. Kärki tavallisessa porakonekairauksessa

Porakruunun suojakappaleita annettiin perinteiseen poraukseen Helsingin kaupungin Geoteknisen osaston ja Geotiimi Oy:n poraajille yhteensä 50 kpl.

Molempien yritysten poraajat havaitsivat suojakappaleen käytössä selviä etuja. Huuhteluveden ja -ilman kanssa ei tarvittu mitään toiminpiteitä ennen iskevään poraukseen siirtymistä. Näin hyvin onnistuttiin työmailla, joilla ei ollut paksuja louhetäyttöjä. Täyttöjen läpäisy täytyi suorittaa poraamalla huuhtelua käyttäen. Suojus asennettiin kruunun päälle vasta, kun täyttö oli läpäisty. Tämän jälkeen kairausta voitiin jatkaa puristamalla niin

pitkälle kuin koneen puristuskapasiteetti riitti. Kärki pystyi läpäisemään ohuen noin 10 cm routakerroksen suoraan puristamalla ilman erillistä roudan läpäisyä.

Kun puristusvoima ei enää riittänyt maakerrosten läpäisemiseen pelkästään puristamalla, siirryttiin iskevään poraukseen ja aloitettiin huuhtelu. Suoritetuista 50 porauksesta neljässä jouduttiin huuhtelukanaavia erikseen avaamaan. Tällöin tankoja nostettiin noin 10 cm ja sen jälkeen tankoja iskettiin tankoleukoja vasten. Yhdessäkään pisteessä ei kuitenkaan jouduttu nostamaan tankoja kokonaan ylös tukkeutumisen takia. Syynä kanavien tukkeutumiseen arveltiin olevan epätasaisen puristuksen aiheuttaman suojuksen rikkoutumisen sen tavatessa esimerkiksi terävän lohkareen. Pelkästään tasaiseen maahan puristamalla ei kärkeä onnistuttu rikkomaan käytössä olleilla noin 15 kN kuormilla. Puristuskapasiteettin yläraja muodostui poravaunun omasta painosta, koska ankkurointia ei käytetty. Myös ympäröivän täytteen putoaminen avattuun kairareikään saattoi aiheuttaa kärjen ennenaikaiseen rikkoutumiseen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että suojakärjen käyttö kallionpinnan tavallisten varmistusporaustenkin yhteydessä on järkevää pehmeissä maakerroksissa.

Käytettäessä suojakärkeä säästetään porauksessa merkittävästi aikaa, koska huuhtelu aiheuttaa töitä vasta, kun kärkikappale on rikkoutunut. Toisaalta pehmeissä kerroksissa tapahtuvan huuhtelun aiheuttaman ylipaineen muodostuminen maaperässä voidaan välttää. Tällöin ei maaines pääse tankojen vaihdonkaan aikana huuhtelukanaaviin aiheuttaen tukkeutumista.

2.3. Rekisteröintilaitteet

2.3.1. Kairaustiedon rekisteröinti

Rekisteröinti suoritettiin Enviromental Mechanics AB:n valmistamalla Geoprinter-rekisteröintilaitteella. Tallentimen muistiin mahtuu kairausmenetelmästä riippuen maksimissaan noin 600 m kairaustiedot. Tässä työssä käytetyssä ns. monikanavarekisteröinnissä kerätyn tiedon määrä oli kuitenkin moninkertainen tavanomaisiin kairauksiin nähden. Näin ollen todellinen kapasiteetti oli noin 200 kairametriä. Kairauksen aikana rekisteröintilaitteisto piirtää kairaajalle tarkastusdiagrammin, jotta kairaukseen liittyvästä, muistiin rekisteröitävästä tiedosta, saadaan alustava käsitys ja kairaaja pystyy seuraamaan laitteiston toimintaa.

Käytetyllä Geoprinter-rekisteröintilaitteella rekisteröinti tapahtuu aina syvyyden funktiona. Kaikki mitattavat suureet, kuten esimerkiksi puristusvoima ja vääntömomentti rekisteröidään menetelmässä valitun ohjelman määrittämin välein. Rekisteröintiväli vaihtelee 1-4 cm.

Yleensä rekisteröitäviä tietoja ovat:

- syvyys
- puristamiseen käytettävä voima
- puristusnopeus
- pyöritysnopeus
- vääntö
- huuhteluvedenpaine

Suomessa käytössä olevissa järjestelmissä mitataan myös huuhteluveden määrää. Laskemalla huuhteluveden määrän ja paineen välinen suhde saadaan poraparametreihin perustuvaa tulkintaa helpottumaan.

2.3.2. Syvyys ja nopeus

Syvyys rekisteröitiin pulssianturilla, jolla syötettiin yksi pulssi senttimetrille. Olisi ollut mahdollista käyttää myös 16 pulssia / 1 cm. Käytännön kokeissa todettiin virheen syvyysrekisteröinnissä karkeammalla mittaustavalla olevan prosentin luokkaa ja sen otaksuttiin olevan merkityksetön. Pulssianturille ongelmallisen tankojen pystysuuntaisen heilahdusliikkeen aiheuttamat virheet syvyyden mittauksessa on eliminoitu itse anturissa välyksen avulla.

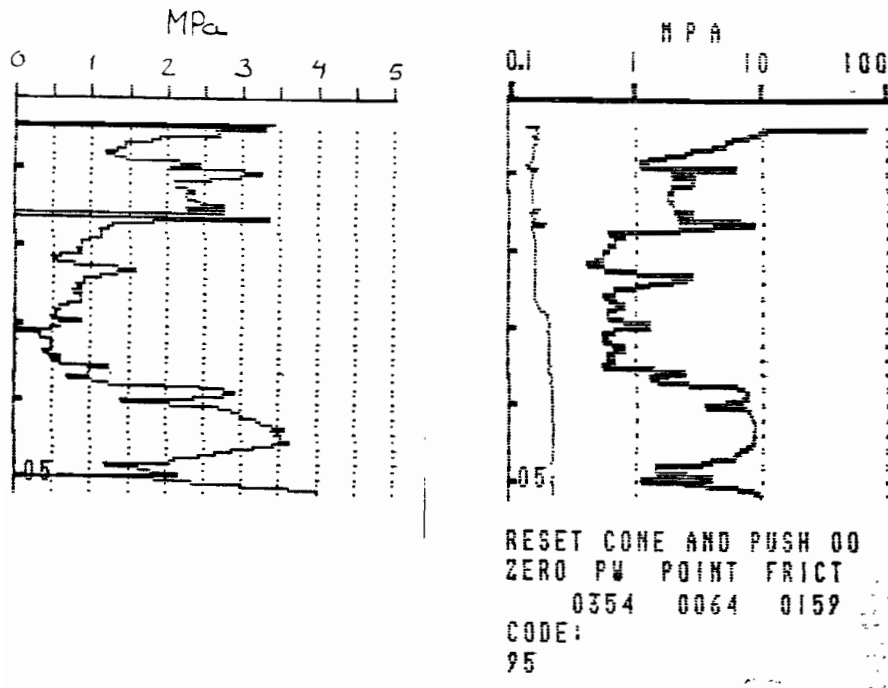
Rekisteröimällä syvyys ja aika voidaan laskea myös kairausnopeus, joka tehdään Geoprinterin sisäisellä logiikalla. Rekisteröity ja laskettu nopeus tulostetaan sekä kairauksen aikana että haluttaessa myöhemmissä tulosteissa.

2.3.2. Puristusvoima ja kärkivastus

Puristusvoima rekisteröitiin hydraulipaineiden erotukseksi syöttösyylinterin molemmin puolin. Paineet mitattiin antureilla, joiden tarkkuus oli 0.25 %. Antureilta tuleva signaali vahvistettiin ja voima kalibroitiin erillisellä vahvistimella. Erittäin tärkeää on huomioida syöttönopeuden muutoksista hydrauliliikassa aiheutuvat virtausten perusasiat. Mitattu paine-erohan muuttuu huomattavasti puristettaessa eri nopeuksilla, koska työpaineen ja paluupaineen välinen suhde ei pysy tällöin vakiona. Myös tämän seikan huomioiminen tapahtuu vahvistinta säätämällä. Syöttölaitteen kitkat eliminoitiin nolllaamalla puristusvoima tyhjällä kelkalla ajettaessa.

Puristusvoiman mittauksen herkkyyden todettiin CPT-kairauksen yhteydessä olevan riittävän, jottei informaatiota kerrosrajoista hydrauliliikasta johtuen menetetä. CPT-kairauksen suorituksen aikainen, hydrauliliikasta mitattu puristusvoima piirtyy rekisteröintilaitteen paperille, mutta sitä ei voida siirtää edelleen. Näin

ollen on verrattava Geoprinterin kokeen aikana piirtämää käyrää vastaavasti CPT-tulostukseen, joka saadaan kulloisenkin kairauksen jälkeen. CPT-kairauksen kärkivastus ja samanaikaisesti hydraulikasta mitattu puristusvoima on esitetty Kuvassa 18. Kuvasta on nähtävissä samat kerrokset, kerrosrajat ja laitteen toimintakuntoisuus, mutta niitä ei ole piirretty samaan mittakaavaan, jolloin niitä voisi suoraan verrata toisiinsa.



Kuva 18. Tallentimen paperille tulostuneet CPT-kairauksesta mitattu puristusvoima hydraulikasta (vasen) ja kärkivastus Memocone-kärjestä (oikea). Hydraulikasta mitattuun tulosteeseen on lisätty likimääräinen suora-viivainen asteikko. Memocone tuloste on tallentimen tulostamalla logaritmiasteikolla.

2.3.3. Vääntö ja vaippavastus

Koska vääntöä käytetään tulosten tulkinnessa lähinnä vaippakitkan määrittämisessä, katsottiin, että vääntö voidaan mitata vääntömoottorin painepuolelta. Mittaus tapahtuu vastaavanlaisella anturilla kuin puristusvoimankin mittaus. Selvää on, että tarkkuus on heikompi

kuin kahden anturin järjestelmässä, mutta varsin tyydyttäviä tuloksia saadaan näinkin. Vääntömomentissa tarkastellaan kuitenkin useimmiten suhteellisia muutoksia absoluuttisten arvojen sijaan. Lisäksi huomionarvoista on se, että verrattaessa puristin-heijarikairauksen ja puristin-porakonekairauksen vääntömomentteja tapahtuu jälkimmäisessä rekisteröinti viisinkertaisella taajuudella. Tulostus väännöstä on nähtävissä esimerkiksi kuvasta 20.

2.3.4. Huuhtelupaine

Sekä huuhteluveden että -ilmanpaine rekisteröidään samalla anturilla, joka poikkeaa muista antureista siten, että sen tarkkuus on 0.5 % ja mittausalue 400 bar:in sijasta vain 100 bar:ia. Tässä tutkimuksessa huuhtelupainetta mitattiin ainoana huuhteluparametrina. Näin ollen tuloksissa voidaan tarkastella suhteellisia paineen muutoksia ja päätellä siitä ko. kerroksen huokoisuutta ja hienoainespitoisuutta.

2.3.5. Rekisteröinnin käyttö

Geoprinterillä olisi ollut valmius ottaa vastaan piste-kohtaisia paalu, sivuetäisyys, koordinaattitietoja yms., mutta tässä työssä tätä mahdollisuutta ei käytetty.

Rekisteröinti on tehty mahdollisimman helppokäyttöiseksi. Kun poraus aloitettiin syötettiin kaksinumeroisen ohjelman käynnistyskoodi, jolla rekisteröintiohjelma käynnistyi. Tämän jälkeen Geoprinter jäi odottamaan kairauksen aloituskorkeutta, jonka syöttämisen jälkeen rekisteröinti voitiin aloittaa. Tämän jälkeen huolehdittiin vain siitä, että eteenpäin poratessa punainen varoitusvalo oli sammuneena. Halutulla syvyydellä rekisteröinti lopetettiin syöttämällä jälleen kaksinumeroisen lopetusohjelman koodi, jolloin Geoprinter ilmoitti kairauksen päättymissyvyyden ja kysyi päättymissyyn.

3. KOEKENTÄT

3.1. Koekenttien valinta

Koekentät valittiin siten, että kairaustuloksia saataisiin mahdollisimman monipuolisista olosuhteista. Molemmat koealueet sijaitsivat Varsinais-Suomessa. Toinen, kirjoituksessa viitataan myöhemmin Kupittaan koealue, alue oli merenpohjasavikkoa. Savikerroksen jälkeinen maakerros oli pohjamoreenia, jonka jälkeen päädyttiin kallioon. Toinen, kirjoituksessa viitataan myöhemmin Itäharjun koealue, alue oli harjumuodostuman päätealuetta. Maalaji oli kerroksellista hiekkaa kallion pinnan läheisyyteen asti. Yleisenä periaatteena kairauksissa oli eteneminen pehmeiden kerrosten läpi koviin kerroksiin, kallioon asti. Koska kehitetty kärki saattaisi rikkoutua tiiviisiin välikerroksiin, valittiin koekairauspisteet siten, että kairattaessa törmättäisiin myös tällaisiin kerroksiin. Hiekkakentillä törmättiinkin usein hyvin tiiviisiin välihiekkakerroksiin. Taloudellisuussyistä vertailevina kairauksina käytettiin alkavien työmaiden jo suoritettuja tavanomaisia pohjatutkimuksia.

Kairausohjelmia suunniteltaessa pyrittiin vertailtavat kairaukset sijoittamaan siten, että maan epähomogeenisuus vaikuttaisi tuloksiin mahdollisimman vähän. Tähän päästään vain toistamalla kokeita mahdollisimman lähellä toisiaan. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin aina otettava huomioon, että maaperä ei ole homogeenista. Tästä johtuen suoritettiin vähintään kaksi toisistaan riippumatonta kairausta jo olemassaolevan tukikairauksen läheisyyteen. Kairausten välisenä etäisyytenä suositellaan käytettäväksi $25 \times \phi$ tai vähintään 2 metriä jota suoritetuissa kairauksissa käytettiin.

Molempien koekenttien tutkimuspisteet ja -ohjelmat sekä tyypilliset leikkaukset on esitetty liitteissä 1,2,3,4. Leikkauksiin on lisätty vertailun vuoksi myös puristinporakonekairausdiagrammit ja niiden mukaiset kalliopinnot.

3.2. Koekenttien esittely

3.2.1. Kupittaaan koekenttä

Koekenttä sijaitsi Turun kaupungissa Kupittaaan kaupunginosassa. Kentällä oli suoritettu paino- ja heijarikairauksia sekä otettu näyte. Lisäksi alueella kaivettiin noin 5,5 metriä syvä koekuoppa. Suoritettujen tutkimusten perusteella alueen kerrokset olivat selkeät ja tasaiset. Alkuperäinen tutkimuskartta sekä alueelle tehdyt lisätutkimukset esitetään liitteessä 1. Tyypillinen leikkaus on esitetty liitteessä 2.

Alue oli teollisuuskäytössä ja kokonaisuudessaan asfalttoitu. Ylimpänä maakerroksena oli 1.5 - 4 metrin paksuinen rakennusjätteestä ajettu täyte, jonka jälkeisen savikerroksen paksuus vaihteli 5 - 7 m. Savi oli painokairausdiagrammien perusteella pehmeää ja useimmissa pisteissä kairaus oli edennyt 100 kg vapaapainumilla ilman puolikierroksia noin syvyydelle 5 metriä. Tämän jälkeen painokairauksessa oli siirrytty kiertämään tanakoja. Joissakin pisteissä eteneminen oli pysähtynyt jo tälle tasolle. Jos ohut kitkamaakerros oli onnistuttu läpäisemään, löytyi ko. kerroksen alta toinen löyhä maakerros, todennäköisesti savikerros. Tämän kerroksen paksuus ja olemassaolo vaihtelivat pisteestä toiselle. Tutkimusalueen länsiosissa löyhän kerroksen paksuus oli noin 1 metri, jonka jälkeen saavuttiin moreenin pintaan. Alueen itäosissa välikerros puuttui ja painokairaus oli päättynyt moreenin pintaan. Siltti- ja hiekkamoreenin paksuus vaihteli 5 - 7 metriin, jonka jälkeen oli saavutettu kallion pinta mahdollisten moreenissa olleiden lohcareiden läpiporaamisen jälkeen.

3.2.2. Itäharjun koekenttä

Koealue on Turun yliopistollisen keskussairaalan tulevalle laajennukselle varattu tontti Turussa, Itäharjun kaupunginosassa. Tutkimuspisteet sijaitsivat harjumuodostuman alueella, joten maaperä koealueella oli tiiviydeltään vaihtelevaa hiekkaa. Tutkimuskartta on esitetty liitteessä 3 ja tyypillinen leikkaus liitteessä 4.

Koealueella oli tukikairauksina suoritettu paino- ja porakonekairauksia. Painokairaukset oli suoritettu tavalliseen tapaan lukuunottamatta lopputärytystä, joka oli tehty lyömällä tavallisella heijarikairapuntilla painokairakärkeä. Näin voitiin arvioida esimerkiksi paalujen tunkeutumisvyvyttä. Lisäksi koealueella kairattiin työhön liittyen ylimääräisiä CPT-kairauksia elektronisella Memocone-merkkisellä CPT-kairakärjellä. Kaksikanavaiset CPT-kairaukset, joissa mitattiin kärki- ja vaippavastukset, tehtiin viidessä pisteessä, kaksi kussakin virheitten ja maan epähomogeenisuuden huomioonottamiseksi. Näytteitä alueelta oli otettu kolmesta pisteestä, jonka lisäksi oli kaivettu seitsemän koekuoppaa.

Tutkittavaksi alueeksi valittiin koko neljän hehtaarin tontista vain kehitystyöhön parhaiten soveltuva tontin eteläinen osa.

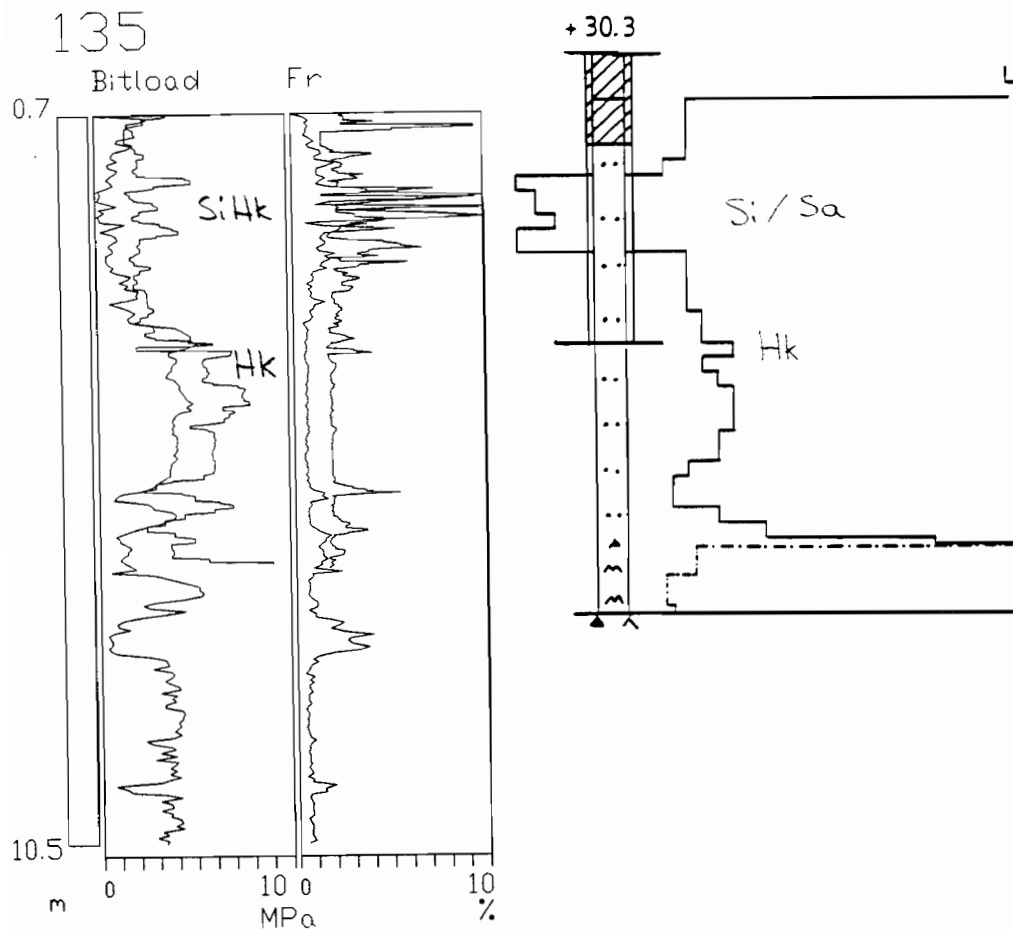
Tontti oli aikaisemmin ollut teollisuuskäytössä, joten pintamateriaalina oli yleisimmin n.0,5 metrin paksuinen täyttö. Täytön paksuus vaihteli siten, että paksuimmillaan se oli metrin luokkaa ja se koostui lähinnä rakennusjätteistä, kuten tiilistä. Seuraavana kerroksena oli hiekkakerros, jonka tiiviys vaihteli löyhästä tiiviiseen epäsäännöllisesti. Kerroksen paksuus vaihteli koealueen luoteislaidan noin 10 metristä kaakkoispään noin 4 metriin. Kallion pinta oli vastaavasti syvimmillään noin 13 metrin syvyydessä ja matalimmillaan vain viiden metrin syvyydellä. Pohjaveden pinta oli maanpinnasta keskimäärin tasolla -3 metriä.

4. PURISTUSVAIHE

4.1. Puristusvoima ja kärkivastus

Puristusvaiheen aikana hydraulipaineesta mitattu puristusvoima oli erottelukyvyltään hyvä. Verrattaessa puristusvaiheen rekisteröityä puristusvoimaa Itäharjun koalueella suoritettuihin CPT-kairauksiin on yhteneväisyys havaittavissa. Esimerkiksi CPT-kairauksen nro. 85 kärkivastuksesta on havaittavissa samat kerrosrajat ja samat kerrospaksuudet kuin puristin-porakonekairauksenakin tehdystä pisteestä (kuva 19). Maalajimääritykset on tehty Douglasin ja Olsenin /3/ kehittämän maalajimääritystaulukon mukaisesti, josta ns. "työskentelytaulukon" ovat kehittäneet Robertson ja Campanella /11/. Kyseiset taulukot on esitetty kappaleessa 4.3.. Maalajit on arvioitu läheisten koekuoppien ja kairausvastuksen perusteella.

Molemmilla puristinkairauksilla on havaittu täytön läpäisyn jälkeen noin 3 m paksuinen löyhempi kerros, joka muodostuu ohuista savi- tai siltti- ja hiekkakerroksista. Painokairadiagrammin perusteella tämän kerroksen paksuus on vain noin 1 metri. CPT-kairalla on havaittu tiiviimmät 20 cm luokkaa olevat välikerrokset, joita ei porakonekairauksen puristinvaiheen aikana ole havaittu. Kerrosinformaation menettäminen johtunee Melanderinkin /12/ esittämästä suuremman puristusnopeuden vaikutuksesta erottelukykyyneen.



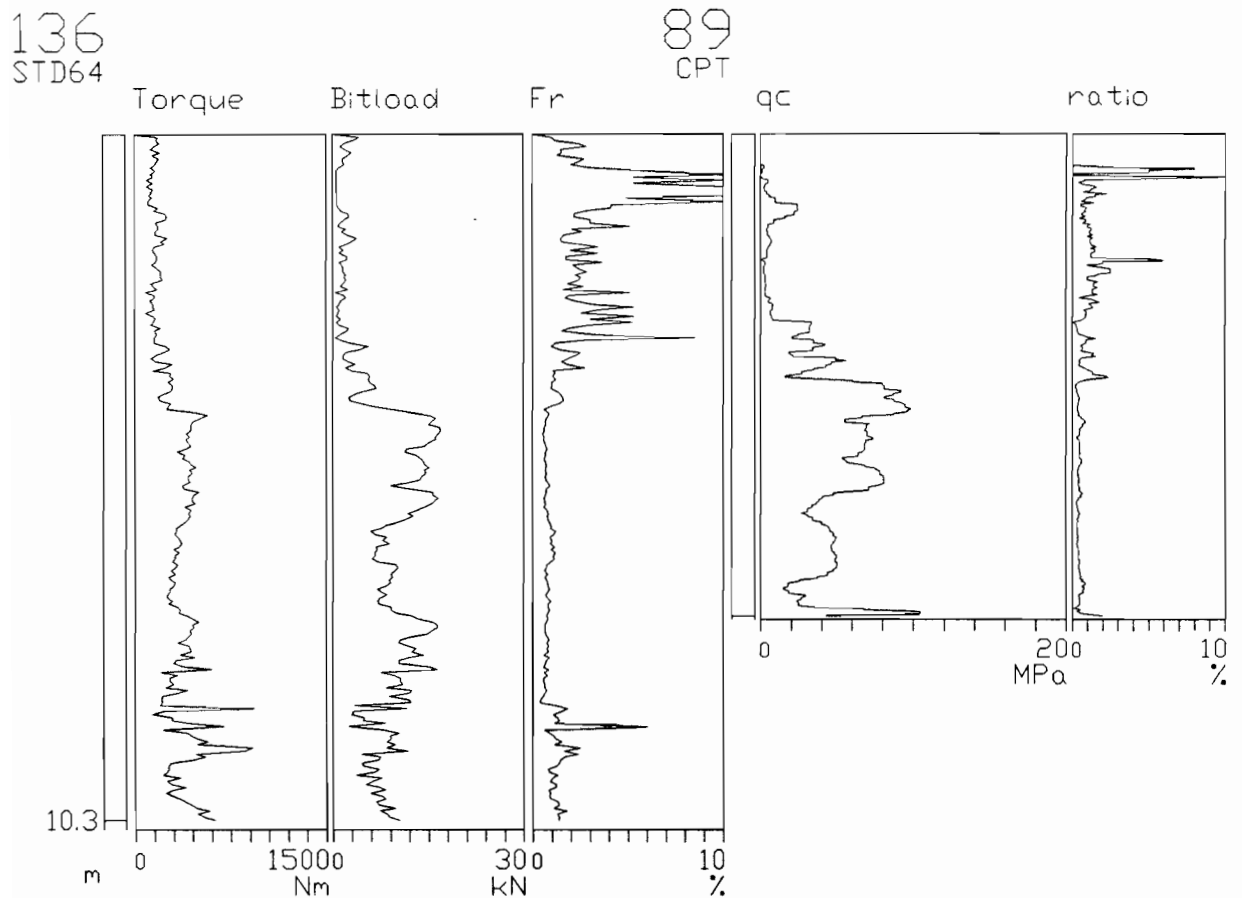
Kuva 19. Puristusvoiman ja kärkivastuksen vertailut. Sekä puristusvoiman että kitkasuhteen oikeanpuoleiset käyrät ovat CPT:llä mitattuja, in situ. CPT:llä mitattu kitkasuhde on kuvan luettavuuden vuoksi kerrottu kahdella.

