



CPTU-kairaus ja sen tulkinta

Eero Juuti

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

JUUTI, EERO
CPTU-kairaus ja sen tulkinta

Opinnäytetyö 75 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Huhtikuu 2014

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kirjallisuuden avulla, mitä maaperän ominaisuuksia CPTU-kairauksella voidaan määrittää ja milloin sitä kannattaa käyttää. Lisäksi oli tarkoitus tutkia CPTU-kairauksen hyötyjä puristin-heijari- ja painokairaukseen verrattuna ja pohtia, saatiinko CPTU-kairauksella esimerkkikohteessa selville jotain sellaista, mitä muilla menetelmillä ei saatu. Tavoitteena oli myös selvittää paineellisen pohjaveden vaikutus kairaustuloksiin.

Tavoitteisiin pyrittiin käyttämällä tutkimusmenetelminä kirjallisuuskatsausta ja esimerkkikohteen pohjatutkimustulosten analysointia. Esimerkkikohteeksi oli Kurikassa Kyronjoen ylittävä valtatie 3 silta. Kohteessa tehtiin pohjatutkimukset uutta siltaa varten.

Työn tuloksena saatiin kirjallisuuskatsaus, jossa esitellään paino- ja puristin-heijarikairaus sekä paneudutaan CPTU-kairaukseen ja sen tulkintaan. Tuloksena syntyi esimerkkikohteen maalajirajojen ja maakerrosten määrittäminen CPTU-kairaustuloksista. Esimerkkikohteen kairaustulosten avulla määritettiin myös maaperäparametreja kirjallisuuskatsaukseen koottuja kaavoja käyttämällä.

Tässä työssä tarkasteltiin myös esimerkkikohteesta määritettyjen maalajirajojen ja parametrien luotettavuutta. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että CPTU-kairauksen päättötarkoitus on maalajirajojen ja maakerrosten maalajien määrittäminen. Esimerkkikohteessa huomattiin, että menetelmä on maalajirajoja määrittäessä tarkempi kuin kohteessa käytetyt muut menetelmät. Lisäksi menetelmällä voidaan arvioida monia maaperäparametreja, mutta niiden luotettavuus vaihtelee suuresti maaperäominaisuuksien mukaan. CPTU-kairauksen avulla määritettyjä parametreja ei koskaan tule käyttää yksin geoteknisen suunnittelun lähtöarvoina.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

JUUTI, EERO
Piezocone testing and its interpretation

Bachelor's thesis 75 pages, appendices 11 pages
April 2014

The first target of this thesis was to find out, by using literature study, what can be done with piezocone (CPTU) and when using it is the best option. The second target was to compare CPTU with weight sounding and a technique which is combination of cone penetration test and ram drilling. The aim of this comparison was to discover whether using CPTU gave more information about the ground than other sounding methods. The third target was to find out how artesian water influences the CPTU results.

The targets were achieved by using literature study and an example site in Kurikka. There will be a new bridge on highway 3 in Kurikka across Kyrönjoki and in this thesis that project's soundings were analyzed.

As a result of this study arose a literature survey where weight sounding and a combination of cone penetration test and ram drilling were briefly explained and CPTU was covered more precisely. From the example site, soil layer and soil type determinations were performed and some geotechnical parameters were also calculated using formulas that were discovered in the literature study.

In this thesis, it was reflected on how trustworthy the soil type and soil layer determinations and calculated parameters are. As a conclusion, it can be said that CPTU is at its best when used in determining soil layers and soil types. It can also be used in calculating geotechnical parameters but those values cannot be used as source information for geotechnical design.

Key words: CPTU, soil layering, soil type determination, geotechnical parameters

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	KAIRAUSMENETELMÄT.....	8
2.1	Painokairaus.....	8
2.2	Puristin-heijarikairaus.....	12
2.3	CPTU-kairaus.....	17
2.3.1	Yleistä menetelmästä.....	17
2.3.2	Tulokset ja arvojen korjaukset.....	20
2.3.3	Tulosten tulkinta kuvaajien avulla.....	22
2.3.4	Maalajimääritys.....	26
2.3.5	Geotekniset parametrit.....	30
2.3.6	Virhelähteet.....	39
2.4	Menetelmien vertailu.....	40
3	CASE VT 3, KYRÖNJOEN SILTA.....	43
3.1	Yleistä kohteesta.....	43
3.2	Tulokset.....	44
3.2.1	Maalajirajat ja parametrit.....	44
3.2.2	CPTU-HP-PA -vertailu.....	55
3.2.3	Mitä jäi puuttumaan pohjatutkimuksista.....	56
4	MILLOIN CPTU-KAIRAUSTA KANNATTAA KÄYTTÄÄ.....	57
5	POHDINTA.....	58
6	YHTEENVETO.....	63
	LÄHTEET.....	64
	LIITTEET.....	65
	Liite 1. Eri kairausmenetelmien työsaavutukset metriä / työvuoro.....	65
	Liite 2. CPTU-kairausdiagrammit.....	66
	Liite 3. Kokoonpuristuvuusmoduulin M laskeminen ödömetrikoetuloksista.....	72
	Liite 4. Ote kairausohjelmasta.....	74
	Liite 5. Leikkauskuva 22.....	75

LYHENTEET

A_c	kairan kärjen poikkileikkauksen pinta-ala
A_p	paalun poikkipinta-ala
a	CPTU-kärjen pinta-alakerroin, joka on kärkikohtainen
b	CPTU-kärjen pinta-alakerroin, joka on kärkikohtainen
B_q	huokospainesuhde
CPTU	puristinkairaus, jolla voidaan mitata myös huokospainetta
D_