Löyhemmän kerroksen jälkeen on saavuttu tiiviimpään hiekkakerrokseen, jonka paksuus havaittiin kaikilla kairauksilla runsaaksi kahdeksi metriksi. Myös hiekkakerroksen tiiviyyden vaihtelut on diagrammeissa. Hiekkakerrosten läpi kairattaessa on porakonekairauksen puristusvoimasta havaittavissa selvästi varsinaisen tiiviin hiekkakerroksen jälkeiset 30-60 cm paksuiset löyhemmät kerrokset, joita ei ole kyetty havaitsemaan CPT-kairauk-

sella eikä painokairauksella. Lyömällä tankoja painokairauksen jälkeen heijarikairan tapaan on kuitenkin onnistuttu havaitsemaan myös tämä kerros.

CPT-kairaus on päättynyt noin 8 metrin syvyydelle. Porakonekairauksessa on siirrytty iskevään poraukseen, jolloin suojakappale on rikottu noin 8.5 metrin syvyydessä. Painokairalla on pystytty tunkeutumaan samalla syvyydelle heijarin puntilla lyötyäessä.

Myös CPT-kairauksen nro. 89 ja porakonekairauksen nro. 136 vertailu vahvistaa esitettyjä tulkintoja (kuva 20). Kahden metrin syvyydellä ollut, ohut tiiviimpi kerros on porakoneella kairattaessa jäänyt rekisteröitymättä. Puristusnopeus on tällöin pehmeässä kerroksessa ollut suunnilleen tavoiteltu 3 m/min. Tiiviimmissä kerroksissa tiiviyyden vaihtelut ovat hyvin havaittavissa. Tämä johtuu siitä, että saavuttaessa tiiviiseen kerrokseen laskee porakonekairauksessa, kuten myös CPT-kairauksessa käytetyllä laitteistolla puristusnopeus selvästi. Kairattaessa lähdettiinkin siitä, että läpäistään kaikki kerrokset, jotka ovat läpäistävissä, puristamalla. Tällöin jouduttiin väljentämään puristusnopeudelle asetettuja toleransseja ja sallimaan suuriakin puristusnopeudessa tapahtuvia muutoksia hitaampaan päin, mutta vastapainoksi saatiin tietyissä tapauksissa lisäinformaatiota. Poraparametrissa B, joka havainnollistaa tiiviysvaihteluita hyvin, on tulostus esimerkiksi kuvassa 22.



Kuva 20. Kerrosrakenteen ja kärkivastusten vertailu kairauksissa 136 ja 89.

Halkaisijaltaan suurempia kärkiä käytetään joskus pehmeitten maakerrosten ominaisuuksia määriteltäessä /11/. Suuremman kärjen vaikutusta tuloksiin ovat tutkineet mm. Durgunoglu ja Mitchell /5/. Heidän mukaansa suuremmalla kärjellä kairattaessa kärkivastus suurenee huomattavasti.

Le Beer /11/ on havainnut kärkivastusten käyttäytyvän samansuuntaisesti kuin tässä työssä havaittiin. Hänen mukaansa tiiviissä savissa, käytettäessä $\phi 50$ mm kärkeä,

on kärkivastus q_c 14% pienempi kuin käytettäessä $\phi 36$ mm kärkeä.

De Ruiter /11/ suoritti kokeita 500, 1000, 1500 mm²:n kärjillä. Hänen mukaansa kärki- ja vaippavastukset eivät merkittävästi poikenneet toisistaan.

Durgunoglun ja Mitchellin kehittämä laskennallinen riippuvuus, joka vaihtelee mm. kitkakulman ja kärkikertoimen mukaan on esitetty kaavassa (12)

$$q_f = cN_c\xi_c + \rho gBN_{\gamma q}\xi_{\gamma q} \quad (12)$$

missä c on koheesio
 $N_{\gamma q}$ ja N_c ovat kantavuuskertoimia
 $\xi_{\gamma q}$ ja ξ_c ovat muotokertoimia
 B on kärjen halkaisija

Esitetyn kaavan mukaisen laskennallisen riippuvuuden selvittäminen on erittäin hankalaa CPT-kärjen ja tässä työssä käytetyn $\phi 63$ mm kärjen välille ja se vaatisi erillisen ATK-ohjelman tekemistä. Tämän lisäksi perusteltu vertailu vaatii myös kitkakulmien tuntemista. Näistä seikoista johtuen tässä työssä esitetään Durgunoglun ja Mitchellin teorioista /5/ johdettuja Tirkkosen /20/ työn tuloksia.

Tirkkosen työssä vertailtiin heijarikairakärjen ja CPT-kärjen välistä korrelaatiota. Kärkien halkaisijat ovat $\phi 45$ mm ja $\phi 36$ mm ja pinta-alat vastaavasti 15 cm² ja 10 cm².

Tuloksena Tirkkonen esittää kärkivastusten suhteen olevan 1.44. Toisin sanoen Tirkkonen on saanut, päinvastoin kuin tässä työssä, suurempia kärkivastusten arvoja suuremmalla kärjellä puristettaessa. Tämä onkin mm. kaavan 12 perusteella loogista. Toisaalta eo. työssä ei vertailtu suoraan puristusta kahden eri kärjen välillä vaan päätelmät tehtiin iskuaaltoteoriaan perustuen.

Tässä työssä, näissä olosuhteissa on empiirisesti havaittu kappaleessa 4.5.3. esitetyn mukaan korrelaatioksi kaksi (kuva 31). Siis puristin-porakonekairausten kärkivastukset, jolloin käytettävän kärjen pinta-ala on n. 30 cm^2 , tulisi kertoa kahdella, jotta päästään suoraan CPT-kairausten kanssa, ($A=10 \text{ cm}^2$), vertailukelpoisiin arvoihin. Tulos on päinvastainen kuin mihin mm. kanta-vuuskaavojen perusteella päädyttäisiin. Tulosta kuitenkin tukevat mm. de Beerin tulokset sekä pilarikairalla saadut suuntaa antavat vastukset. Lisäksi tarkasteltaessa puristusvoimaa eikä kärkivastusta on tulos oikeasuuntainen. Puristusvoima on suuremmalla kärjellä suurempi. Tulosten poikkeavuutta CPT-kairauksiin verrattuna on pohdittu kappaleessa 4.5.3..

Pilarikairaa käytettäessä, pinta-alalla 100 cm^2 (Helsingin kaupunki, Geo), tulokset tukevat tässä työssä esitettyä. Pienellä havaintomäärällä havaittu riippuvuus on savessa yleensä keskimäärin kolme. CPT-kairauksilla saadut kärkivastusten arvot olivat siis noin kolminkertaiset verrattuna pilarikairalla saatuihin kärkivastusten arvoihin. Osaksi pilarikairatuloksiin vaikuttaa todennäköisesti kärjen erilainen muoto, mutta tulosten suhde on kuitenkin samansuuntainen kuin tässä työssä tutkitulla kärjellä ja CPT-kairakärjellä mitattujen tulosten suhde.

4.2. Vääntomomentti ja vaippavastus

Vääntö kohdistui niin puristus- kuin porausvaiheenkin aikana lähinnä kärkikappaleeseen ja kruunuun. Käytetty tankohan oli kuusikulmainen $1\frac{1}{4}'$ poratanko ja kruunun halkaisija oli suurimmassa osassa kairauksista $\phi 57 \text{ mm}$. Tästä johtuen varsinainen tankoihin kohdistuva vaippakitka oli pieni. Esitettyä tukee se, ettei kairauksen edetessä ollut havaittavissa lineaarisesti lisääntyvää vaippavastusta. Jos vaippakitkaa olisi oleellisesti kohdistunut tankoihin, olisi se kasvattanut vääntomomenttia syvyyden funktiona. Tankojen ja kärjen hal-

kaisijoiden erotuksella on merkittävä vaikutus ja niiden ero oli puristettaessa, kärkeisuojusta käytettäessä vieläkin suurempi. Tällöin ϕ 57 mm kruunun päällä käytetyn suojuksen halkaisija oli ϕ 63 mm.

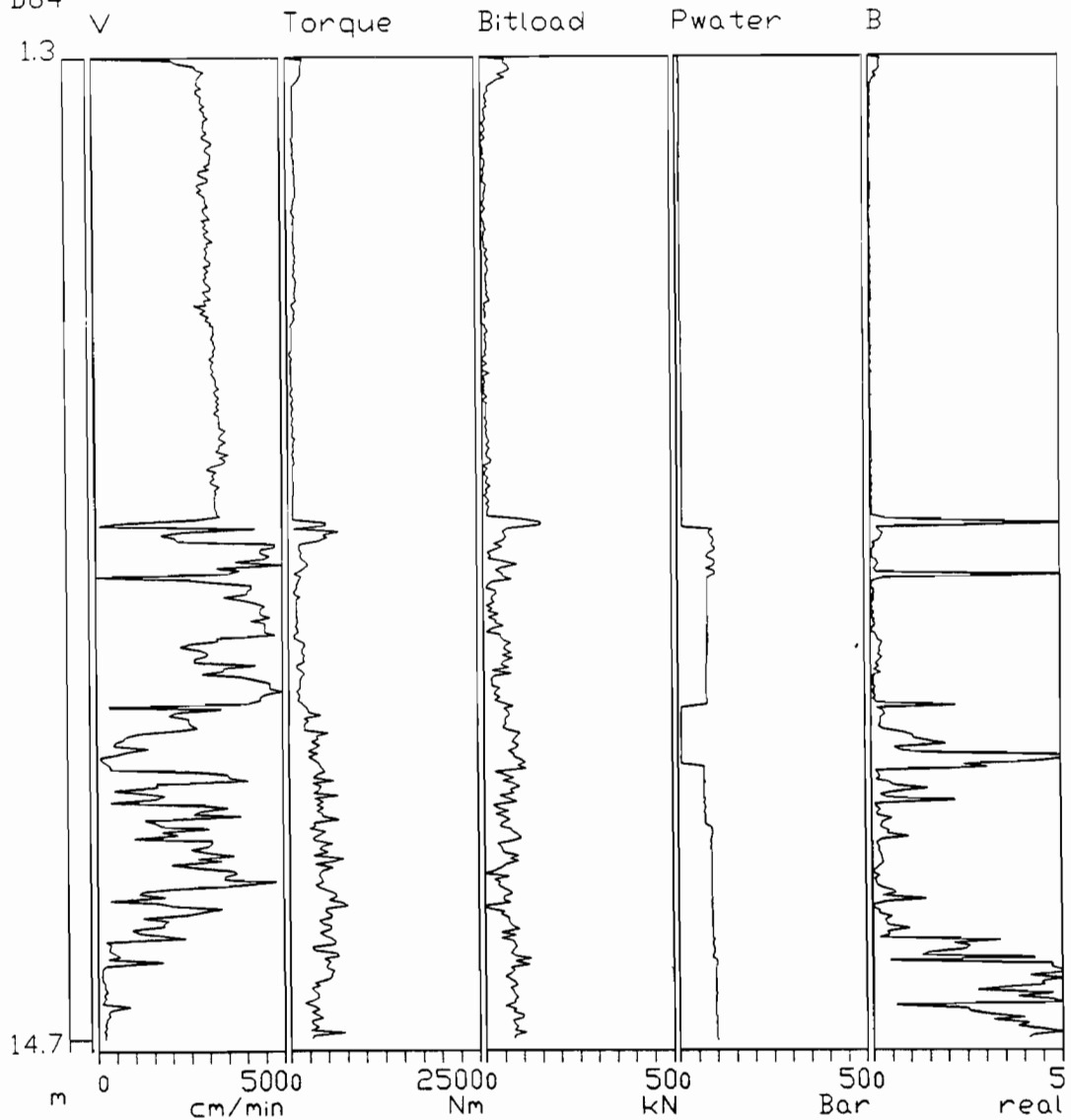
Kaikissa diagrammeissa on havaittavissa vääntömomentin muuttuminen käytännössä samalla syvyydellä kuin puristusvoimakin on muuttunut. Muutos ei ole ollut yhtä selvä, mutta kuitenkin selkeästi samasta kerroksesta johtuva.

Pelkästään vääntömomentista ei kuitenkaan voida nähdä kerrosrakennetta yhtä selkeästi kuin se on puristusvoimasta nähtävissä. Tarkasteltaessa väännön ja puristusvoiman keskinäistä riippuvuutta esimerkiksi pisteessä no. 56, Itäharjun koekentällä, (kuva 21) huomataan, että pelkkä vääntö ei anna lisäinformaatiota puristusvaiheen aikana. Kairareian alun kerrokset ovat havaittavissa sekä puristusvoima- että vääntömomenttidiagrammeissa samanaikaisina, muuttuvina vastuksina.

Tässä työssä vääntömomentin oletettiin kohdistuvan pääosin kärkikappaleeseen. Tätä oletusta tuki vääntömomentin korrelointi puristusvoiman kanssa ja toisaalta se, ettei missään suoritetussa kairauksessa havaittu väännön kasvua syvyyden funktiona. Jos vaippakitkaa olisi kohdistunut merkittävästi tankoihin, olisi kitkan kohoaminen ollut nähtävissä vääntödiagrammissa suhteellisen lineaarisena kasvuna maanpinnalta lähtien. Myös käytetty kuu-sikulmainen poratanko pienentää tankoihin kohdistuvaa vaippakitkaa. Tällöin voidaan olettaa, että koko vääntömomentti kohdistui kärkeisuojukseen puristusvaiheen aikana ja kruunuun porauksen aikana.

56

STD64



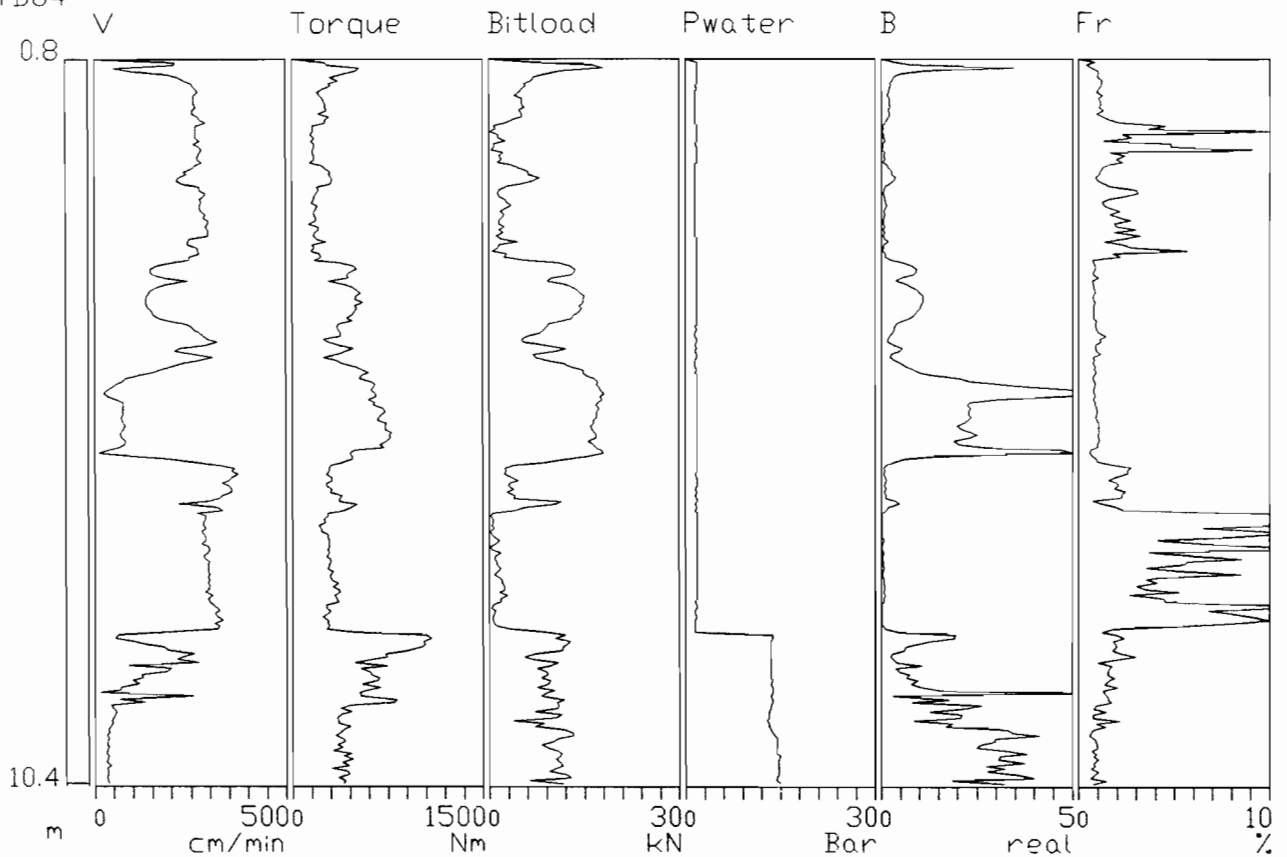
Kuva 21. Kupittaan piste nro. 56. Iskua on alettu käyttää samalla tasolla kuin huuhtelukin on aloitettu.

Väännön antamaa informaatiota on mahdollista helposti tarkkailla uusien laskennallisten diagrammien avulla. Oletetaan rekisteröity vääntö kokonaisuudessaan vaippa-kitkaksi. Kaavasta (13)

$$F_s = M_v / r \quad (13)$$

missä F_s on vääntävä voima
 M_v on vääntömomentti
 r on suojakappaleen säde

saadaan vaippakitkan arvo jakamalla saatu voima kärjen pinta-alalla. Pinta-alan kohdalla päädyttiin käyttämään koko kärjen pinta-alaan, koska merkittävä osuus kitkasta muodostuu juuri kartio-osuudella. Sijoitetaan kaava GeoAuto-laskentaohjelmaan ja käytetään laskettua vaippakitkan arvoa tulosten tulkinnessa samaan tapaan, kuin CPT-kairauksissa käytetään vaippa- ja kärkivastuksen suhdetta. Kuvassa (kuva 22) on esitetty puristusvoima ja laskennalliset parametrit B ja f_r kairauksesta 139. Kitkasuhde on laskettu kaavan 4 mukaisesti. Diagrammeista voidaan todeta, että laskennallisten parametrien B ja f_r vertailu suoraan toisiinsa ei ole mahdollista. Parametrin B voidaan suoraan saada tiiviyttä kuvaava arvio, mutta kitkasuhteen avuksi tarvitaan kärkivastus. Parametrin B , joka on voiman ja nopeuden suhde, käyttökelpoisuus perustuu kuitenkin siihen, että nopeuden sallitaan laskevan puristusvoiman ollessa säädetyn maksimiarvon lähetyvillä. Jos puristusnopeus halutaan ja kyetään vakioimaan täysin, kunnes maksimipuristusvoima on saavutettu, on parametrin B käyttö hyödytöntä ainakin puristusvaiheen aikana. Vakionopeudella puristettaessa B kuvastaa vain puristusvoimaa vakiolla jaettuna. Kitkasuhdetta käytetään yhdessä kärkivastuksen kanssa mm. maalajitulkintaan.

139
STD64

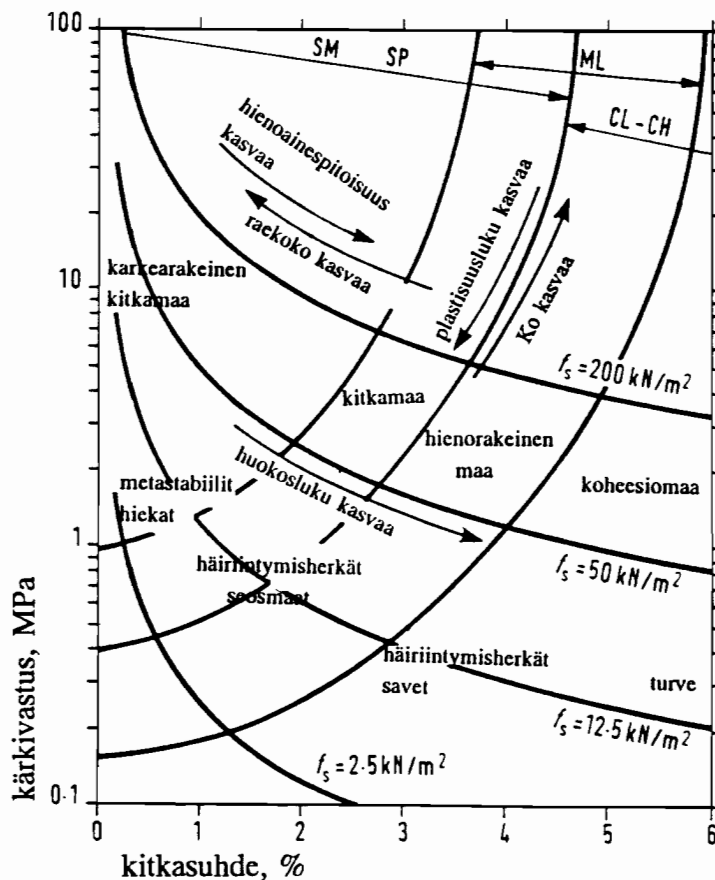
Kuva 22. Parametrin B avulla havainnollistetut tiiviin kerroksen tiiviysvaihtelut syvyydellä noin 5 - 6 m. Puristus on lopetettu syvyydelle 6 metriä.

4.3. Maalajit

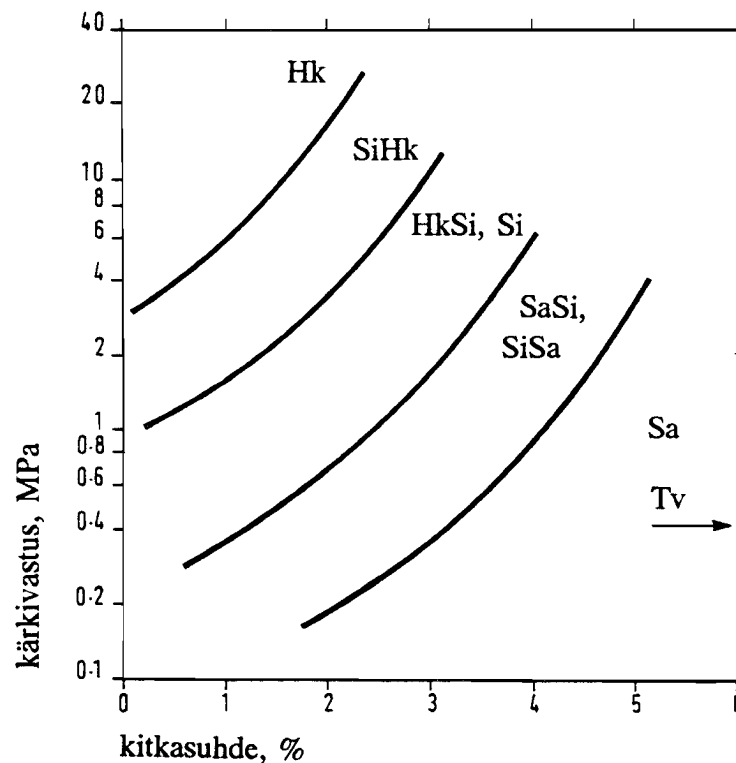
Molemmilla koekentillä oli otettu näytteitä ja kaivettu koekuoppia. Tässä suhteessa pohjasuhdetiedot Itäharjun kohteesta ovat huomattavasti paremmat. Koekuoppia oli kaivettu seitsemän ja näytteitä alueelta oli kolme. Toisaalta maaperäkin oli vaihtelevampaa kuin Kupittaaalla. Kupittaan alueelta näytteitä oli vain yksi kuten koekuoppiakin, mutta maaperä oli pohjasuhteiltaan suhteellisen tasaista.

Maalajien määrittäminen kehittäväällä menetelmällä on ainoastaan likimääräistä eikä sillä päästä vastaavaan tarkkuuteen kuin esimerkiksi CPT-kairauksilla. Selvittämällä paikallisesti, nopealla menetelmällä kerrosrakenne kalliopintaan asti, voidaan kuitenkin kartoittaa paikat, joissa tehdään lisätutkimusta kairaamalla lisäkairauksia tarkemmilla menetelmillä tai ottamalla näytteitä.

Maalajit on pyritty tulkitsemaan CPT-kairauksen periaatteita noudattaen. Määrittäminen on jouduttu jakamaan kahteen osaan, koska puristusvaiheen jälkeinen tulkinta perustuu poraparametreihin. Tässä kappaleessa tarkastellaan puristusvaiheen aikaista tulkintaa. Douglas ja Olsen /3/ esittivät maalajeille kuvan 23 mukaista tulkintaa. Puristin-porakonekairauksen maalajitulkintaa kokeiltiin sekä Robertsonin ja Campanellan /11/ edelleenkehittämän taulukon perusteella että Melanderin työssään /12/ käyttämän Searlen /17/ diagrammin mukaisesti.



Kuva 23. Douglasin ja Olsenin /3/ esittämä maalajitulkinta.



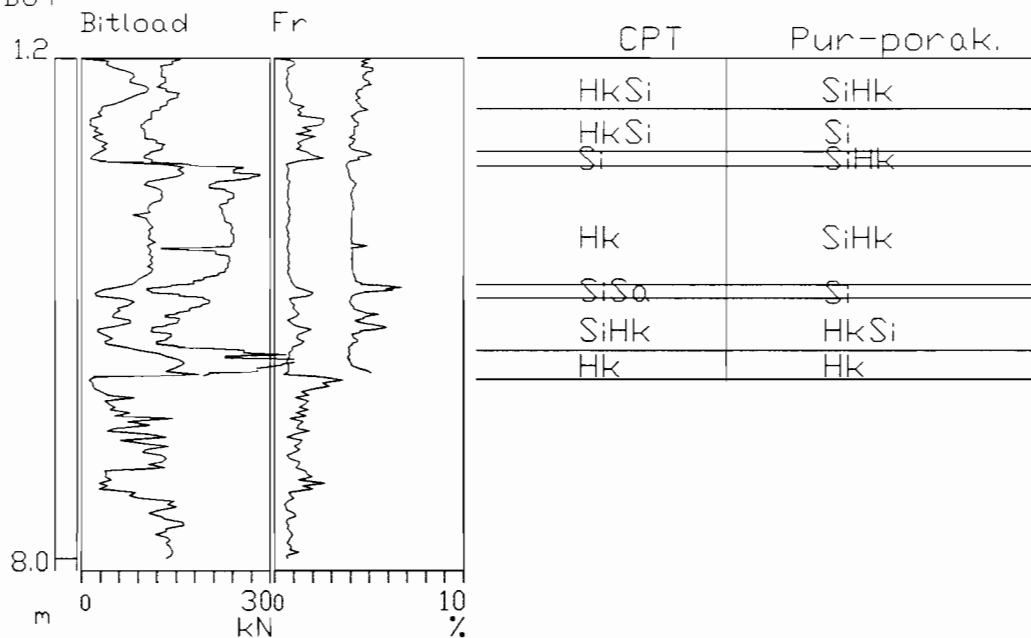
Kuva 24. Robertsonin ja Campanellan /11/ edelleenkehittämä maalajitulkinta Douglasin ja Olsenin esittämästä tulkinnasta.

Kitkamaissa, kuten Itäharjun hiekoissa, Robertsonin ja Campanellan /11/ diagrammin mukaisen tulkinnan perusteella maalajit määrittyivät koealueella kitkamaiksi. Kyseessä oli kerroksellinen hiekka, jonka rakeisuuskäyrä oli hyvin jyrkkä, joten otetut näytteet olivat keskihiekkaa. Määrityksiä tuloksina saaduissa maalajeissa on samoista maalajimäärittämisestä huolimatta hajontaa, koska vääntömomenttiolettamuksesta saatu vaippavastus ei ollut tämän aineiston perusteella luotettavasti verrannollinen CPT-tuloksista saatuihin kitkasuhteisiin. Tiiviissä hiekkakerroksissa oli havaittavissa CPT-tuloksiin verrattuna suurempia arvoja. CPT-tulokset antavat suhteeksi noin 0.5 %, kun kärkisuojuksella päästiin kaksinkertaisiin arvoihin eli noin 1 % arvoon. Hyvä

esimerkki kitkasuhteiden tulostuksista näiden kahden eri menetelmän välillä näkyy kuvasta 25. Kuvaan on lisätty Robertsonin ja Campanellan mukainen maalajimäärittäminen molemmilla menetelmillä.

130
STD64

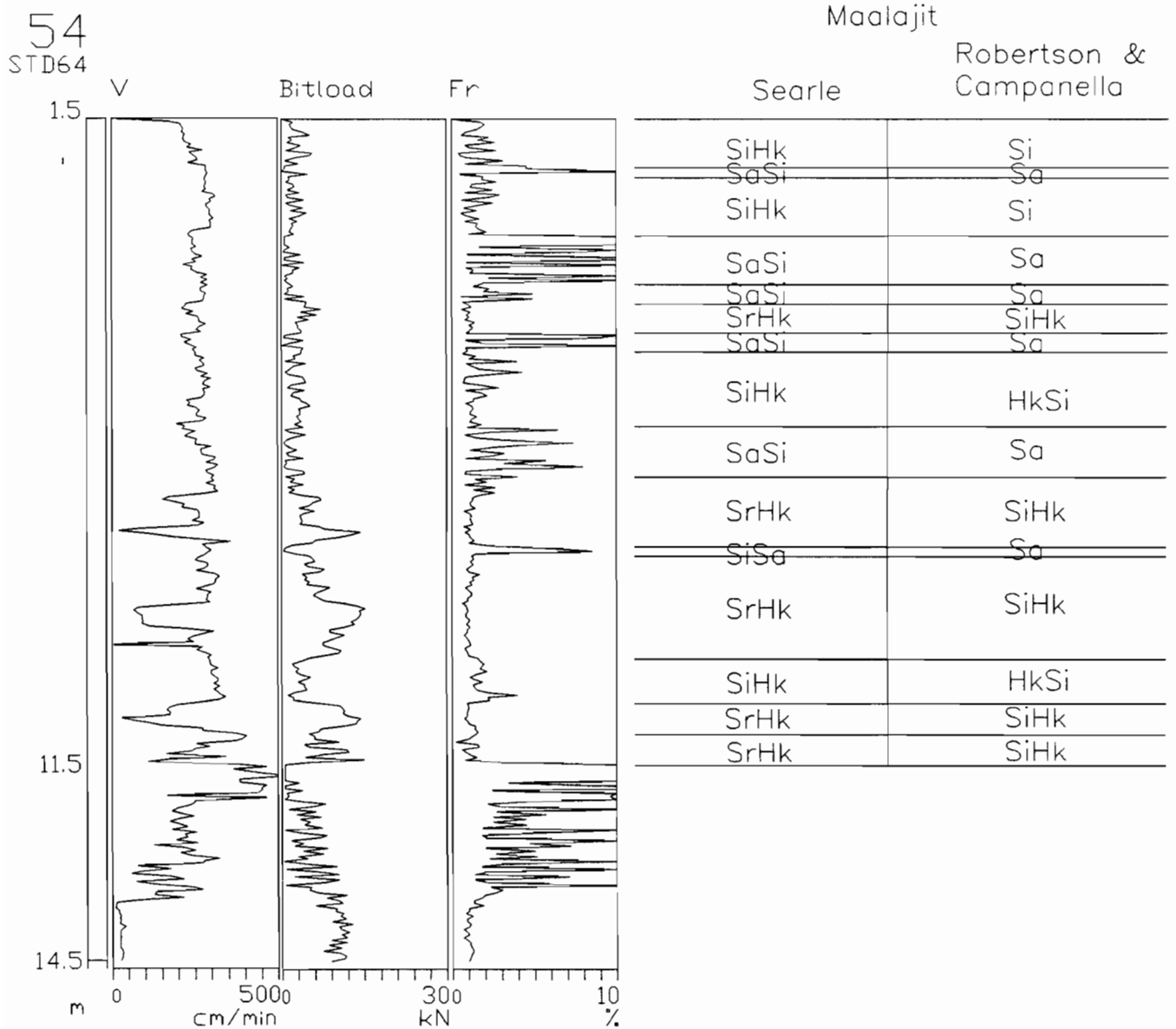
Maalajit (Robertson & Campanella)



Kuva 25. Itäharjulla suoritettujen puristin-porakone- ja CPT-kairauksien kärkivastukset ja kitkasuhteet. Tulokset eivät ole luettavuuden takia samassa mittakaavassa. Kappaleessa 4.5.3. on tarkasteltu tulosten keskinäisiä riippuvuuksia.

Savessa, Kupittaaan alueella, ei paksusta täytöstä johtuen tehty CPT-kairauksia, jolloin IN SITU- vertailuja ei tehty. Kuitenkin koekuopasta tehtiin havainnot, joiden mukaan täytönjälkeiset kerrokset noin -5.5 m maapinnasta olivat savea. Näissä pisteissä Robertsonin ja Campanellan diagrammisto antaa maalajiksi silttisestä hiekasta saveen. Maalajimäärittäykset pisteelle 54 on tehty molemmilla määrittäytavoilla. Maalajiksi saatiin (kuva 26) etenkin Searlen taulukon perusteella muutamia erittäin ohuita kerroksia lukuunottamatta raekoostumuk-

seltaan vaihteleva hiekka. Välillä saatiin tulokseksi siltti- ja savikerroksiakin, mutta useimmiten kuitenkin hiekka. Reiässä 54 hiekkakerroksen yläpuolinen maaperä oli koekuopan perusteella savea.



Kuva 26. Kupittalla suoritettu puristin-porakonekairaus. Koekuopasta havaittu puristuksenaikainen maalaji oli savi.

Searlen /12/ esittämän tulkinnan huonona puolena on taulukon rajoittuneisuus. Hyvin pienillä kuormilla ainoa

määritys, jonka taulukoista saa, on "erittäin häiriintyvä maalaji". Toisaalta Searlen taulukon perusteella voidaan arvioida myös kerroksen suhteellista tiiviyyttä.

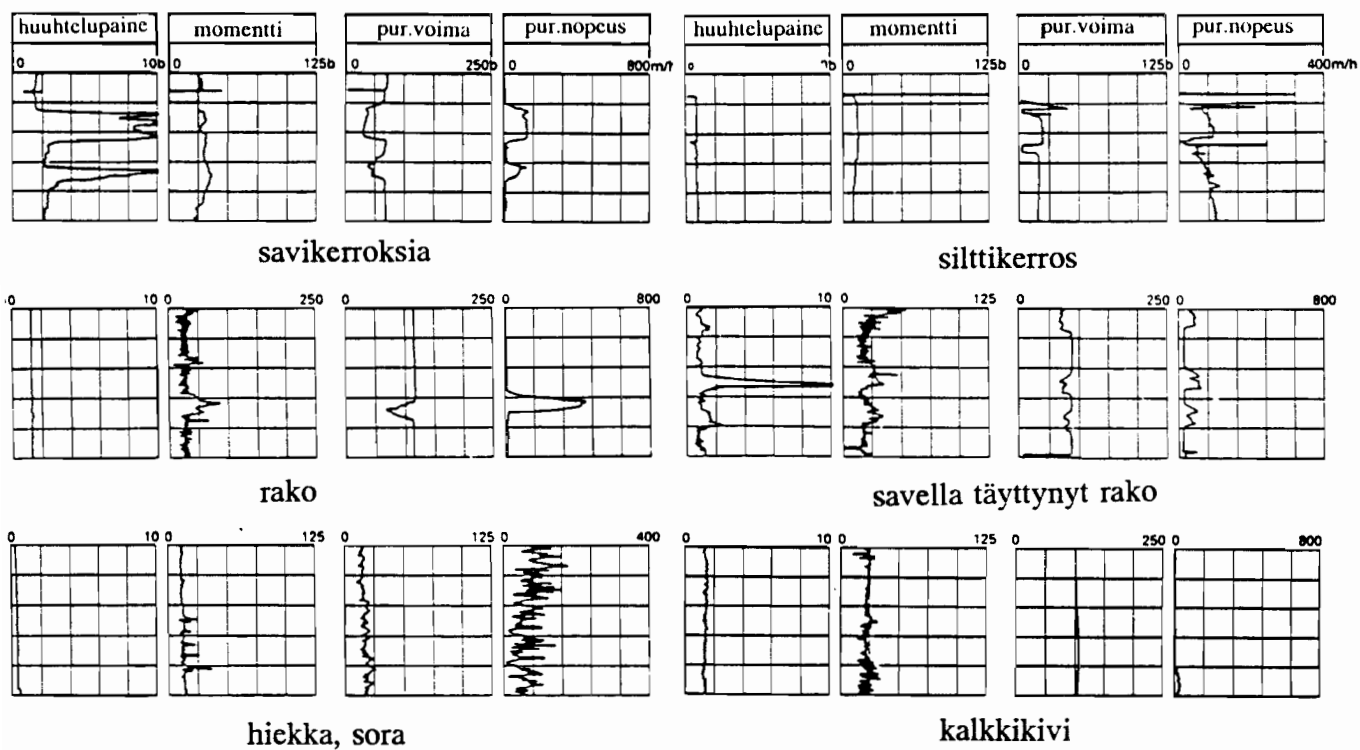
Yleisesti pienimpien kerrosten havaitsematta jääminen on nähtävissä, kuten aikaisemminkin on todettu, mutta kokonaisuudessaan maalajitulkinthojen tulosta voidaan pitää tyydyttävänä. Maalajitulkinthoa voidaan varauksin käyttää kitkamaaperissä, mutta vain poikkeustapauksissa savi-koilla, ainakin tässä työssä kairatun ja analysoidun aineiston pohjalta. Toisaalta edelleen on huomattava, että maalajimääritys on vain suuntaa-antava ja tarkemmat määritykset suoritetaan näytteistä.

Diagrammeihin perustuvan, laskennallisen maalajimäärityksen lisäksi maalajeja on mahdollista arvioida visuaalisesti. Tätäkään tulkintatapaa ei pidä väheksyä. Ranskalaisten esittämät tyypilliset /15/ monikanavaporauksissa käytettävät mallikäyrät on esitetty kuvassa 27. Ko. kuvassa on esitetty myös huuhtelupaine. Huuhteluaineena on käytetty lietettä, mutta sen käyttäytyminen on luonteeltaan samanlaista kuin muidenkin huuhteluainoiden. Kyseisellä työmaalla sitä on todennäköisesti käytetty porausreiän stabiliteetin takia.

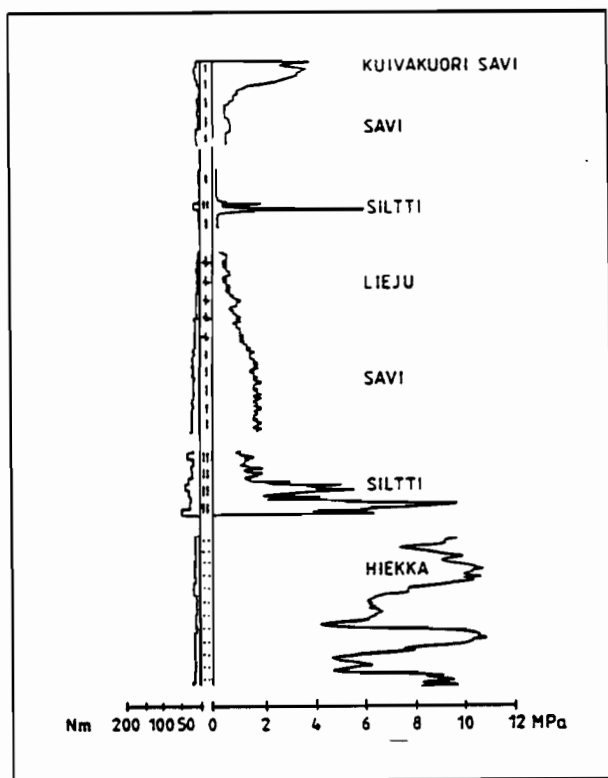
Melander on esittänyt työssään /12/ vastaavanlaiset mallikäyrät puristusosuudelle puristin-heijarikairauksessa. Esitetyt käyrät ovat CPT-kairauksessa käytettävien kaltaisia (kuva 28).

4.4. Muut parametrit

Maakerrosten ja -kerrosrajojen lisäksi suunnittelija tarvitsee mitoitusparametrit kuten leikkauslujuuden ja kitkakulman. Niiden lisäksi tarvitaan painumalaskentaan parametreja, joita ei tässä kuitenkaan käsitellä menetelmän likimääräisyydestä ja aineiston suppeudesta johtuen.



Kuva 27. Visuaalisen tulkinnan mallikäyrät /15/.



Kuva 28. Puristin-heijarikairauksessa käytettävät maala-
jimmallikäyrät /12/.

4.4.1. Leikkauslujuus

Leikkauslujuus lasketaan jo aiemmin esitetyn kaavan (14) mukaisesti.

$$c_u = \frac{(q_c - \sigma_{v0})}{N_k} \quad (14)$$

missä

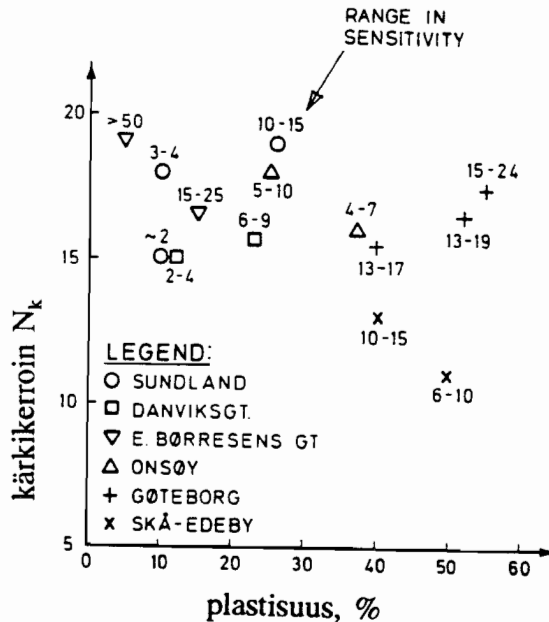
q_c on kärkivastus

s_u on suljettu leikkauslujuus

N_k on kärkekerroin

Tässä työssä tehtyjen tutkimusten perusteella ei yritetä määrittää leikkauslujuutta, koska koekentillä ei oltu tehty siipikairauksia, joilla olisi voitu määrittää todelliset leikkauslujuudet. Tästä johtuen ei käytettävissä ollut myöskään mitään arviota parametrille N_k . Jos käytettäisiin norjalaistutkimuksen /9/ esittämää arviota $N_k = 17$, saataisiin Kupittaan koealueen saviille suuruusluokaltaan leikkauslujuuksia 30-40 kPa, jotka ovat ylisuuria ko. saviille.

Norjassa tehdyn tutkimuksen mukaan /9/ CPT-kairauksilla määritetty kärkekerroin N_k vaihtelee johtuen mm. maan kokoonpuristuvuudesta, konsolidaatioasteesta ja häiriintymisherkkyydestä. N_k :n vaihteluväli on ko. tutkimuksen mukaan 5 - 70. Suoritettujen empiiristen tarkastelujen jälkeen todettiin kärkivastuksen vaihtelevan laihalla savella 11-17, lihavalla savella 17-18 ja silttisellä savella 18-21. Eri kohteissa tehtyjen tutkimusten tulokset on esitetty koottuna kuvassa 29. Kuvassa on esitetty plastisuusluvun mukaan korjatut arvot /9/. Koealueet olivat eri tyyppisiä savikkoja ja huolimatta korjauksista, on niissä havaittavissa suuri kärkekertoimien hajonta. Artikkelit suosittaa kärkekertoimen arvona käytettäväksi $N_k = 17$.



Kuva 29. Tutkimuksessa /9/ esitetty yhteenveto kuuden eri työmaan perusteella määritetyiksi N_k :n arvoiksi.

Määritettäessä leikkauslujuutta tämän tutkimuksen aiheena olleen puristinporakonekairauksen tulosten perusteella suositellaan, että apuna käytetään siipikairauksia. Siipikairauksilla määritetään todelliset leikkauslujuudet, jonka jälkeen voidaan määritetyt leikkauslujuudet kohdistaa paikallisiin kärkivastuksiin. Nopealla kerrosrakenteen ja maalajien suuntaa-antavalla määrittelyllä voidaan määrittää tiettyjen kerrosten siipikairaustulosten ja kärkivastuksen välinen paikallinen yhteys. Tällöin saavutetaan huomattavasti parempi tarkkuus kuin käyttämällä teoreettisia kaavoja ja arvioituja kertoimia. Työmäärä tosin lisääntyy hieman, mutta tulosten laatu paranee. Tutkimuksiin tarvittava kokonaisaika ei myöskään kasva suhteettomaksi, koska itse kairaminen tapahtuu 3.0 m/min nopeudella.

4.4.2. Kitkakulma

Kitkakulman arviona käytetään kappaleessa 1.6. esitettyä määrittystapaa, johon myös ruotsalaisessa tutkimuksessa /6/ päädyttiin. Tarkempaan arviointiin eikä analysointiin lähdetty siitä syystä, että kitkakulmien arviointi edellyttää esimerkiksi kolmiaksiaalikokeiden suoritusta.

Kitkakulmat määritetään siis empiiristen tutkimusten perusteella piirretystä kuvaajasta määritetyllä kaavalla (15) /16/.

$$\phi' = \arctan \left(0.096 + 0.386 \log \frac{q_c}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (15)$$

missä q_c on esitetyllä kertoimella 2 korotettu
kärkivastus
 ϕ' on tehokas kitkakulma
 σ'_{vo} on tehokas jännitys

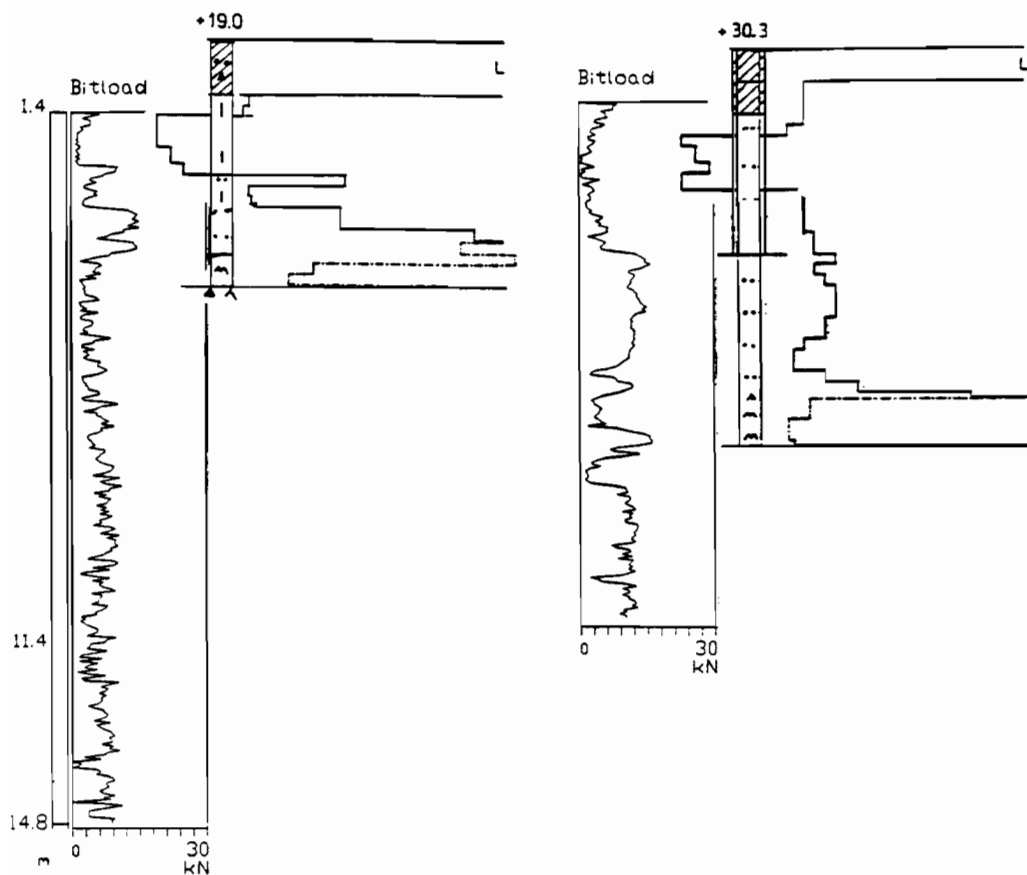
Kuten aiemmin todettiin ei tämän työn tuloksiin nojautuen ole mahdollista perustellusti määrittää kitkakulmia. Suuruusluokan ja suunnan havainnollistamiseksi todetaan kuitenkin, että Itäharjun koealueen kerroksellisissa hiekoissa kitkakulmat vaihtelisivat välillä $32^\circ - 38^\circ$.

4.5. Vertailu muihin menetelmiin

4.5.1. Vertailu painokairatuloksiin

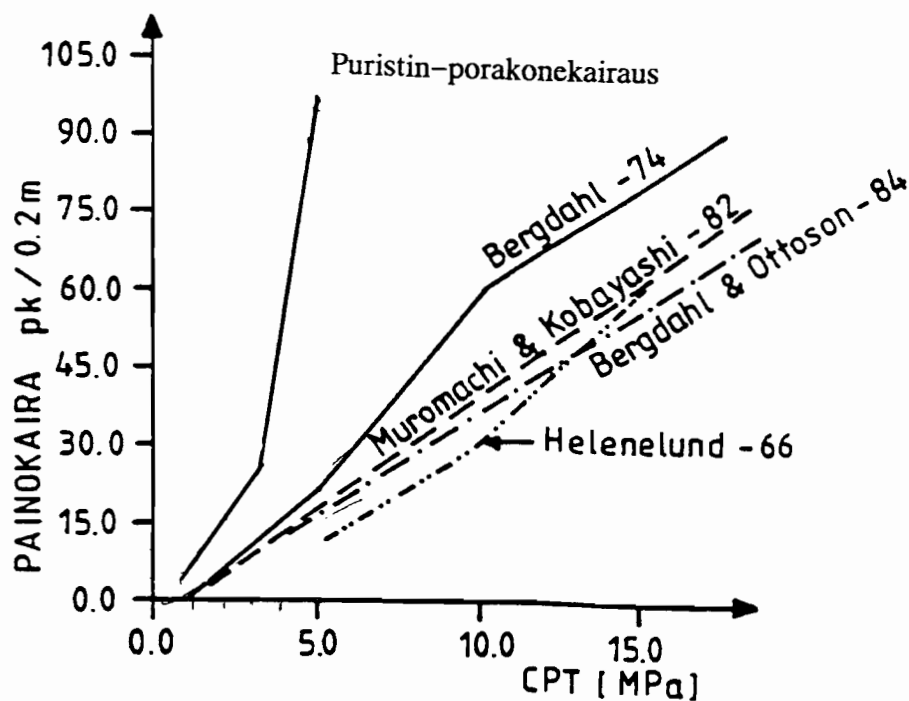
Painokairalla pystytään toteamaan maakerrosrajat ja -paksuudet. Verrattaessa painokairatuloksia suoritettuihin puristin-porakoekairauksiin ovat ko. ominaisuudet

hyvin havaittavissa. Kuvaan 30 on otettu kaksi erityyppisessä maassa tapahtunutta kairausta. Kupittaaalla kairattiin savikon läpi ja Itäharjulla hiekkakerroksen läpi. Molemmissa tapauksissa painokairauksilla ja puristin-porakonekairauksilla löytyivät samat kerrokset. Näin tapahtui useimmissa pisteissä. Kupittaaalla joissakin pisteissä on maaperän vaihtelevuudesta johtuen vaikeaa löytää samoja kerroksia, mutta näin oli joissain tapauksissa myös muutaman metrin päässä toisistaan olevissa CPT-kairauksissa.



Kuva 30. Kupittaaan (vasen) ja Itäharjun (oikea) tutkimusalueilla kairattujen paino- ja puristin-porakonekairausten vertailu. Puristusvaihe porakonekairalla on molemmissa kairauksissa päättynyt noin 1 m. ylemmäs kuin painokairaa käytettäessä. Molemmat porakonekairaukset ovat päättyneet kallioon.

Artikkelin /1/ mukaan painokairavastuksen ja CPT-kärkivastuksen välinen suhde on kuvan 31 mukainen. Kuvaan on piirretty myös puristin-porakonekairauksen kärkivastuksesta ja vertailukairauksien puolikierroksista havainnoitu käyrä. Pyörityksen avulla on puristin-porakonekairauksella on onnistuttu puristusvaiheessa tunkeutumaan tiiviisiinkin kerrokseen pienemmällä kärkipaineella kuin CPT:llä ja osittain tästä johtuen käyrä on huomattavasti jyrkempi. Pyöritystä suurempi vaikutus kärkivastukseen on todennäköisesti murtumismekanismin erilaisuudella (kappale 4.5.3.).



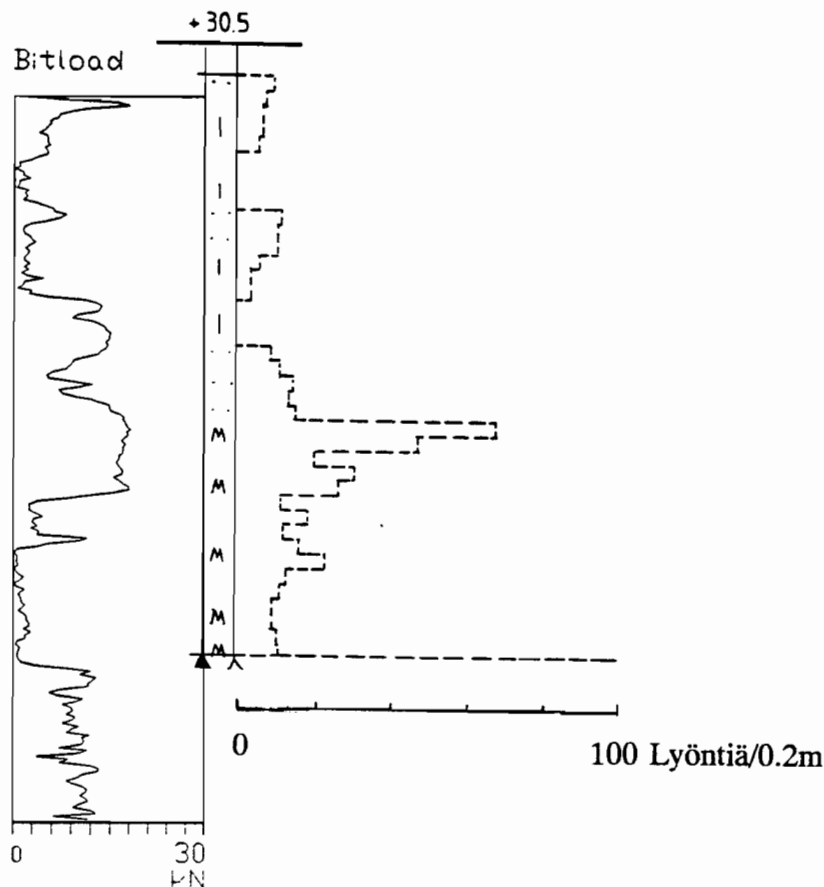
Kuva 31. Painokairausten ja puristin-porakonekairausten kärkisuojuksella puristetun osuuden välinen korrelaatio.

4.5.2. Vertailu heijarikairatuloksiin

Maakerrosrajojen löytyminen todettiin jo painokairauksessakin. Yllättävää oli, että heijarikairalla tunkeutuminen oli huomattavasti helpompaa kuin painokairalla.

Heijarikaira on edennyt yhtä pistettä lukuunottamatta kaikissa pisteissä diagrammista päätellen pitkiäkin matkoja ilman lyöntejä. Kuitenkin painokairalla edettäessä samoissa pisteissä oli vain neljässä esiintynyt lyhyitä vapaapainumamatkoja. Lisäselvitysten jälkeen todettiin, että kairattaessa heijarikairalla lyönnit aloitettiin vasta, kun tangot eivät edenneet enää puristamalla, vaunun painoa hyväksikäyttäen. Tästä johtuen oli diagrammin laatiminen kärkivastuksen ja lyöntien suhteesta hyödytöntä.

Yleisesti voidaan sanoa, että kerroksissa, joissa puristamalla vaadittiin noin 5 MPa:n painetta, oli heijarin lyöntien määrä $N_{20} = 5 - 10$. Pienemmällä puristusvoiman arvoilla heijarikaira oli edennyt vapaapainumilla. Esimerkkitapauksen heijarikairaus- ja puristin-porakonekairausdiagrammit on tulostettu kuvaan 32.



Kuva 32. Itäharjun tutkimusalueella suoritettun heijarikairauksen ja puristin-porakonekairauksen vertailu.

Tässä tutkimuksessa vertailevien heijarikairauksen antama informaatio oli lähinnä päättymissyvyys ja tavanomaisilla menetelmillä määritetty ns. kova pohja. Geoteknisessä suunnittelussa voitaisiin heijarikairauksista määrittää myös paalujen tavoitetasot. Itäharjun alueella tehdyt vertailevat heijarikairaukset olivat päättäneet yhtä lukuunottamatta kairajaan havaintoon "kivi tai kallio". Kärkikappaleella puristaminen oli pysähtynyt pääsääntöisesti huomattavasti ennemmin kuin heijarikairaus. Heijarikairausta syvemmälle oli edennyt kaksi kairausta ja samalle tasolle oli päättynyt neljä kairausta.

Suuremman aineiston avulla voidaan todennäköisesti selvittää myös puristusvaiheen poraparametrien ja paalujen lyöntisyvyyden välinen yhteys. Asiaa selvitettäessä täytyy kehittää poraparametreja joko tässä työssä esitettyjen tai uusien kokemusten perusteella. On kuitenkin katsottava, että tässä työssä on esitelty riittävästi seikkoja menetelmän käyttöönottamiseksi. Sitä kautta saadaan lisäaineistoa tutkimuksen eteenpäin viemiseksi.

4.5.3. Vertailu CPT-kairauksiin

Maalajien ja -kerrosten selvittäminen on jo käsitelty aiemmissa kappaleissa. Tässä kappaleessa keskitytään vain vertailukairauksiksi tehtyjen CPT-kairausten ja puristin-porakonekairauksen puristusvaiheen väliseen yhteyteen.

Tunkeutumisvyvyys oli lähes kaikissa porakonekairauksissa parempi kuin CPT-kairauksissa. Tämä johtunee lähinnä kahdesta syystä. CPT-kairauksessahan ei tankoja pyöritetty ja menetelmän mukaisessa porakonekairauksessa tankoja pyöritettiin 30 r/min nopeudella. Tällöin kruunu pystyi todennäköisesti sivuuttamaan esimerkiksi pienehköt kivet, joihin CPT-kairaus saattoi jo pysähtyä. Toinen seikka, jolla saattaa olla vaikutusta tunkeutumiseen, on murtumismekanismin erilaisuus. Tästä johtuen

suuremmalla kärkikappaleella varustettu tanko tunkeutuu helpommin, kun tankojen halkaisija on pienempi kuin kärkikappaleen.

Paremman tunkeutumisvyödyden lisäksi havaittiin, että kärkisuojusta käytettäessä tangot tunkeutuivat pienemmällä kärkivastuksella kuin CPT-kärkeä käytettäessä. Kantavuuskaavoihin nojautuen tulos on epälooginen. Kärkivastusten tulisi kasvaa suorassa suhteessa kärjen halkaisijaan. Mitatut tulokset ovat kuitenkin hyvin samansuuntaisia etenkin mitattujen kärkivastusten osalta. Puristamiseen tarvittava voima on kaikissa kairauksissa kasvanut isommalla kärjellä noin kaksinkertaiseksi. Tämä onkin johdonmukaista. Kuitenkin, kun puristusvoimat muutetaan kärkivastuksiksi tapahtuu kärjen säteen kaksinkertaistumisen vuoksi kärkivastusten pieneneminen. Kairaustapojen erona on nopeus ja pyörityksen käyttö ja on mahdollista, että puristusvoiman kasvu vain kaksinkertaiseksi johtuu helpommasta tunkeutumisesta pyörityksen avulla. Selvää on, että lisäaineistoa tarvitaan kuitenkin tarkemman ja perustellumman tuloksen saamiseksi. Erityisesti tutkimuksia tarvitaan erilaisista olosuhteista.

Todennäköisin syy puristin-porakonekairauksen helpompaan tunkeutumiseen ja CPT-kärkivastuksia pienempiin kärkivastuksien arvoihin on tankojen ja kärkikappaleen halkaisijoiden suuri ero. Puristin-porakonekairauksessa tankojen halkaisija on merkittävästi pienempi kuin kärjen. CPT-kairauksessa halkaisijat ovat samat. Suuresta halkaisijoiden erosta johtuen maaperän murtokuviot ovat erilaiset. Puristin-porakonekairauksessa suurihalkaisijaisesta kärjestä johtuen muodostuu kärjen yläpuolelle tyhjiö. Tällöin on mahdollista, että murtopinta päättyykin tähän tyhjiään tilaan. Tästä johtuen kärkikappaletta käytettäessä tapahtunee ns. flow-ilmiö ja maa-aines voi siirtyä kärjen yläpuoliseen tyhjätilaan. Murtopinnan erilaisuudesta johtuen myös kärjessä vallitseva tehokas jännitys pienenee ja tämä edesauttaa kärjen tunkeutumista pienemmällä kärkivastuksella.

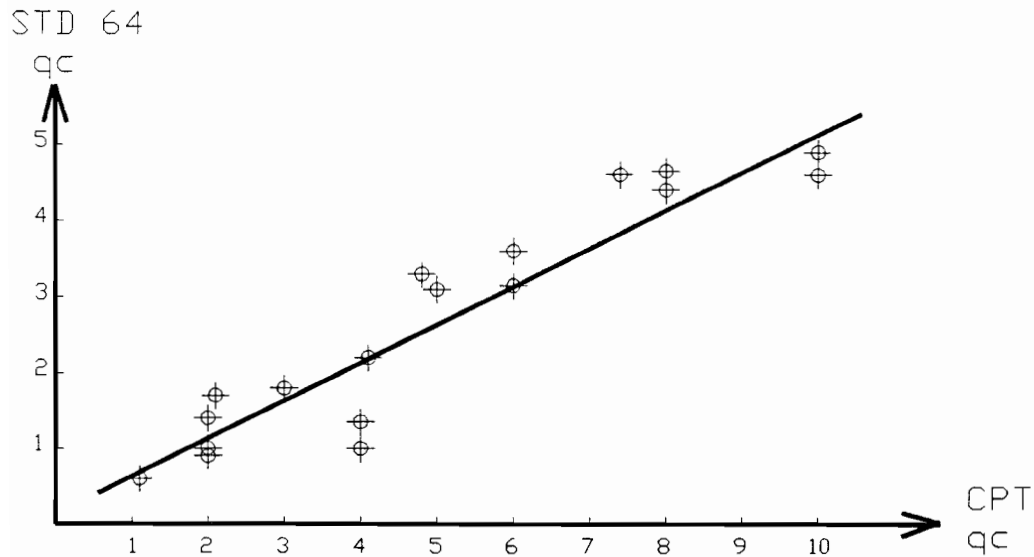
Vastaavaa ilmiötä on käytetty myös teräsputkipaaluutuksessa /23/. Teräsputkipaaluun tunkeutumista on pystytty helpottamaan käyttämällä putken halkaisijaa suurempihalkaisijaista paalujalkaa. Tällöin maaperän murtumismekanismi on erilainen. Näin on saatu kärjessä vallinnutta vastusta pienenemään ja paaluun tunkeutumista helpottamaan maan siirtyessä paalujalan yläpuoliseen tyhjään tilaan.

Kuvaan 33 on kerätty CPT-kairausten ja puristin-porakonekairausten puristusvaiheen aikaiset kärkivastukset. On huomattava, että tulokset kuvaavat vain koealueilla esiintyneiden maalajien käyttäytymistä. Kuvaan on tulostettu kaikista CPT-pisteistä ja niiden läheisyyteen tehdyistä puristin-porakonekairauksista merkittävästi eroavat tulokset. Erittäin lähellä toisiaan olleita tuloksia ei siis luettavuuden vuoksi ole piirretty. Tulokset ovat puristusosuuden aikana mitattuja. Tästä johtuen kuvaan vaikuttaneet maalajit ovat olleet savea tai hienoa, löyhää hiekkaa. Puristusvoima on muutettu kärkivastukseksi jakamalla voima kärjen pinta-alalla. Kuvaan piirretyn suoran, so. esitetty tulosten vastavuus, kulmakerroin $k = 1/2$. Kaavan muotoon (kaava 16) kirjoitettuna sama asia voidaan ilmoittaa:

$$q_{c \text{ ref}} = q_{c \text{ pora}} \cdot 2 \quad (16)$$

missä $q_{c \text{ ref}}$ on CPT kärkivastukseen suoraan verrannollinen arvo.

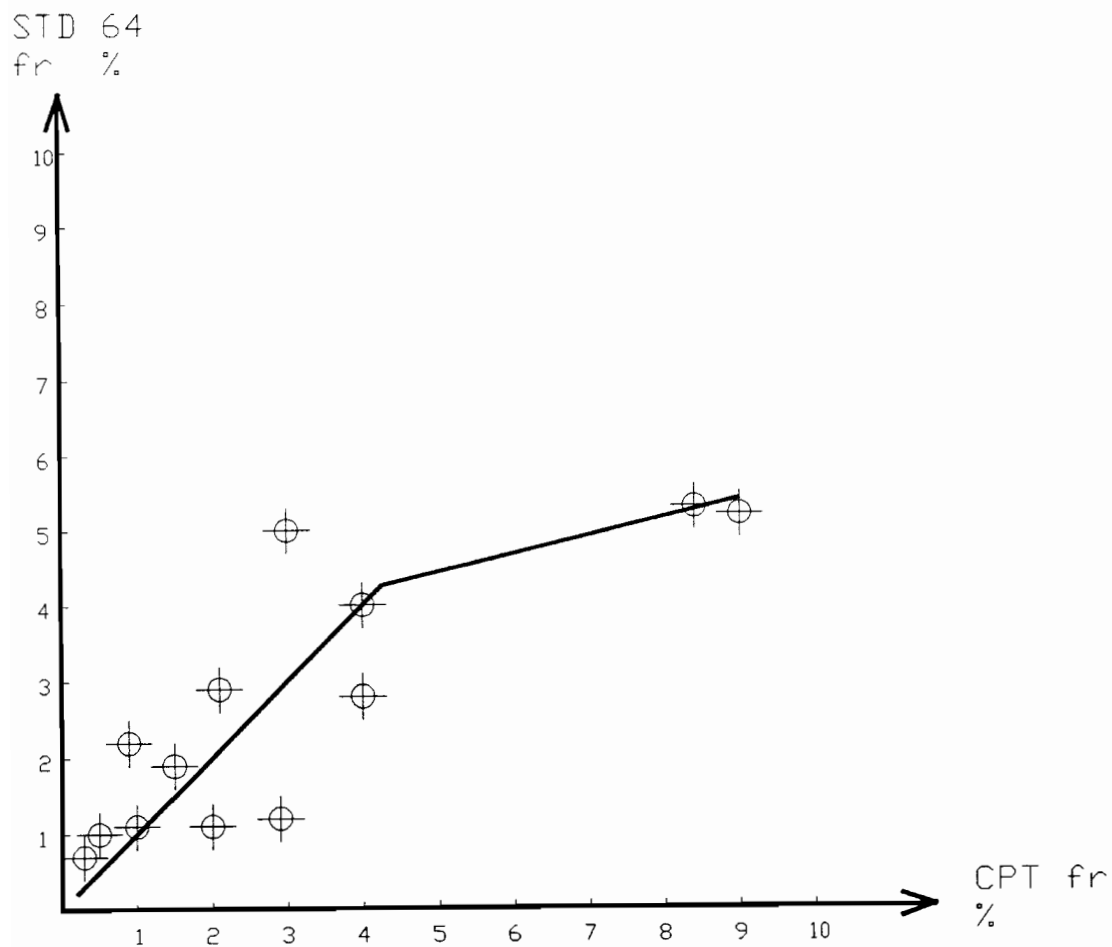
$q_{c \text{ pora}}$ on puristin-porakonekairauksella saatava kärkivastuksen arvo



Kuva 33. Vertailu CPT- ja puristin-porakonekairauksen kärkevyyden välillä. Käytettävä harkiten.

Siis puristusvaiheen aikaiset kärkevyydet tulisi tämän tutkimuksen perusteella vastaavissa maaperissä kertoa kahdella. Näin ne olisivat "suoraan" verrannollisia CPT-kärkevyyksiin. Tässä tutkimuksessa esitetty vastaavuus ei varmastikaan ole yleispätevä, joten sitä on käytettävä harkiten. Luonnollisesti kärkevyyden arvojen muuttaminen vaikuttaa myös maalajitulkintoihin vastaavasti.

Molempien menetelmien kitkasuhteet, joita käytetään mm. maalajitulkinnassa, on esitetty kuvassa 34. Aineistona on käytetty kaikkia suoritettuja kairauksia. Pisteitten tulostuksessa on käytetty samaa periaatetta kuin kärkevyydenkin kohdalla. Hajonta esitetyn aineiston perusteella on erittäin suuri, mutta ainakin pienillä kitkasuhteiden arvoilla voidaan korrelaatioksi olettaa 1.



Kuva 34. Vertailu CPT- ja puristin-porakonekairausten laskennallisten kitkasuhteitten välillä. Esitetty korrelaatio pienillä arvoilla on 1. Ei suositella käytettäväksi.

5. PORAUSVAIHE

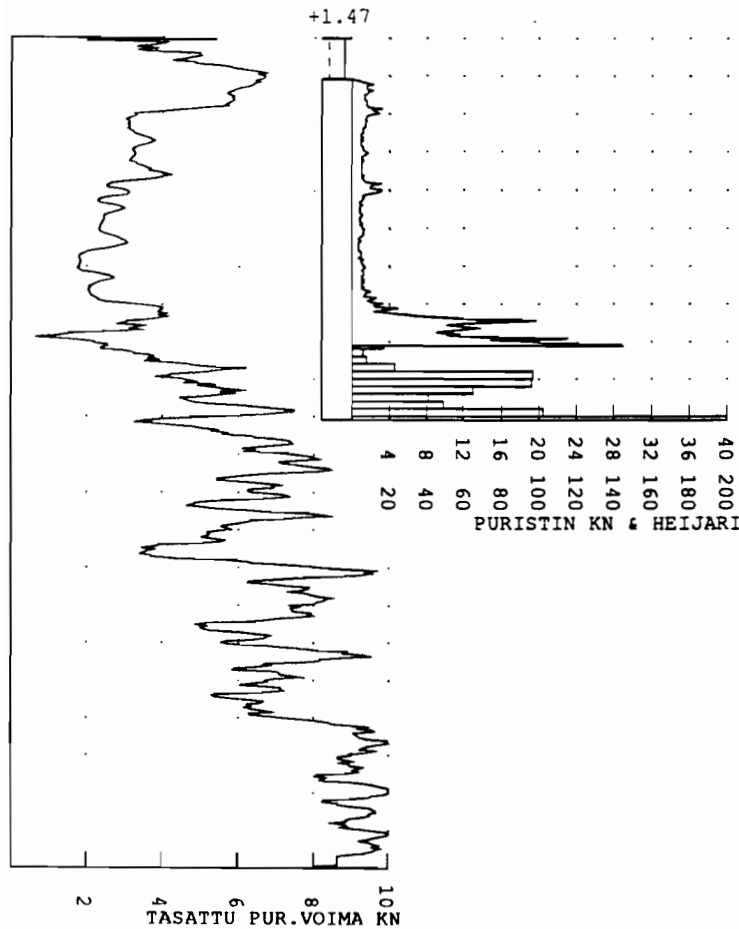
5.1. Puristusvoima

Puristusvoimasta saatava informaatio suojakappaleen särkemisen ja huuhteluun siirtymisen jälkeen muuttuu selvästi (kuva 35). Käytetty voima alkaa "sahata" noin 1 kN toleranssilla, jolloin ohuista kerroksista saatava informaatio menetetään. Saattaa olla, että puristusvoiman vaihtelu johtuu iskun käytöstä, mutta sitä ei yksiselitteisesti voitu todeta. Myös paksumpien kerrosten havainnoiminen vaikeutuu huuhtelusta ja iskusta johtuen huomattavasti.

Useimmissa kairauspisteissä puristusvaiheen jälkeen alkoi tasainen kivinen hiekka tai moreeni, jolloin varsinaista kerroksellisuutta ei pelkästään puristusvoimasta päästy toteamaan kärkikappaleen rikkoutumisen jälkeen.

Helsingin kaupungin tekemien tutkimusten perusteella /24/ puristusvoimasta saadaan informaatiota myös huuhtelun aikana. Verrattaessa liitteessä 5 esitettyjä kairauksia voidaan puristin-porakonekairauksessakin havaita löyhä kerros, joka on havaittu puristin-heijarikairauksella. Samalla on kuitenkin nähtävissä porakoneella kairatun puristusosuuden epäselvä puristusvoiman tulos. Tämä johtuu siitä, että porakoneella kairattaessa ei ole käytetty kruunun päällistä suojakappaletta vaan huuhtelua on käytetty alusta asti. Yleensä ko. tulokista on todettava, että kaikki puristin-porakonekairausten tulosdiagrammit on tasoitettu suurimpien heilahtelujen poistamiseksi.

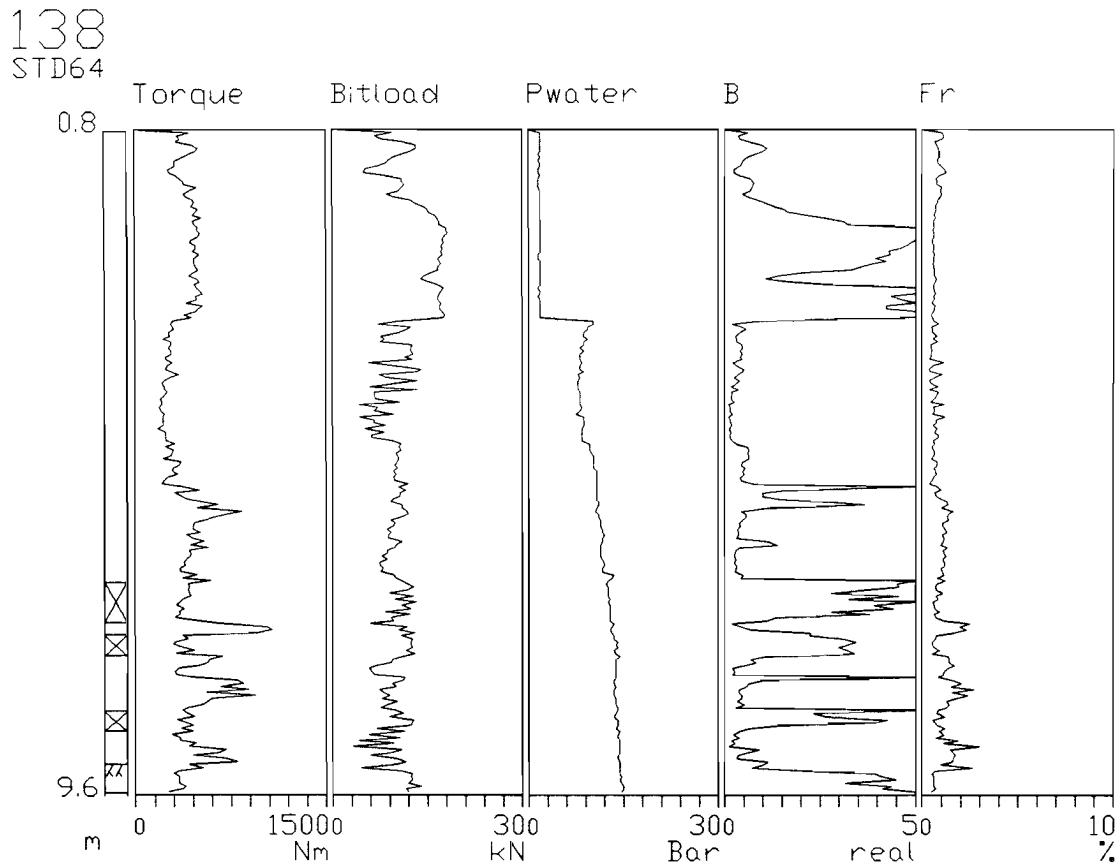
Löyhemmän kerroksen erottamisen havainnollistamiseksi kuvassa 35 on esitetty molempien kairauksien puristusvoimien tulostukset.



Kuva 35. Puristin-heijari- ja puristin-porakonekairaus-
ten samasta pisteestä kairatut puristusvoimien tulostuk-
set. Puristin-porakonekairauksessa on käytetty koko ajan
huuhtelua.

Myös puristin-heijarikairauksen ja puristin-pora-
konekairauksen välinen käytännön ero on hyvin havait-
tavissa. Puristin-heijarikairaus on päättynyt jo tasolle
-8.26 m, kun taas porakoneella on voitu jatkaa kallion
pintaa asti. Kärjistetysti voidaan lisäksi arvioida,
että samassa ajassa, kuin puristin-heijarikairalla on
päästy 8.26 metrin syvyyteen, on porakoneella pystytty
varmistamaan lisäksi kallion pinta. Tästä huolimatta

näitä kahta menetelmää ei pidä käsitellä kilpailevina vaan toisiaan tukevin menetelminä.

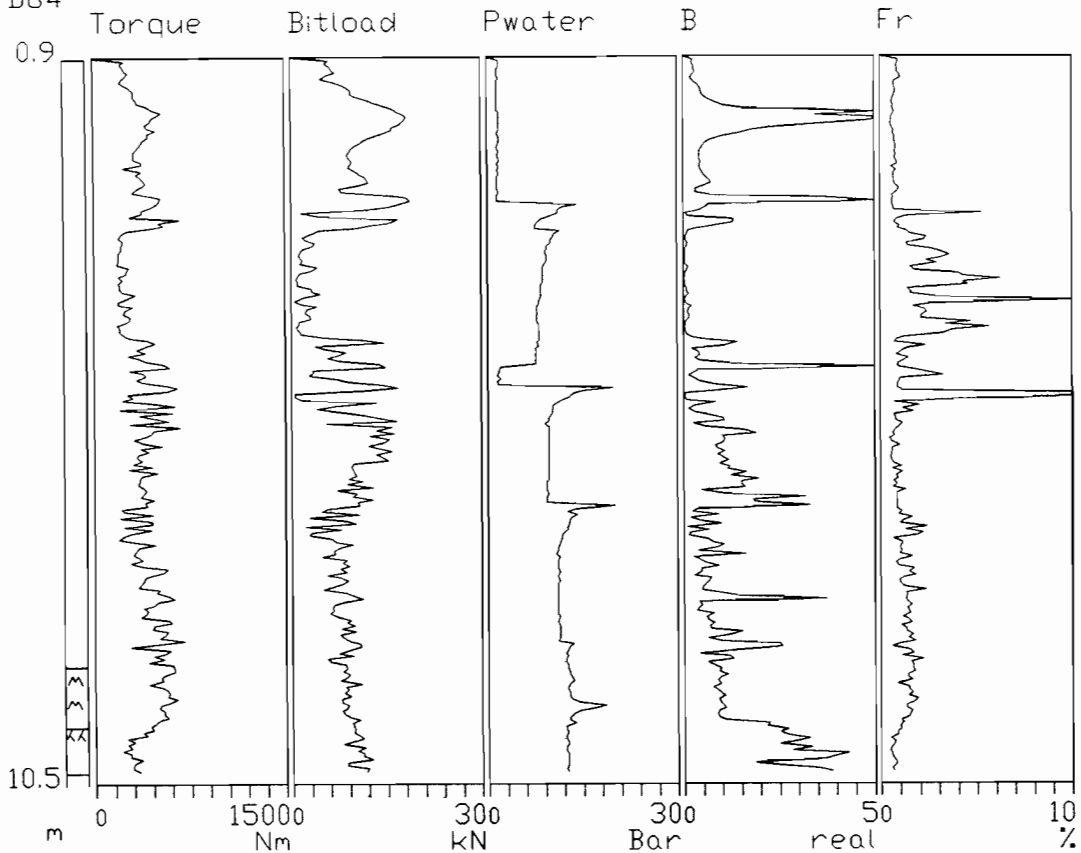


Kuva 36. Puristusvoimasta saatavan informaation laatu heikkenee huomattavasti huuhtelua käytettäessä. Kuvan esimerkissä on käytetty vesihuuhtelua.

Kun puristuksesta (kuva 36) on siirrytty poraukseen huuhtelun aloittamisen jälkeen, voidaan tasaisesta väännöstä ja työmaalta otetuista näytteistä olettaa maalajin olevan hiekkaa tai joka tapauksessa tasarakeista, homogeenistä maa-ainesta. Myös parametri B on hyvin tasainen näissä kerroksissa. Syvyydeltä 5.8m eteenpäin on ainekseen sekoittunut mahdollisesti kiviä, joten on perusteltua olettaa maaperän muuttuneen kiviseksi hiekaksi tai moreeniksi. Läpiporatut kivet erottuvat selkeästi mm. parametrin B tulosteesta. Kivet on myös merkitty syvyyspylvääseen. Kallion pinta on syvyydellä 9.2 metriä.

5.2. Vaippavastus

Vääntömomentista voidaan laskea tankoihin ja kärkeen kohdistuva oletettu vaippakitka. Koska kokonaisvääntö kuitenkin jakaantuu molempien, sekä tankojen että kärjen osalle, on laskennallinen vaippakitka kohdennettava jotenkin. Koska vääntömomentti käyttäytyy sekä puristus- että porausvaiheessa samoin, on kappaleessa 4.2. esitetyn perusteella katsottava sen painottuvan voimakkaasti kärjen osuudelle. Porausvaiheessa on lisäksi huomioitava se, että huuhteluaine, joka useimmiten oli vesi, "voitelee" tankojen ja maa-aineksen välisen rajapinnan. Kruunu sen sijaan on ilman suojakappaletta ja kulmikkaana aiheuttaa varmasti suurimman osan vääntömomentista. Pienen virheen esitettyihin tuloksiin aiheuttaa se, ettei vaippavastusta laskettaessa ole kärjen pinta-alaa muutettu porausvaiheen aikana kruunun pinta-alaksi. Koska kärke suojuksen ja kruunun pinta-alojen ero on pieni, ei asiaan kiinnitetty huomiota. Esimerkkitulostus, jossa näkyy porausvaiheen aikainen vääntömomentin heilahtelu, on kuvassa 37. Porausvaiheen alussa löyhässä hiekassa vääntömomentti on ollut tasaisen alhainen. Syvemmälle porattaessa on nopeus alkanut heilahtelemaan. Juuri ennen kallionpintaa momentti on ollut säädetyssä maksimissaan, josta voi olettaa, että kallion päällä on ollut ohut moreenikerros. Kallioporaukseen siirtymisen jälkeen momentti on taas pudonnut selvästi. Myös kuvasta 36 on momentin käyttäytyminen havaittavissa.

146
STD64

Kuva 37. Itäharjun koealueen tutkimuspiste 146. Pohjamooreni on havaittavissa kalliopinnan päällä.

5.3. Poraparametrit

5.3.1. Yleistä parametrien tulostuksista

Seuraavissa kappaleissa on esitetty vain niiden parametrien tulostuksia, joiden edelleen kehittämiseksi on katsottu olevan parhaat mahdollisuudet. Niinpä vain energiakaavan ja vaihteluindeksin mukaiset tulosteet on esitetty. Vedenläpäisevyys on näiden lisäksi parametri, jota kannattanee kehittää, mutta kuten aiemmin jo mainittiin kaikkia sen määrittämiseen tarvittavia tietoja

ei tässä työssä mitattu. Esimerkkitulostus vedenläpisevyydestä on kuitenkin esitetty kappaleessa 5.4.3.

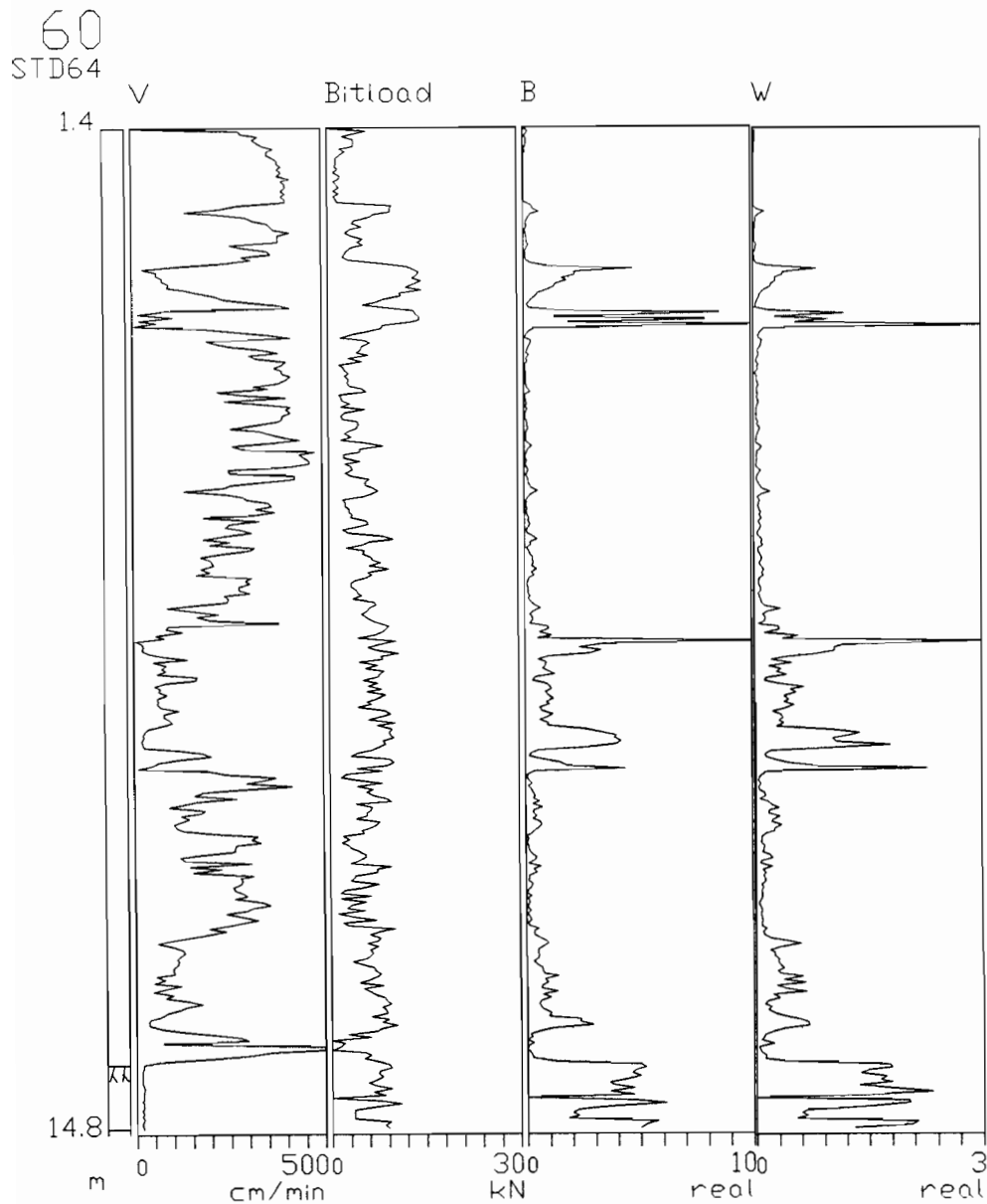
5.3.2. Tulostukset

Energiakaavaa sovellettaessa on esimerkki kairauksesta nro. 60. Kyseisessä reiässä on edetty hiekassa tai moreenissa noin 13.5 m ennen kuin on porauksessa on havaittu kiviä ja lopuksi kallio. Vastaavanlaisissa olosuhteissa kaavan pitäisi olla käyttökelpoinen. Diagrammiin on tulostettu lasketun energiakaavan mukaisen indeksin lisäksi puristusvoima sekä parametri B (kuva 38).

Huomattavaa on, että tulostettua energiadiagrammia "W" laskettaessa on oletettu pyöritysnopeuden pysyneen vakiona so. asetettuna 30 r/min. Nopeuden muutokset olisivat aiheuttaneet lasketun käyrän tasoittumista, koska tiiviissä kerroksissa pyöritysnopeus olisi pudonnut laskentakaavaan asetetusta vakioarvosta.

Kun energiakaavaa käytetään vakioimalla pyöritysnopeus laskentakaavassa, kuten tässä työssä tehtiin, saavutettiin sillä kuitenkin selkeitä etuja verrattuna mm. puristusvoimaan tai nopeuteen.

Puristusvoimasta tiiviiden kerrosten erottaminen on hankalaa, koska voima vaihtelee koko porausvaiheen aikana lähellä maksimiarvoaan. Ainoastaan selkeästi pehmeät välikerrokset, jolloin voima pääsee suuresta puristusnopeudesta huolimatta laskemaan, on mahdollista havaita. Myös ilman iskua edettäessä on energiadiagrammista hyötyä, jos poraaja toimii, kuten tässä työssä toimittiin. Tällöin eteneminen pysähtyy mm. kiveen ja suunnittelijan on mahdollista päätellä esimerkiksi moreenin kivisyyttä. Edettäessä huuhteluporauksen avulla on myös tiiviiden kerrosten erottaminen mahdollista energiaparametrin avulla, kunhan nopeusvaihtelut sallitaan.



Kuva 38. Poraparametrit B ja W esimerkinomaisesti. Mo-
lemmista on havaittavissa sama kerrosinformaatio. W:ssä
ei ole huomioitu pyöritysnopeuden muutoksia.

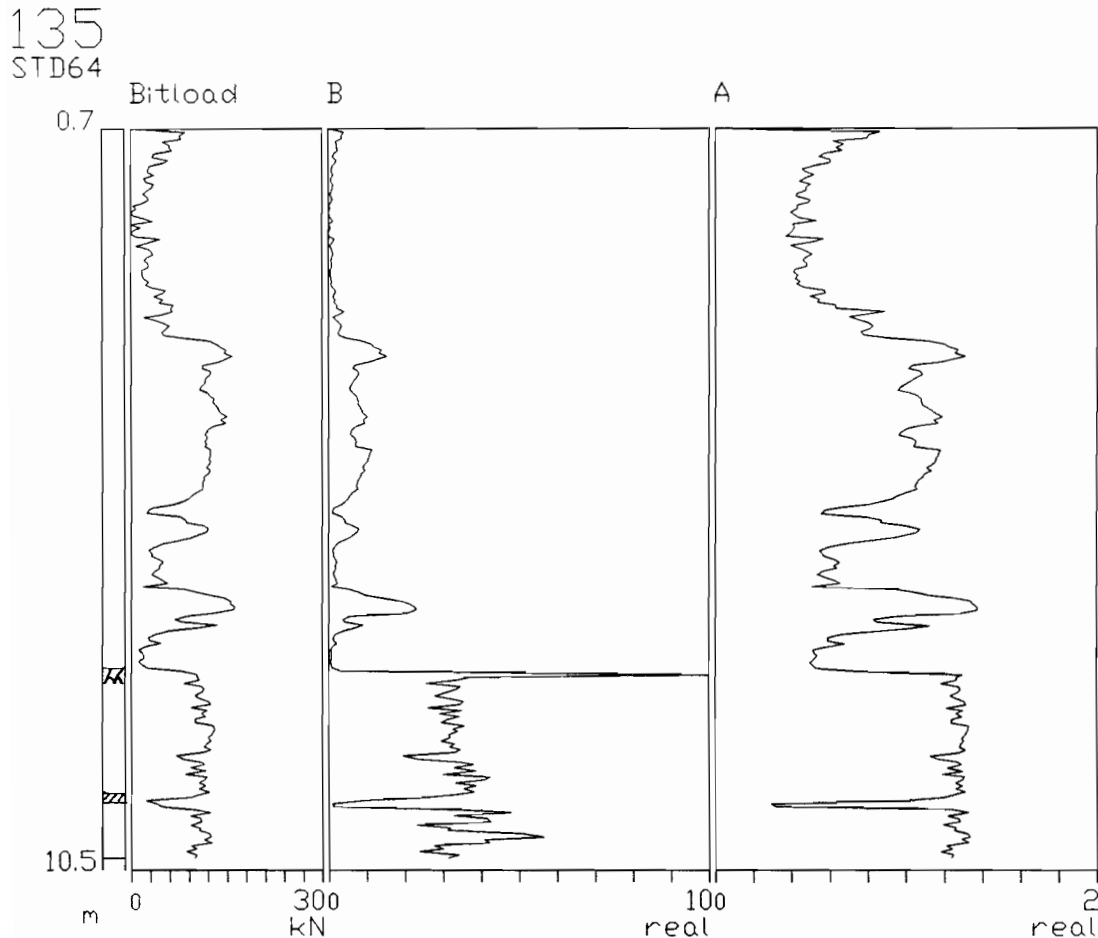
Käyttäytymiseltään W-diagrammi on kuitenkin pyöritysno-
peuden puuttumisen vuoksi samanlainen kuin parametri B.
Huomionarvoista se on sikäli, että energiaa laskettaessa
käytetään tässä työssä käytännössä vääntömomentin ja

puristusnopeuden suhdetta (kaavat 7). Parametrin B laskennassa käytetään sen sijaan puristusvoiman ja -nopeuden suhdetta. Tämä tukee aikaisemminkin esitettyä väitettä siitä, että puristusvoima ja vääntömomentti vaihtelevat samalla tavalla.

Kun vertaillaan puristusnopeutta ja energiaparametria, on niissäkin selkeä ero. Vaihtelevissa kerroksissa, kun puristusnopeuden säädetty maksimiarvo on saavutettu, ei nopeudesta saada informaatiota. Energiaparametrin avulla voidaan kuitenkin havaita löyhässä kerroksessa tapahtuvia muutoksia.

Vaihteluindeksin esimerkkitulostus on kuvassa 39, jossa Itäharjun alueen kairauksesta nro. 135 on tulostettu laskettu indeksi sekä pelkkä puristusvoima. Kerrosrakennne on selkeästi havaittavissa kuten kallioporausosuuskin. Myös kalliossa ollut noin 20 cm korkea rako on selvästi havaittavissa. Kaavan 8 mukainen vaihteluindeksi ei kuitenkaan anna mitään uutta suoraan puristusvoimaan tai parametriin B verrattuna. Sen käyttöä kannattaa kuitenkin laajemmassakin mitassa kokeilla, koska sen suhteuttaminen mm. CPT-kärkivastuksiin mahdollistaisi sen käytön koko kairauksen matkalla. Tällöin välttyttäisiin tulkinnan kaksijakoisuudelta ja sitä kautta helpotettaisiin geoteknisen suunnittelijan työtä. Lisäksi vaihteluindeksin erottelun perusedellytys on, kuten B:nkin, jonkinasteinen nopeuden vaihtelun salliminen.

Kuvassa 39 on havaittavissa myös kalliossa ollut rako. Tämä antaaakin viitteitä siitä, että lisätutkimusten yhteydessä kannattaa tutkia myös kallio-osuudelta saatavaa tietoa raoista ja halkeamista etenkin jos erilaisia porakalustovaihtoehtoja voidaan tutkia.

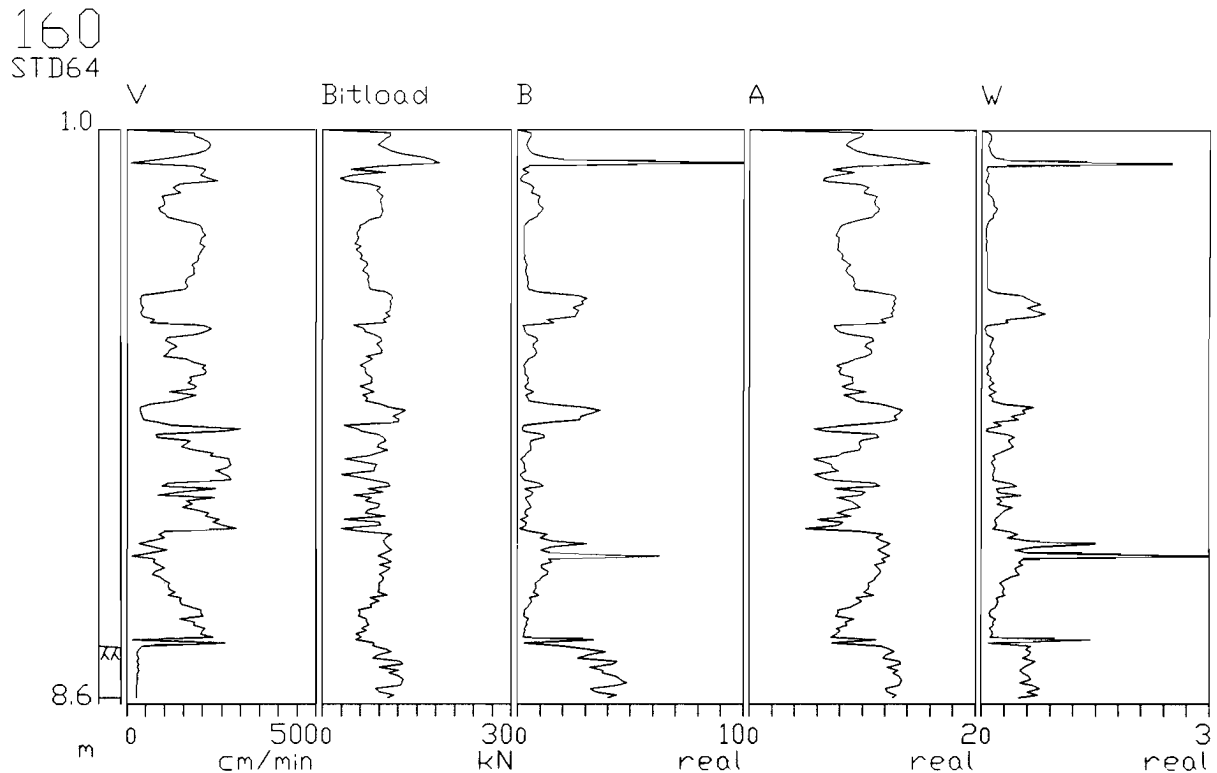


Kuva 39. Vaihteluindeksin mukainen tulostus. Tiiviit kerrokset ja kallio ovat havaittavissa, kuten parametrista B. Huuhtelu on aloitettu syvyydellä 8 m.

Indeksin selkeästi huonona puolena on tiiviiden maakerrosten tiiviysvaihteluiden erottelun huononeminen. Tämä johtuu siitä, että kaavassa puristusnopeus on suhteutettu maksiminopeuteen ja tällöin sen merkitys ei ole yhtä korostettu ja selvä kuin esimerkiksi parametria B käytettäessä.

Parametrien rinnakkaisen vertailun helpottamiseksi kaikki esitetyt parametrit on kerätty yhteen kuvaan (kuva

40) kairauksesta 160. Edelleen diagrammeista on tehtävissä samat huomiot kuin aikaisemmissakin esimerkeissä.



Kuva 40. Kaikki esitetyt parametrit: A, B, W

Parametrit B ja W ovat lähes identtiset. Molemmista voidaan havaita kaikki samat kerrokset. Ainoastaan kalliion porauksessa puristusvoiman avulla laskettu parametri B vaihtelee enemmän vaikkakin kallio on muuten on selvemmin havaittavissa. Terävät "piikit" ko. diagrammeissa johtuvat siitä, että iskua on käytetty vasta, kun kairaus ei ole muulla tavoin edennyt. Toisin sanoen piikin kohdalla on ollut esimerkiksi kivi, jonka johdosta kairaus on pysähtynyt ja on siirrytty iskun käyttämiseen. Näiden piikkien avulla on mahdollista päätellä mm. maaperän kivisyyttä. Ongelmaksi tulkinnessa muodostuu kuitenkin se, ettei poravasaran iskun käyttöä ole rekis-

teröity, jota voi päätellä vain siitä, onko syvemmälle kairattaessa lisää piikkejä vai ei.

Parametri A näyttää ensisilmäyksellä sisältävän lisäinformaatiota verrattuna parametreihin B ja W. Perusteellisemman tutkimisen jälkeen voidaan kuitenkin todeta, että kyse onkin lähinnä vain mittakaavamuutoksesta. Jos esimerkiksi parametrin B diagrammi skaalattaisiin mittakaavaan 5, 10:n sijasta olisi tulos hyvin samankaltainen. Ainoana erona on em. piikkien puuttuminen parametrista A. Tämän voidaankin katsoa olevan selvä puute, koska A:n avulla esimerkiksi kivisyyttä ei voida todeta. Tämä johtuu siitä, että parametriin A ei vaikuta nopeus suoraan, vaan maksimi- ja käyttönopeuden suhde. Tällöin ei niin korostettuja eroja pääse syntymään kuin muissa parametreissa.

5.3.3. Parametrien kehittäminen

Vaikka mm. parametri B tuntuukin alustavasti käyttökelpoiselta, ei se merkitse sitä, etteikö siinä olisi selviä puutteita ja kehittämistarpeita. Suuri askel eteenpäin olisi maalajien määrittäminen samalla tavalla sekä puristus että porausvaiheen aikana. Se edellyttää kuitenkin mm. iskun rekisteröintiä.

Huuhtelupaineen muutokset eivät näy laskennallisessa parametrissa. Esimerkiksi lisäämällä se suoraan parametriin B tai tulostamalla vedenläpäisevyys, so. huuhtelupaineen määrän ja -paineen suhde, voitaisiin päästä lähemmäs helpompaa tulkintaa. Huuhtelun havainnollistamisen lisäksi olisi tärkeää saada piirrettävien diagrammien tietomäärä hyväksi mutta diagrammien lukumäärä pieneksi. Kehittämällä aina vain lisää parametreja joudutaan käytännössä aina harkitsemaan, mikä aikaisemmin käytetty parametri jätetään vakiotulostuksista pois. Näin siitä syystä, ettei suunnittelijan työtä hankaloitettaisi. Suunnittelijan näkökulmasta tarkasteltaessa

voidaan arvioida, että enintään kolmen käyrän käyttö olisi mahdollista hankaluuksia aiheuttamatta.

Toinen ratkaiseva seikka, mitä ei ole rekisteröity, on vasaran iskun paine. Hiekassa ja moreenissa on edetty huuhteluvaiheen aikana sekä iskulla että ilman. Iskun poiskytkeminen johtuu siitä, ettei vasaraa saa rikkoutumisvaaran vuoksi isketä "tyhjään". Tyhjää isketettäessä iskun energia kohdistuu niskakappaleeseen, eikä etene tankoihin ja lopulta kruunun välityksellä maahan, niin kuin pitäisi. Toisin sanoen poravasaran männän iskun aiheuttama pulssi ei välity tankoihin puristusjännitykseksi vaan energia jää niskakappaleeseen. Iskun väärinkäytöstä seuraa laitteiston rikkoutuminen.

Iskua rekisteröitäessä pelkän päällä / pois- informaation hankkiminen on sähkösignaalia rekisteröitäessä mahdollista. Kun Geoprinterillä on kapasiteettia useamman kanavan rekisteröintiin, on iskunpaine rekisteröitävissä itsenäisenä suurena tai yhdistettävissä johonkin muuhun rekisteröityyn kanavaan. Rekisteröidyn signaalin voi tämän jälkeen haluttaessa siirtää vaikka suoraan laskettuun poraparametriin, jolloin iskun käytön mukanaan tuomat merkittävät erot tulevat esiin.

Perustuen haastatteluun /8/, on muun kuin päällä / pois- informaation kerääminen iskun paineiden mittauksesta vaikeaa. Hydraulisesti poramäntää liikutettaessa muuttuu maan vasteesta riippuen vain porakoneen iskuluku, eikä suoranaisesti iskun antamiseksi tarvittava hydraulipaine pitemmällä aikajänteellä.

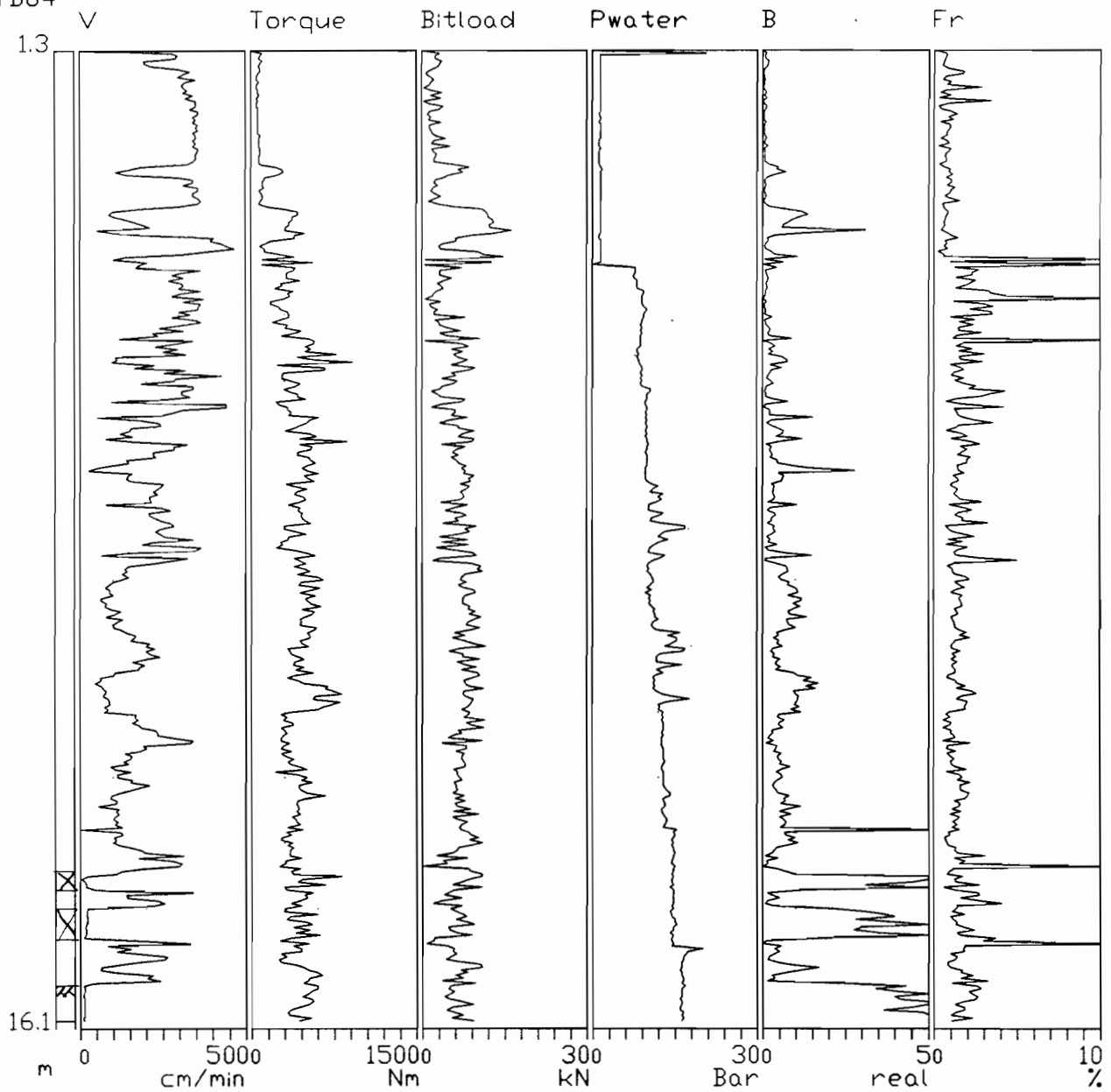
5.4. Huuhtelupaine

5.4.1. Huuhtelu vedellä

Huuhtelun aloituspiste on syvyydellä, josta ei voida enää edetä pelkästään puristamalla ja pyörittämällä. Tällöin kruunun tiivistänyt kärkisuojuus rikotaan iskemällä ja eteneminen halutulle syvyydelle tapahtuu huuhteluporauksena joko ilman iskua tai iskun avulla.

Vedellä huuhdeltaessa käytetty paine oli 25 bar ja vesipumpun maksimituotto ko. painetasolla 50 l/min. Aluksi huuhtelupaineena käytettiin pienempää noin 15 bar painetta, mutta jonkinlaisten paine-erojen aikaansaamiseksi painetasoa oli nostettava käytettyyn 25 bar:iin. Huomattava on, ettei paineen nosto sinällään saa aikaan lisääntyviä painemuutoksia. Paine muuttuu vasta, kun maakerrokset alkavat vastustaa huuhtelua.

Koska käytetty tankokalusto oli selvästi pienempää halkaisijaltaan kuin käytetyt kruunut, jäi tankojen ja maan väliin selvä huuhtelukanava. Todennäköisesti juuri huuhtelukanavan hyvistä huuhteluominaisuuksista johtuen mitatut paine-ero olivat hyvin pieniä. Vesi pääsi esteettä nousemaan huuhtelukanavaa ylös ja käytännössä havaittavat paine-erot ovatkin staattisen vedenpaineen aiheuttamia muutoksia syvemmälle porattaessa. Osaltaan huuhtelupaineen arvoon vaikuttaa myös syvemmälle porattaessa huuhtelukanavan pituuden lisäys. Poraus nro 62 on hyvä esimerkki siitä, mitä huuhtelupaineesta tehdyissä kokeissa oli parhaimmillaan havaittavissa (kuva 41).

62
STD64

Kuva 41. Huuhtelupaineen esimerkkitulostus Kupittaaan koekentältä. Läpiporatut kivet ja kallion pinta on merkitty "syvyyspylvääseen".

Huuhtelu on aloitettu syvyydellä n. 4.5 m. Ensimmäisen puolen metrin kerroksen aikana havaittavissa pientä paineen vaihtelua. Kyseessä saattoi olla esimerkiksi

tiivis silttikerros tai hiekkakerros. Seuraava 3.5 m matka oli myös muista diagrammeista päätellen ollut helpohkosti läpäistävää maa-ainesta, koekuopan perusteella savea. Seuraavan metrin aikana ilmenneet paineenvaihtelut aiheutuivat kruunun tukkeutumispyrkimyksistä. Maalajiin oli tullut hienoainesta, joka tulppauttaessaan huuhtelukanaavia aiheutti paineenmuutoksia. Vastaavanlainen kerros oli havaittavissa myös syvyydellä 10 - 11 m. Vedenpaineen muutoksista ja otetuista näytteistä oli pääteltävissä kerrosten olevan tiivistä hiekkaa. Diagrammin loppuosa oli huuhtelupaineen osalta melko tasainen. Muutokset ovat olleet pieniä ja päätellen niiden n.1.8 m väleistä, ne johtuivat huuhteluventtiilin avaamisesta ja sen jälkeisestä paineen tasaantumisesta. Yleisesti ottaen paine on kasvanut aloitussyvyydeltä lähes lineaarisesti. Tämä paineenkasvu johtui pääasiassa staattisen vedenpaineen kasvusta ja huuhteluvesikanavan pituuden ja turbulenttivirtausten yhteisestä, painetta lisäävästä vaikutuksesta.

Huuhtelusta aiheutuu maaperän selvää häiriintymistä ja mittauksen "tunnettomuutta". Häiriintyminen ilmenee mm. hiekkaan ja moreeniin edenneissä kairauksissa syvyyksillä, joissa huuhtelu on jäänyt avaamatta. Tällöin rekisteröidyt puristusvoima ja vääntömomentti ovat selvästi suurempia kuin huuhtelun aikana ja vastaavasti tunkeutumisnopeus on ilman huuhtelua pienempi.

Tunnettomuudesta johtuen korkeapainehuuhtelun käyttämiin maakerrosten läpäisyyn liittyykin useampia huomioitavia seikkoja. Jotta saataisiin syntymään jonkinlaisia paine-eroja eri tiiviyksisten maakerrosten välillä, tulisi käyttää vielä huomattavasti suurempiakin huuhtelun litramääriä ja paineita kuin käytetyt 50 l/min ja 25 bar. Koska kyseessä on maksimipaine maksimituotolla ei tätäkään painetasoa saavuteta muulloin kuin tankojen tukkeutuessa. Huuhteluaineen määrä tulisi siis nostaa niin korkealle, että huolimatta hyvin toimivasta huuhtelusta, painenvaihteluista tapahtuisi kruunun syvyydellä, maakerroksen vedenläpäisykyvyn mukaan. Suuria huuhtelu-

määriä käytettäessä täytyy lisäksi huomioida käytetyn kaluston asettamat rajoitukset.

Korkeampi huuhtelumäärä mahdollistaa myös suuret tunkeutumisnopeudet tiiviiseenkin moreeniin, jolloin kallio-pintojen varmistuksiin päästään nopeammin. Hyvästä huuhtelusta johtuen päästään 15 metrinkin syvyinen moreenikerroksen läpäisy suorittamaan erittäin nopeasti, vähällä reiän rassaamisella.

Nopeus ei kuitenkaan saa muodostua kehitettävän menetelmän mukaisen porauksen itsetarkoitukseksi. Tarkoituksena on saada porauksen aikana mahdollisimman paljon informaatiota, jotta myös porauksen aikaisia mitattuja parametreja voitaisiin hyödyntää. Koska huuhtelulla on taipumusta häiritä maaperää niin, ettei varsinaista kairaustietoa saada yhtä hyvin kuin ilman huuhtelua on löydettävä järkevä raja huuhtelupaineille. Näin ollen porauksissa käytetty 25 bar näyttää tässä vaiheessa järkevältä ylärajalta. Myöskään porakoneissa, joissa ei ole erillishuuhtelujärjestelmää, ei korkeiden huuhtelupaineiden käyttö ole sallittua.

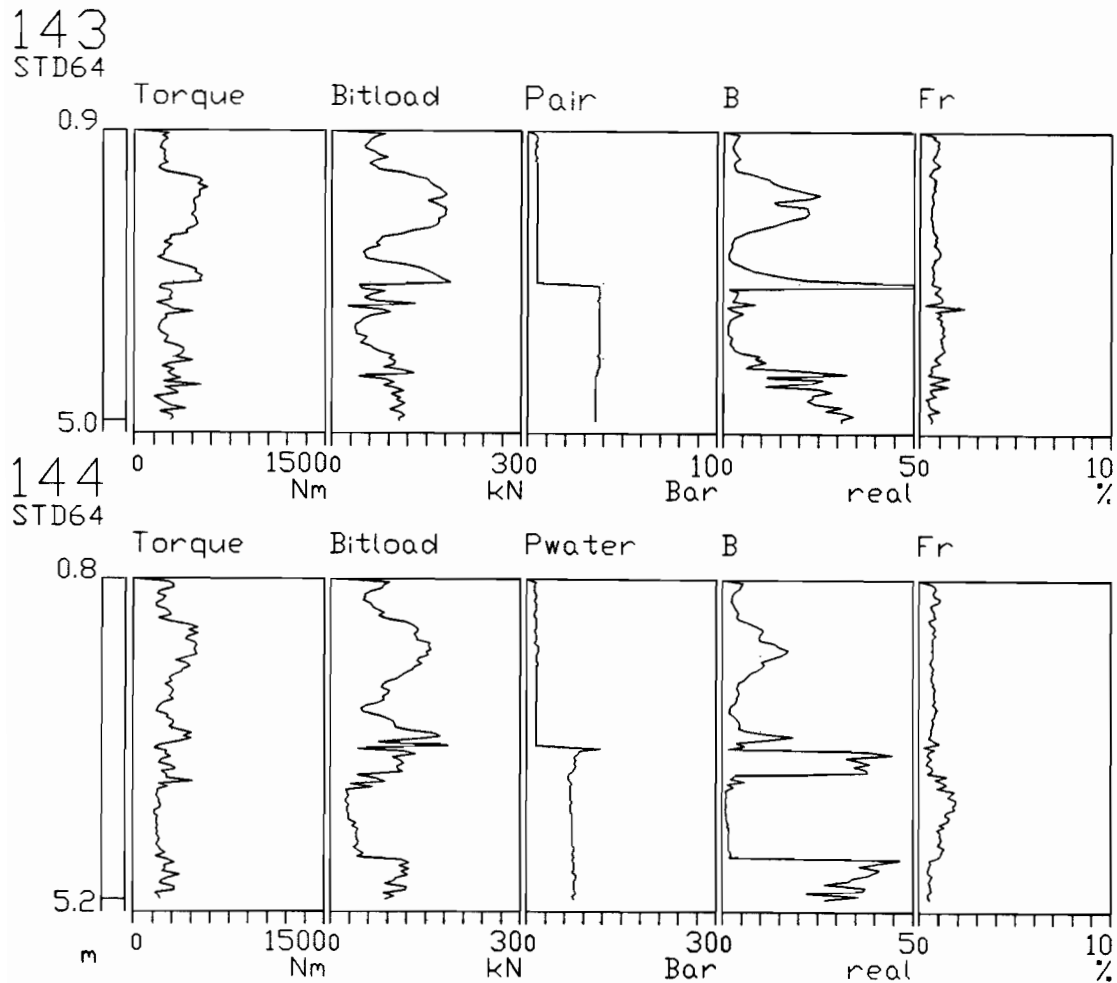
5.4.2. Huuhtelu ilmalla

Pääosin huuhteluaineena käytettiin vettä, mutta joissakin kairauksissa tehtiin vertailuja vesi- ja ilmahuuhtelun välillä. Käytetty kompressorit tuotti 4 bar:n paineella noin 8 m³ ilmaa minuutissa.

Tutkimukseen osallistuneiden henkilöiden käsitykset huuhteluaineen vaikutuksesta olivat ennen kokeilua varsin samansuuntaisia: Ilmalla huuhdeltaessa maaperästä saataisiin enemmän käyttökelpoisempaa tietoa kuin vedellä huuhdeltaessa, eikä ilmahuuhtelu näin ollen häiritsisi tuloksia yhtä paljon kuin vesihuuhtelu.

Verrattaessa porauksia 143 ja 144 (kuva 42), esitetyt arviot näyttäisivät pitävän paikkansa. Ilmalla poratussa

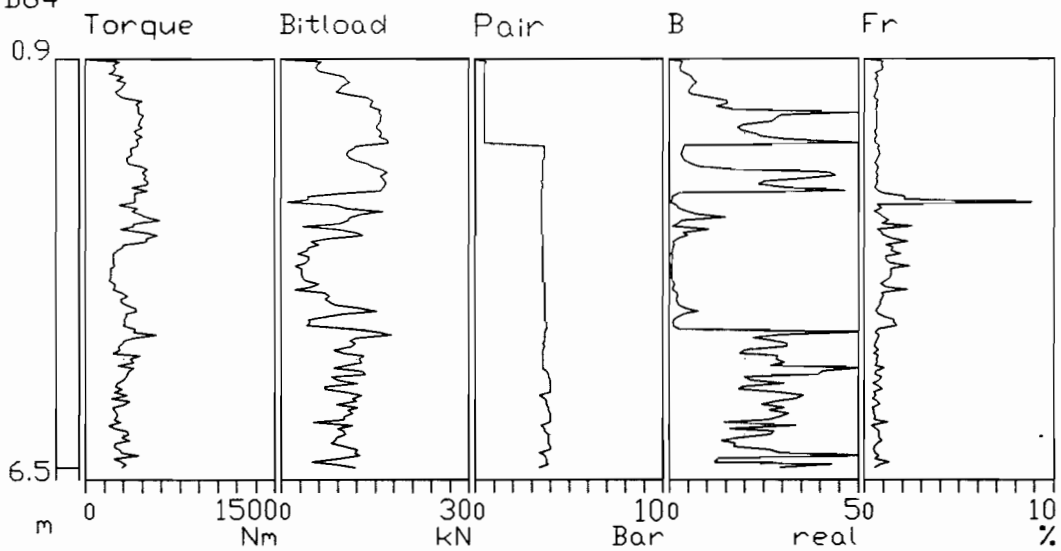
143:ssa sekä vääntömomentin että puristusvoiman vaihteluväli on suurempi, jolloin mahdollisuudet parempien ja maaperän ominaisuuksia paremmin kuvaavien parametrien löytämiseen ovat suuremmat kuin vedellä huuhdeltaessa. Myös kalliopinnan yläpuolinen erittäin ohut moreenikerros on havaittavissa kairauksessa 143 parametrissa B, muttei kairauksesta 144. Kuitenkaan samalla paikalla tehty toinen porareikäpari 142-145 (kuva 43) ei enää tue väitteitä yhtä selkeästi. Momentit ovat lähes yhtä tasaiset, ainoastaan puristusvoima vaihtelee enemmän kuin vedellä huuhdellussa porauksessa.



Kuva 42. Huuhteluaineen vaikutus puristusvoimiin. Ilmal-
la saatiin suuremmat puristusvoima-arvot.

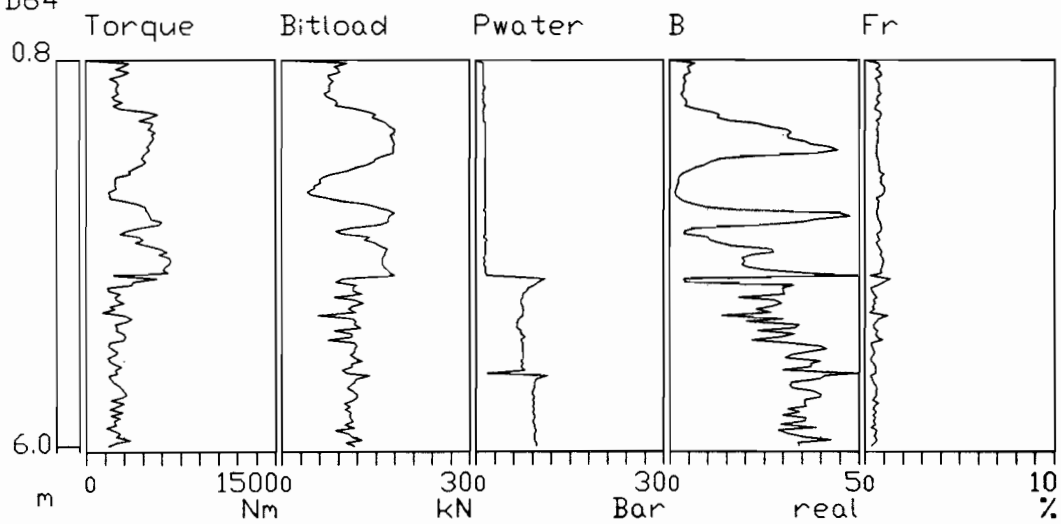
142

STD64



145

STD64



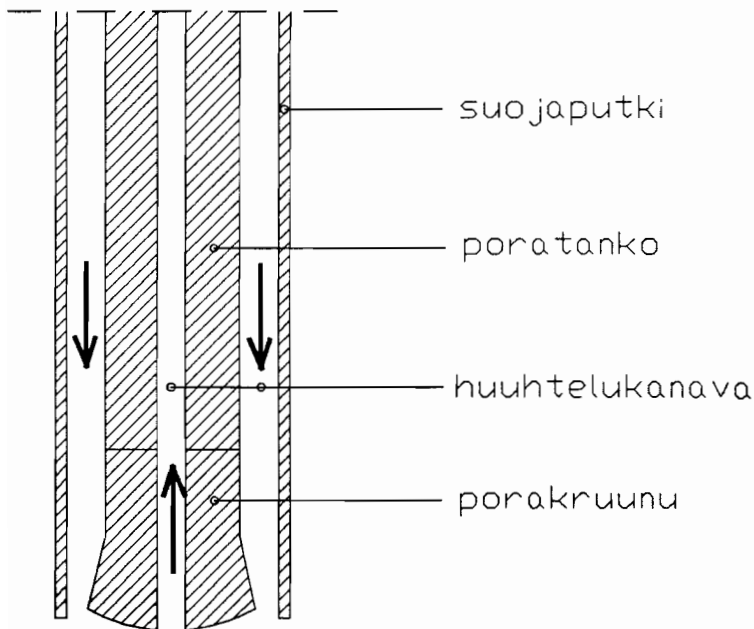
Kuva 43. Huuhteluaineen vaikutus puristusvoimiin. Ei havaittavaa vaikutusta.

5.4.3. Muita huuhteluun liittyviä huomioita

Suunnittelijaa varten huuhteluparametreista pitäisi saada enemmän informaatiota. Teoreettisesti ajatellen pitäisi olla selvää, että mm. huuhtelupaineesta voitaisiin arvioida maaperän vedenläpäisykyvyssä tapahtuvia muutoksia. Näin voitaisiin todeta esimerkiksi siltti- ja hiekkakerrosten eroja.

Käytännössä huomattavia eroja onkin saatu Göteborgissa samalla tiedonkeruujärjestelmällä (liite 6) kuin tässä työssä käytettiin. Ratkaiseva ero on kuitenkin käytettävässä porakalustossa. Tavallisen tankokaluston sijasta ko. työmaalla käytettiin TUBEX-menetelmää. Tällöin ajettaessa suojaputkikalustolla, saadaan paineenvaihtelut huomattavasti paremmin hallintaan ja paineenmuutos kuvastaa kruunun tasolla tapahtuvia paineenmuutoksia. Myös siirtyminen puristin-porakonekairauksessa ϕ 45 mm ns. geotankoihin lisäisi todennäköisesti huuhtelusta saatavan tiedon määrää, koska huuhtelukanava, jota pitkin huuhteluaine kulkeutuu maan pinnalle, pieneneisi olennaisesti. Geotankoja käytettäessä kruununa pitäisi käyttää tässäkin työssä käytettyä ϕ 57 kruunua.

Lisäkokemusta tarvitaan myös huuhtelujärjestelmien - nykyisen ja esimerkiksi ns. reverse circulation- menetelmien eroista. Ko. menetelmässä huuhtelu tapahtuu pumppaamalla huuhteluaine suojaputken ja tankojen välissä alas, jolloin huuhteluaine tulee poratankojen keskellä olevaa huuhtelukanavan kautta ylös. Näin ollen maanpinnan ja kruunun tason välissä ei periaatteessa tapahdu painehäviöitä, joita tavallisissa porauksissa tapahtuu. Näin voitaisiin saavuttaa parempia tuloksia ja sivutuotteena saataisiin hyvin edustava soijanäyte kultakin tasolta. Periaatekuva reverse circulation- menetelmästä on esitetty kuvassa 44.



Kuva 44. Periaatekuva reverse circulation- huuhtelusta.

Poraajan kannalta ilma- ja vesihuuhteluilla on ratkaisevia eroja. Vesihuuhtelun käyttö on siistimpää ja miellyttävämpää silloin, kun vettä on saatavana ja kun pak-
 kasen aiheuttamia haittoja ei ole. Ilmaa taas on usein
 kätevämmän työmaalle saatavissa varsinkin, jos kompres-
 sori on asennettu valmiiksi poravaunuun, samalle alus-
 talle. Haittapuolina ilmahuuhtelussa on pöly ja melu,
 jotka vaikeuttavat työtä. Ilman käyttö vaatii myös lait-
 teiston ja kairaushenkilöstön suojaamista. Lisäksi huuh-
 teluaineen valintaan vaikuttaa porattavan reiän syvyys.
 Jos poraussyvyys ylittää 10 m, käytetään yleensä vesi-
 huuhtelua.

5.5. Vertailu muihin menetelmiin

Verrattaessa puristin-porakonekairausta tavanomaisiin kairausmenetelmiin on havaittavissa useita etuja. Puristusvaiheessa saadaan sama, jopa parempi, tieto maaperästä kuin esimerkiksi paino- ja heijarikairauksessa. Porausvaiheenaikainen tiedonkeruu mahdollistaa mm. kerrosinformaation kovemmista kerroksista.

Perinteiseen porakonekairaukseen ero on selvä. Porausvaiheen aikaisella tietojenkeruulla saadaan todellinen raportti tiiviistä kerroksista, kivistä tai lohkarista ja kallion pinnasta. Tämän jälkeen voidaan poraparametrien kehityttyä lopullisempaan muotoonsa saada maaperästä sellaista kerrosinformaatiota, jota tavallisella porakonekairauksella ei ole mahdollista havaita. Kallion pinnan saavuttamisen jälkeen, ainakin putkikalustolla, saataneen lisäksi arvioitua kallion rikkonaisuutta ja halkeilua. Jo tässäkin työssä tavallista tankokalustoa käytettäessä löydettiin yhdessä pisteessä (kuva 39) kalliosta selvä rako.

Toinen perinteinen menetelmä, johon puristin-porakonekairauksen porausvaihetta kannattaa verrata, on heijarikairaus. Tässä yhteydessä viitataan myös puristin-heijarikairauksen heijarointivaiheeseen. Heijarikairalla saadaan määritettyä esimerkiksi paalujen katkaisupituudet. Tässä työssä ko. vertailua ei pystytty vähäisen vertailuaineiston vuoksi tekemään. Oletettavaa on kuitenkin, että mm. paalupituuksien määrittäminen on mahdollista, kunhan tuloksia saadaan riittävästi tilastollista analyysia varten. Koska paalupituuksien määrittäminen on mahdollista jo puristin-heijarikairauksella, on lisäetujen saaminen kuitenkin puristin-porakonekairauksella tärkeää. Suurin etu on tiiviiden kerrosten läpäisykyky. Lisäksi jo nyt saadaan selville esimerkiksi moreenin kivisyys ja kun rekisteröintiä täydennetään iskun rekisteröinnin osalta, saadaan vielä alustavia arvioita moreenin tiukkuudesta.

Tutkittaessa tarkemmin kaluston ja varsinaisen porausmenetelmän vaikutusta saatavaan informaatioon päädytään todennäköisesti tulokseen, että oikealla kaluston valinnalla voidaan porauksen aikaisten tulosten tasoa parantaa vielä huomattavasti.

6. VIRHELÄHTEET

6.1. Laitteistosta aiheutuvat virheet

Laitteistosta voidaan katsoa aiheutuvan tuloksissa esiintyviä systemaattisia virheitä. Tärkeimmät mitattavat suureet tässä menetelmässä ovat syvyys, puristusvoima ja vääntömomentti. Syvyyden avulla tulokset kohdistetaan maakerrokseen ja mitatuista suureista päätellään suunnitteluparametreja. Tässä kappaleessa tarkastellaan näihin mitattuihin suureisiin vaikuttavia seikkoja, jotka saattavat vaikuttaa lopputuloksiin.

Syvyysrekisteröinti tapahtuu pulssilaskurilla. Yksi syvyyspulssipari annetaan joka senttimetri. Tästä aiheutuu epätarkkuutta, mutta koska sen suuruus voi olla huonoimmassakin tapauksessa vain senttimetri tangonvaihtoa kohti, se oletetaan merkityksettömäksi. Pulsseja välittävää reikälevyä pyöritetään jousikiinnitteisen ketjun välityksellä. Myös tästä aiheutuva virhe on käytännössä merkityksetön, koska jousen venyminen saattaa aiheuttaa vain tietyn syvyydason lyhytaikaisen siirtymisen. Todellisen ja rekisteröidyn syvyyden eroja seurattiin porausten aikana ja suurimmillaankin ero oli vain 1 %. Huomattavaa on kuitenkin se, että rekisteröintilaitteen käyttöön kiinnitettiin erityistä huomiota, jolloin virhe saatiin näin pieneksi ja virheen voidaan katsoa pääosin johtuvan laitteistosta.

Puristusvoima mitattiin erotuspaineena hydraulikasta. Ratkaisevana erona Melanderin työssään /12/ esittämään mittaukseen oli se, että puristusnopeuden muutosten vaikutus mitattavaan puristusvoimaan onnistuttiin pois-

tamaan uudemman tyyppisellä vahvistimella lähes täysin. Tällöin ei puristusnopeuden muutos vaikuta rekisteröityihin suureisiin. Kelkan ja syöttölaitteen välisten kitkojen vaikutus pyrittiin eliminoimaan nollaamalla puristusvoima tyhjää kelkkaa alas ajamalla. Johtuen syöttölaitteen työstöstä ja työn aikana syöttölaitteessa olevaan vaseliiniin tarttuvasta pölystä, ei puristusvoimaa voi nollata tarkasti nolnaan. Nollaa liu'utettiin ylös n. 50 kg, jolloin tehdyllä virheellä on prosentuaalisesti suuri vaikutus pienillä kärkivastuksilla, mutta pieni vaikutus suurimmilla kuormilla puristettaessa. Kalibrointi suoritettiin 400 kg, 1000 kg ja 1500 kg voimilla. Tarkistusmittauksissa, jotka tehtiin kairausten välillä, jouduttiin suurimmillaan korjaamaan 1500 kg rekisteröidyssä voimassa ollut noin 200 kg virhe. Lämpötilan vaikutuksia ei tutkittu, koska koeporausten aikana ulkolämpötila vaihteli välillä $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elektromoniikka on valittu lämpötilavaihtelut sietäväksi, joten lämpötila vaikuttaa lähinnä hydraulikkaan ja sieltä mitattaviin suureisiin. Lämpötilan vaikutusta kompensoitiin suurimmilla pakkasilla lämmittämällä hydraulikkaöljyä kierrättämällä sitä viitisen minuuttia ennen töiden aloittamista.

Vääntömomentti mitattiin hydraulikkasta, vääntömoottorin painepuolelta. Koska käytössä oli vain yksi anturi eikä paluupaineiden muutoksia huomioitu millään keinoin, on selvää, että vääntömomentissa on virhettä. Rekisteröidyt momentit kalibroitiin valmistajien ilmoittamilla arvoilla ja hyötysuhteilla. Johtuen rekisteröintitekniikasta ja paluupaineiden merkityksen sivuuttamisesta voidaan arvioida vääntömomentin virheen olevan $\pm 15\%$ luokkaa. Esitetty virhe saattaa tapahtua absoluuttisesta arvosta. Toisaalta absoluuttisella arvolla ei ole suurta merkitystä, koska tulkinnessa tarkastellaan suhteellisia muutoksia ja suhteellisissa arvoissa esiintyvä virhe voidaan arvioida hyvin pieneksi.

6.2. Käyttäjistä aiheutuvat virheet

Suurin ja potentiaalisin virhelähde on kairaaaja. Kairaaaja voi virheillään aiheuttaa joko rekisteröityvään tietoon ylimääräistä virhetietoa tai vastaavasti oikean tiedon poisjäämistä. Ongelmallisiksi kairaaajan tekemät virheet tekee juuri se, että ne ovat satunnaisia, eikä niitä näin voi ottaa huomioon.

Syvyysrekisteröinti on käyttäjän virheille kaikkein alttein. Aloittamalla rekisteröinnin epätarkasti esimerkiksi tankojen vaihdon jälkeen voi käyttäjä aiheuttaa suurenkin poikkeaman todellisen ja rekisteröityneen syvyyden välillä. Koulutus ja työntekijöiden motivointi on ainoa keino tämän virheen pienentämiseen.

Mitattaviin suureisiin ei käyttäjällä ole mahdollisuutta puuttua kuin kalibrointivaiheessa. Koska nolla-asetukset on tarkastettava säännöllisesti, josta käyttäjä päättää mahdolliset säätötoiminpiteet, on selvää, että käyttäjä on avainasemassa nolla-asetusten oikeellisuuden suhteen. Virheellisistä nolla-asetuksista aiheutuva vahinko on pienimpien vastusten rekisteröitymättä jääminen tai koko ko. suureen liukuminen asteikossa ylöspäin. Jos nolla on asetettu miinuksen puolelle eli alle nollaan, saattaa pehmeistä kerroksista saatava informaatio rekisteröityä nollaksi.

Kehitettävän ja kehittyvän puristin-porakonekairauksen toteutuksen onnistuminen on käyttäjän tärkein tehtävä. Siirtymiset iskevään poraukseen, iskun käyttäminen, pyörityksen käyttäminen jne. ovat asioita, jotka käyttäjän täytyy sopia suunnittelijan kanssa ja toteuttaa sovitulla tavalla, kuten menetelmä edellyttää. Jättämällä esimerkiksi pyöritys pois huuhteluporauksen aikana saadaan aivan toisenlaiset puristusvoiman arvot kuin pyöritystä käytettäessä.

7. KEHITYSTARPEET

7.1. Menetelmän kehitystarpeet

Yhtenä tämän työn alkuperäisistä tarkoituksista oli syventyä varsinaisiin poraparametreihin. Tutkimuksen aikaisten muutosten ja viivästysten vuoksi tähän ei kuitenkaan ollut mahdollisuuksia kuin erittäin pintapuolisesti. Tutkimuksesta saatujen tulosten ja kokemusten perusteella lisätutkimuksiin on järkevää ryhtyä, mutta jo nyt menetelmää on mahdollista hyödyntää lähes tutkimuksen alkaessa ajatellulla tavalla.

Itse menetelmää on vaikea kehittää edelleen ilman laajamittaista kokemusta ja lisätutkimusta. Peruslähtökohdat on tämän työn yhteydessä selvitetty, mutta varsinaisesti seuraava vaihe kohti yleisesti käytössä olevaa menetelmää, on menetelmän käyttöönotto jossain määrin muiden kairausten tukena. Näin voidaankin haluttaessa helposti tehdä, koska useissa kohteissa kalliopintojen varmistukset on joka tapauksessa tehtävä. Puristin-heijarikairauksen tapaan puristin-porakonekairauskin vaatii edelläkävijöitä ja eteenpäinviejiä käyttäjien keskuudessa.

Lisätutkimuksia pitäisi tehdä erityisesti porausvaiheen aikaisista seikoista: Mm. huuhtelupaineen ja -määrän välisen yhteyden ja vedenläpäisevyyden selvittäminen, moreenien ominaisuuksien määrittäminen ja parametrien käyttäytyminen kallioporauksen aikana. Lisätutkimuksissa olisi hyödyllistä vertailla myös eri porauskalustoja ja -menetelmiä, koska niilläkin on merkitystä tulosten laatuun ja määrään.

7.2. Laitteiston kehitystarpeet

Laitteiston kehityksessä tulee keskittyä hydrauliiikkaan. Puristusnopeuden vakiointi tuntuu olevan erittäin vaikea tehtävä ja kun vielä otetaan huomioon jo käytössä olevien porakoneiden erilaisuus, on ongelmakenttä varmasti suuri.

Rekisteröintilaitteet soveltuvat hyvin maaperätutkimuksen tarpeisiin ja kun lisäksi rajoituksia mitattavien suureiden valinnassa ei ole, voidaan itse rekisteröinnin katsoa olevan tarkoituksenmukainen.

Puristusvoima on samaa suuruusluokkaa kuin puristin-heijarikairauksessakin. Puristin-porakonekairaus on kuitenkin raskaampi menetelmä. Jos myöhemmissä vaiheissa todetaan 15 kN puristusvoima riittämättömäksi, on ankkurointitekniikkaa kehitettävä siten, että ankkurointi sujuu joustavasti, eikä aiheuta suurta lisäystä työmäärään. Tässä tutkimuksessa puristusvoiman 15 kN raja muodostui käytetyn kaluston muodostamasta vastapainosta. Samansuuruiseen vastapainoon päästään yleisesti jo käytössä olevalla porauskalustolla. Luonnollinen ratkaisu puristusvoiman lisäystä rajoittavaan vastapaino-ongelmaan on nykyistä raskaammat poravaunut.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Puristin-porakonekairauksen kehitystyössä selvitettiin perusasioita, jotka vaikuttavat menetelmän käyttökelpoisuuteen ja sen käyttöönottomahdollisuuteen.

Tutkimuksen perusteella kalustolle on järkevää asettaa seuraavat minimivaatimukset:

- puristuskapasiteetti 50 kN ankkuroituna, 15 kN ilman ankkurointia
- vääntömomentti 500 Nm
- mahdollisuus käyttää vähintään ϕ 45 mm kalustoa

Itse kairaus aloitetaan puristamalla tankoja ja kruunua. Tämän mahdollistaa tässä työssä kehitetty kertakäyttöinen kärkisuojaus, joka suojaa kruunun huuhteluaukot puristusvaiheen ajaksi. Kärkimateriaaliksi valittiin polyeetteripohjainen polyuretaanielastomeeri, joka on tarkemmin esitelty kappaleessa 2.2.3.. Menetelmän yleistymisen kannalta on tärkeää, että kehitettyä suojusta on mahdollista käyttää monessa eri kruunussa. Vaatimus täyttyykin, kunhan kruunu on ns. risti-pala-kruunu. Puristusta jatketaan, kunnes kairaus ei enää etene pelkästään puristamalla ja pyörittämällä. Tämän jälkeen rikotaan kärkisuojaus porakoneella iskemällä ja aloitetaan huuhtelu. Kairausta jatketaan huuhtelua ja iskua käyttämällä tavallisena porauksena rekisteröintilaitteita käyttäen, kunnes haluttu syvyys on saavutettu. Menetelmän kehittelyn yhteydessä havaittiin myös mahdollisuus hyödyntää kärkisuojusta tavallisen porakonekairauksen yhteydessä.

Tulosten tulkinta jakautuu kahteen vaiheeseen. Puristusosuus, jolloin käytetään suojakappaletta, tulkitaan CPT-kairauksenomaisesti. Kuitenkin sillä erotuksella, että käytettäessä samoja tulkintadiagrammeja, on harkittava puristin-porakonekairauksen kärkivastusten kertomista kahdella. Koska saatu tulos ei ole yleispätevä koskien kaikkia maalajeja, on suositeltavaa tehdä paikallisia vertailuja. Vertailuja voidaan hyvin käyttää kohteen tarkempina tutkimuksina ja samalla voidaan tarkastaa kärkivastusten keskinäinen riippuvuus. Maalajitulkin tulkintaa ei suositella tehtäväksi pelkästään taulukoihin perustuen, vaan apuna tulisi käyttää myös visuaalista tulkintaa. Porausvaiheen aikainen tulkinta vaatii lisätutkimusta, jotta kerätyn tiedon hyödyntämistä voidaan tehostaa. Tämän tutkimuksen perusteella poraparametreista tulkinan apuna on ainakin B, joka havainnollistaa hyvin maaperän tiiviyseroja.

Asetetut tavoitteet saavutettiin kärjen kehityksen ja menetelmän käyttökelpoisuuden toteamisen osalta. Maakerosrajat ovat selkeästi pääteltävissä ja alustavia maa-

lajiarvioitakin voidaan tehdä suoraan kärki- ja vaippavastuksiin perustuen. Maalajit suositellaan kuitenkin ennen lisätutkimuksista saatavaa tietoa määritettäväksi näytteitten perusteella. Tämän aineiston perusteella ei ollut mahdollista tarkastella perustellusti varsinaisia suunnitteluparametreja eikä mm. paalujen tavoitetasoja ja mahdollisesti kantavuuksia, kuten alunperin suunniteltiin. Lisätutkimuksien myötä näihinkin ominaisuuksiin kannattaa perehtyä.

Puristin-porakonekairauksella pystytään tämän tutkimuksen perusteella saamaan maaperän koko profiili yhdellä kairauksella maanpinnalta kallionpintaan asti. Porausvaiheen aikainen tulkinta vaatii lisäkehitystä, mutta jo pelkästään pehmeiden kerrosten ja kalliopinnan kartoittamiseksi uuden menetelmän käyttö on mielekästä.

KIRJALLISUUSVIITTEET

ISOPT International symposium on penetration testing
ECSMFE European conference on soil mechanics and foundation engineering

/1/ Bergdahl U., Ottosson E., Soil characteristics from penetration test results: A comparison between various investigation methods in non-cohesive soils. Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

/2/ Briaud Jean-Louis, Evaluation of cone penetration test method 98 pile load tests Proc. ISOPT 1, vol 2, Orlando 1988

/3/ Broms, B., Flodin N., History of soil penetration testing Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

/4/ De Beer, E. E., Goelen, E., Heynen W.J., Joustra K., CPT:International reference test procedure Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

/5/ Durgunoglu & Mitchell, Static Penetration Resistance of Soils. I-analyses II-Evaluation of theory and implications for practice ASCE, SC-IMSP, Vol I, 1975 s.151-189

/6/ Eklund Hans, Stefan Eriksson, Utvärdering av friktionsvinkel ur CPT-resultat, Examensarbete No. 2:88, Inst. för jord- och bergmekanik Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 1988

/7/ Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E., New correlations of penetration tests for design practice Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

/8/ Kastinen J., Haastattelu 14.5.1991, Tamrock Oy

/9/ Lunne T., Eide O., Ruiter J de, Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. NGI Publication No. 116, Oslo 1977

/10/ Mahmoud M.A., Abdrabbo F.M., A practical note on the evaluation of a pile load using CPT-results Proc. ISOPT 1, vol 2, Orlando 1988

/11/ Meigh A. C., Cone Penetration Testing methods and interpretation, CIRIA 1987

/12/ Melander Kari, Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä, Helsingin kaupunki, Geotekninen osasto, tiedote 48

/13/ NGI, rapport 57600-10, Totalsondering systembeskrivelse og resultatvurdering

/14/ Olsen R.S., Malone P.G., Soil classification and siten characterization using the CPT Proc. ISOPT 1, vol 2, Orlando 1988

/15/ Pfister Paul, Recording drilling parameters, Ground Engineering, April 1985

/16/ Robertson P.K., Campanella R.G., Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand, National Research Council Canada, Canadian Geotechnical Journal, Volume 20, Number 4, Nov. 1983

/17/ Searle, I.W., The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give soil types and design parameters. Proc. ECSMFE VII, vol 2. Brighton 1979. s. 265 - 270.

/18/ SGY r.y., kairausopas V, porakonekairaus

/19/ Sharma Hari D., Static pile capacity based on penetrometer test in cohesionless soils Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

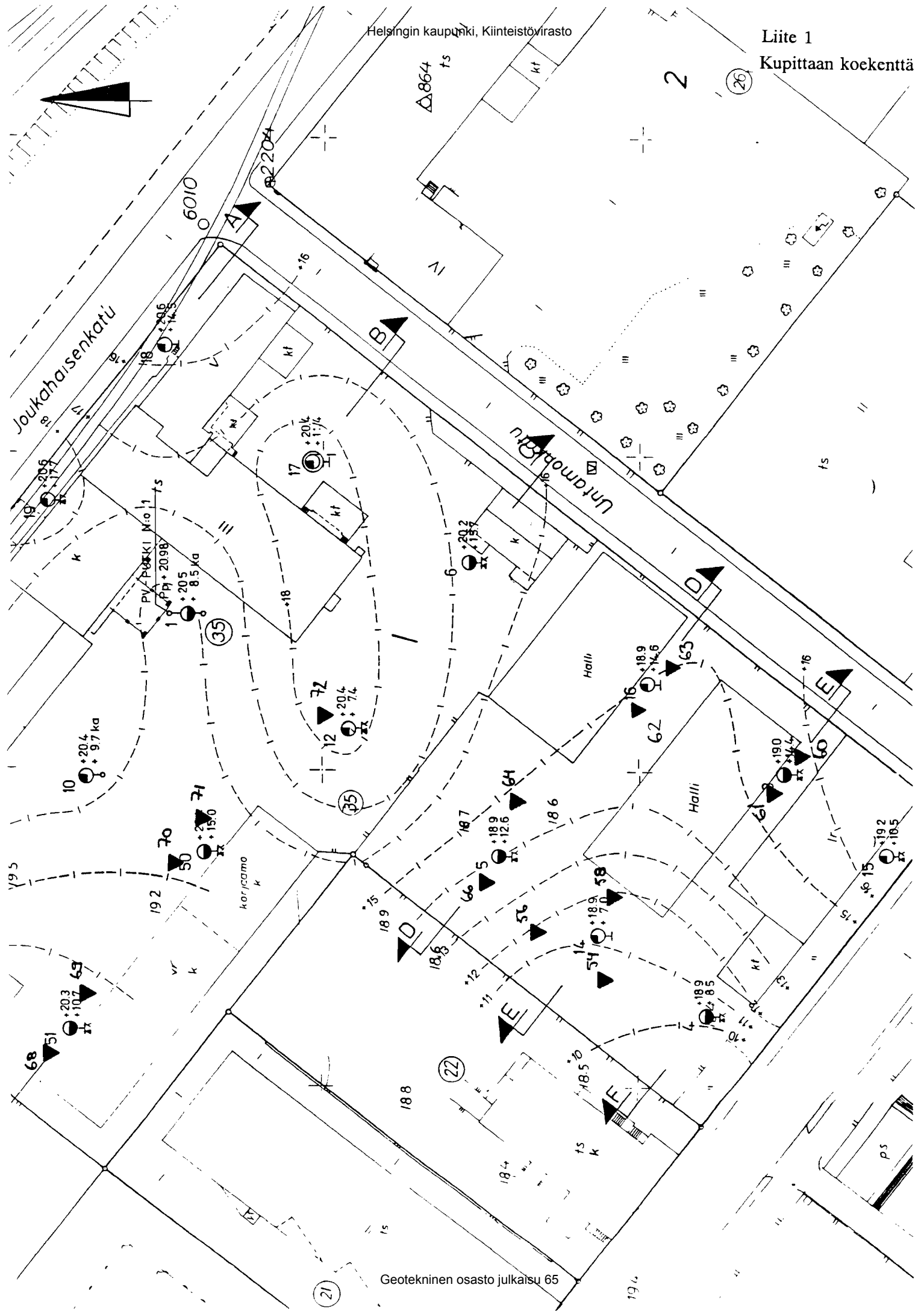
/20/ Tirkkonen O., Sovelletun heijarikairauksen käyttö maaparametrien määrittämisessä, Diplomityö TKK 1991

/21/ Yuan Xin-Jian, Penetration testing application in China Proc. ISOPT 1, vol 1, Orlando 1988

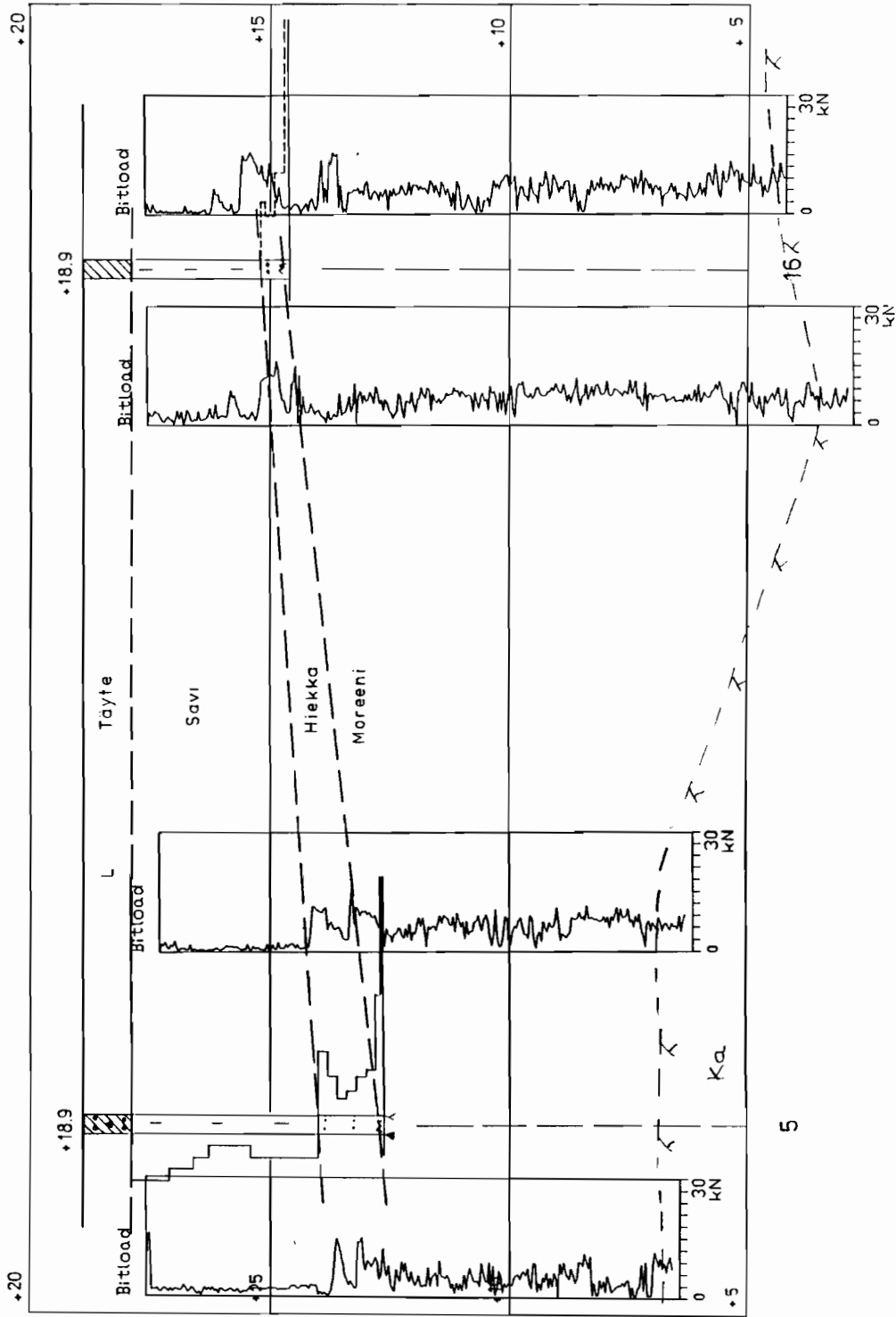
/22/ Za-Chieh Moh, Site investigation and in situ testing, Ground Engineering in Southeast Asia, 1985

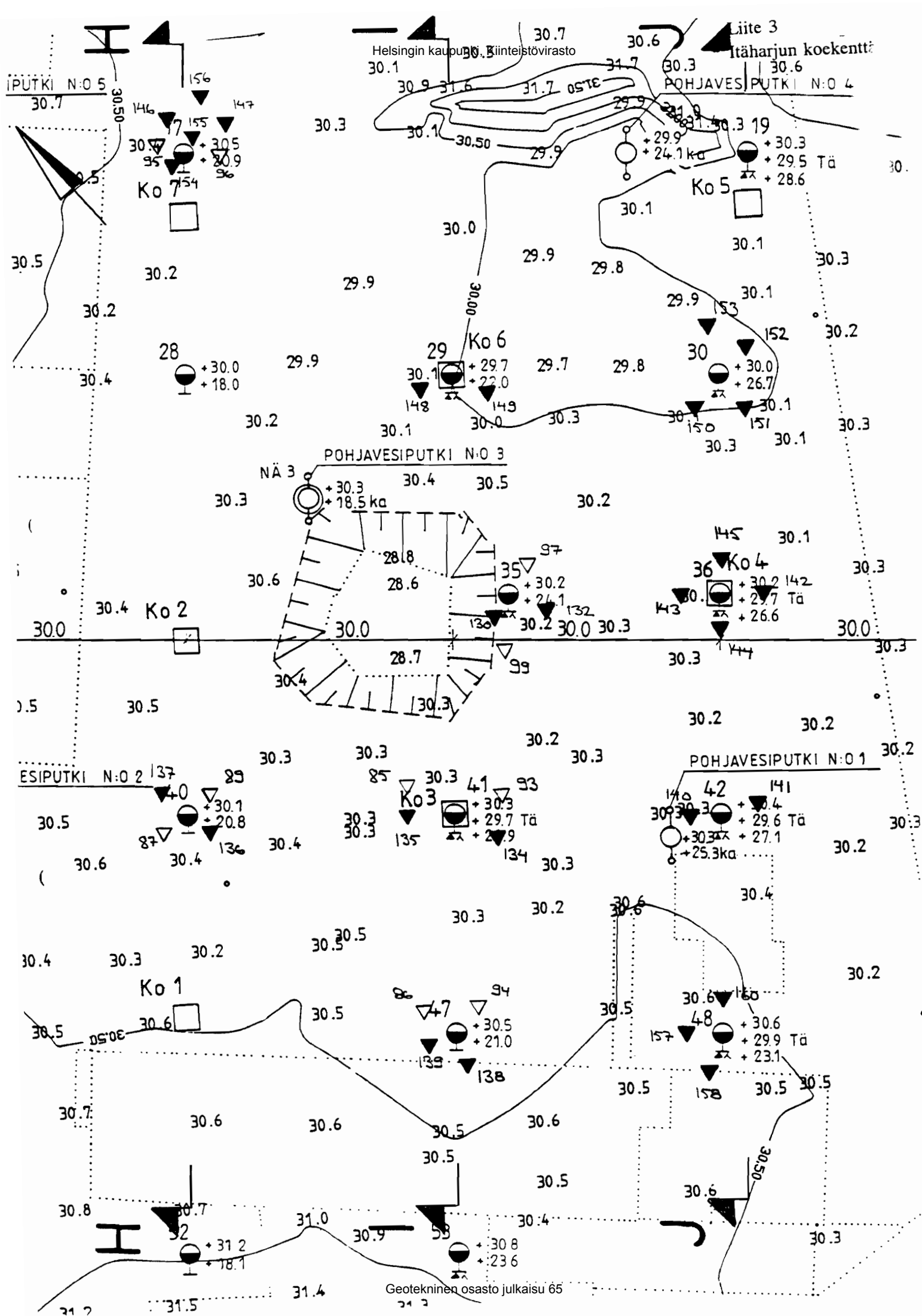
/23/ Hartikainen J., Haastattelu 6.8.1991

/24/ Halkola H., Haastattelu 18.6.1991

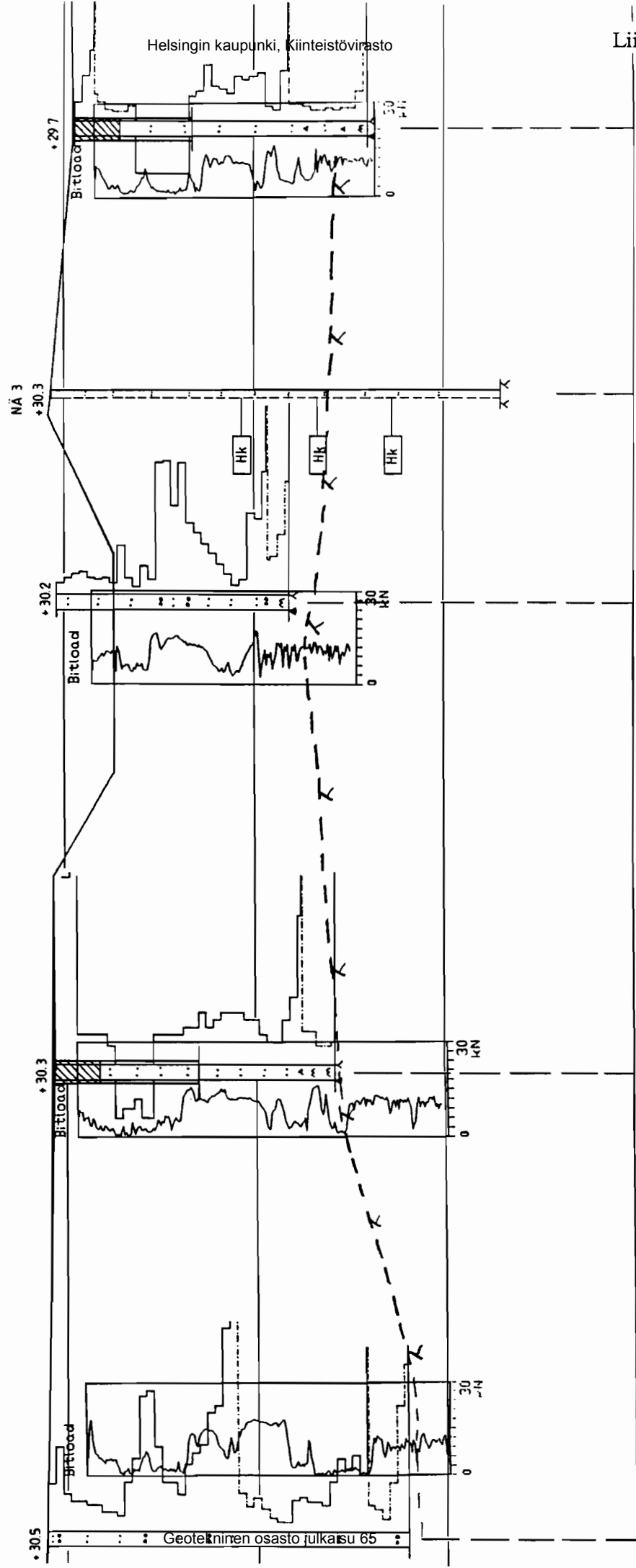


LEIKKAUS D – D





1:100



Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Liite 4

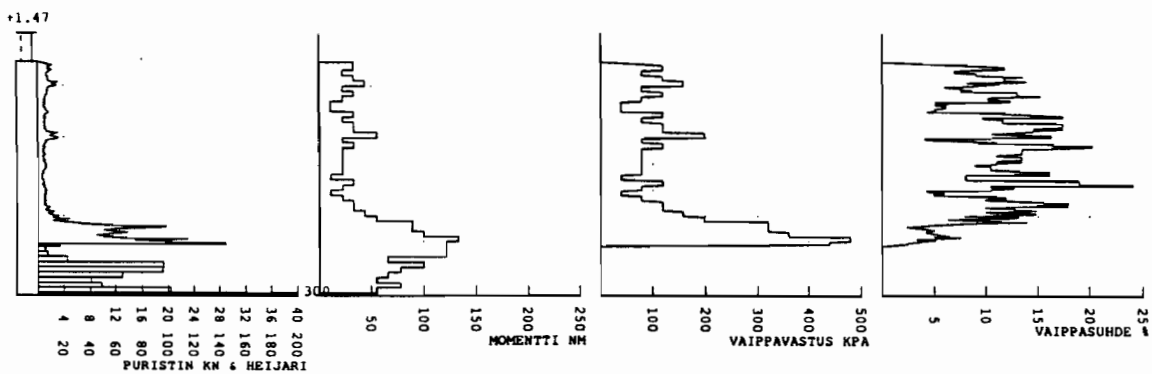
29
Ko 6

35

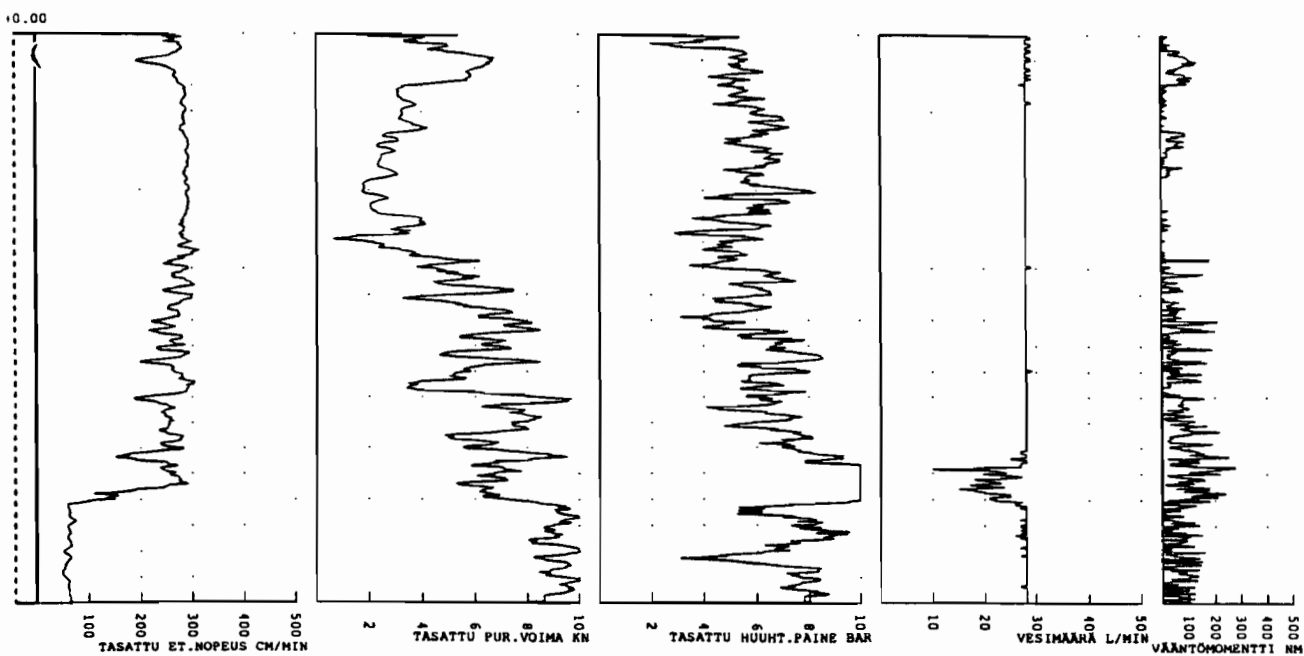
41
Ko 3

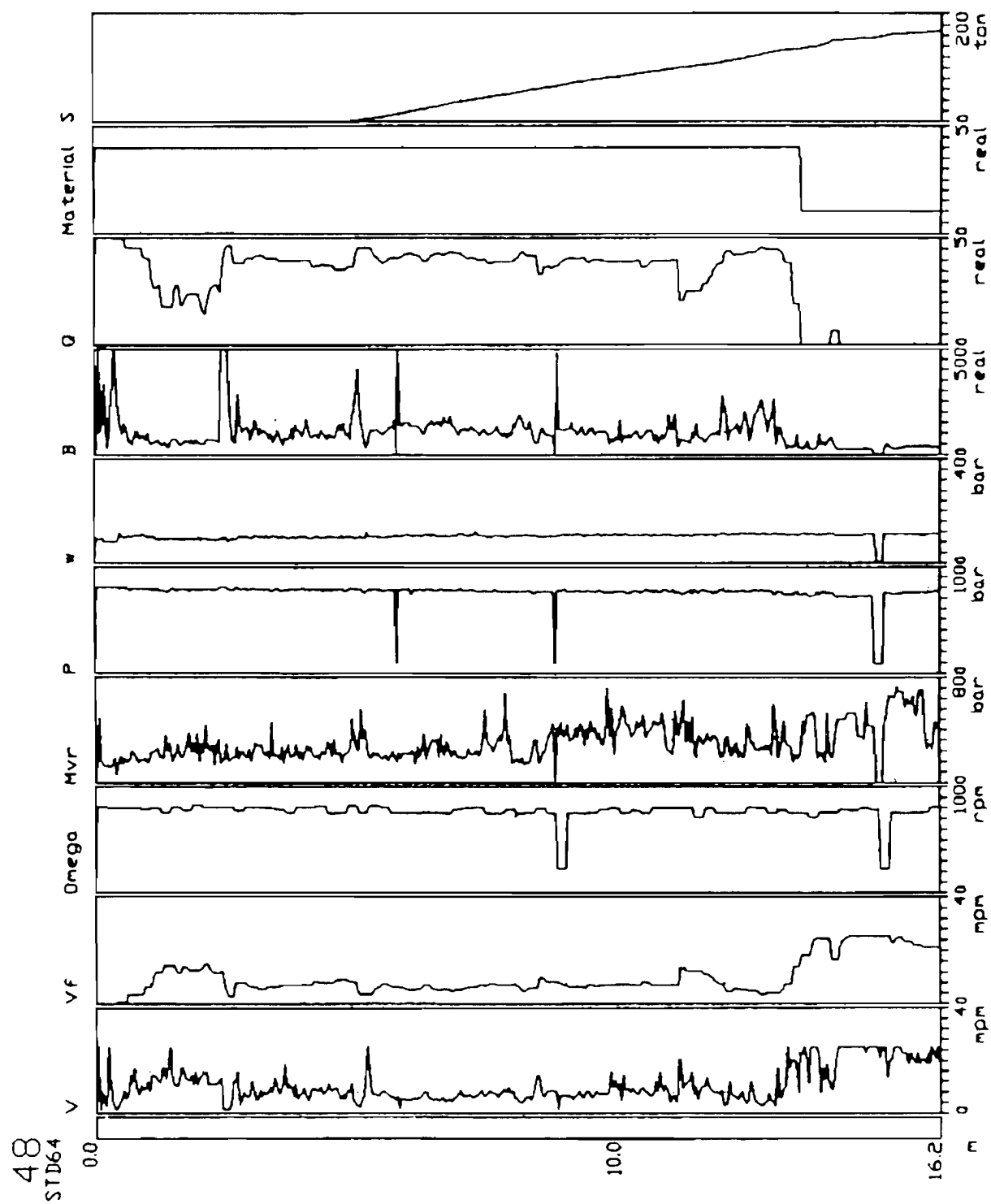
47

KOIDE	N:o 4224	Piste 197	KONE 53
HELSINGIN KAUPUNKI GEOTEKNINEN OSASTO PURISTIN - HEIJARI	PASILAN VÄYLÄ PL2975 OIK 50		
PM. 18.12.90			
SOJNM.	TARK.		
MAANPINTA KALLIOPINTA PÄÄTTYMINEN 10.09	-1.47 -8.62	MITTAKAAVA 1:200 Y 47078.3	X 22743.8



KOIDE	N:o 4224	Piste 198	KONE 53
HELSINGIN KAUPUNKI GEOTEKNINEN OSASTO PORAKONE	PASILAN VÄYLÄ PL2975 OIK 50		
PM. 19.12.90			
SOJNM.	TARK.		
MAANPINTA KALLIOPINTA PÄÄTTYMINEN 22.00	-0.00 -22.00	MITTAKAAVA 1:200 Y 0.0	X 0.0





GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

27.10.1994

1	Anttikoski, U.	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973
2	Anttikoski, U.	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973 *
3	Anttikoski, U.	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974 *
4	Mäkinen, R.	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974 *
5	Saarelma, M.	Melusojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974 *
6	Saarelma, M.	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976
7	Petäjä, J.	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977
8	Raudasmaa, P.	Metrotunneleiden injektointi	Suomi	1977 *
9	Anttikoski, U.	Kalliotunneleiden käyttö varastointiin	Suomi	1977 *
10	Tikkanen, H.	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978
11	Arkima, O.	Kluuvin ruhjeen jäädytys	Suomi	1978 *
12	Raudasmaa, P.	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979
13	Havukainen, J.	Voimalalaitostuhtaan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979
14	Vähäaho, I.	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979 *
15	Raudasmaa, P.	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980
16	Anttikoski, U.	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979 *
17	Roinisto, J.	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	Suomi	1981
18	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	Suomi	1981 *
19	Roinisto, J.	Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981
20	Vuola, P.	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981
21	Havukainen, J. & Korhonen, O.	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981
22	Havukainen, J.	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981
23	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982
24	Latvala, A.	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	Suomi	1982
25	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Sulamäki, A.	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982
26	Halkola, H.	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparimäessä	Suomi	1982 *
27	Paavola, P.	Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys	Suomi	1982
28	Vähäaho, I.	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982 *
29	Gulin, K.	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982
30	Halkola, H.	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982
31	Havukainen, J.	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983
32	Havukainen, J.	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983
33	Havukainen, J.	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983
34	Salmelainen, J.	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983
35	Havukainen, J.	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983
36	Hytti, P.	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984
37	Leinonen, J.	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	Suomi	1984
38	Pirinen, J.	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984 *
39	Latvala, A.	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984
40	Korpela, J. & Schuller, M.	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennus selvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984
41	Lahtinen, E-R.	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	Suomi	1985
42	Korpi, J.	In Situ-kuormituskoee painumien määrittämiseksi	Suomi	1985
43	Havukainen, J.	Esirakentamisen kehittäminen	Suomi	1985
44	Vähäaho, I.	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987
45	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Latvala, A.	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987
46	Julkunen, A.	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987
47	Hutri, K-L.	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988
48	Melander, K.	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989
49	Leppänen, M.	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989
50	Vähäaho, I. & Ryhänen, H.	Sulamiskondolidaation vaikutukset savessa	Suomi	1989
51	Vähäaho, I.	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989
52	Koskela, P.	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	Suomi	1989
53	Saari, M. & Korhonen, O.	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990
54	Saari, M. & Volanen, N.	Ruoholahden koepaalu	Suomi	1990
55	Yrjänä, J. & Korhonen, O.	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991
56	Niinimäki, R. & Raudasmaa, P.	Viikimäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliitutkimukset	Suomi	1992

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET JATKUU

27.10.1994

57 Nieminen, J. & Johansson, E. & Holopainen, P	Viikkinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	Suomi	1992
58 Ahola, J. & Viitala, R.	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	Suomi	1992
59 Ravea, T. & Korhonen, O.	Helsingin tulvapaidon rakentamisen edellytykset	Suomi	1992
60 Taipale, H. & Korhonen, O.	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	Suomi	1992
61 Karlstedt, P. & Halkola, H.	Ylijäämäsavien massastabilointi	Suomi	1993
62 Leiskallio, A. & Lehtonen, J.	Maankäytön geotekninen suunnittelu	Suomi	1993
63 Anttikoski, U & Kumar, S. & Saarelainen, S.	Kalliokaivanto jätehuollossa Esiraportti	Suomi	1993
64 Rekonen, Rita & Halkola, Hannu	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	Suomi	1994
65 Ulmala, Ola & Halkola, Hannu	Puristinporakonekairaus	Suomi	1994

*) painos loppuunmyyty

Hinnat: 1 kpl, 80 mk, 2-3 kpl 70 mk, 4-6 kpl 60 mk, 7- kpl 55 mk **

**) arvonlisävero 12 %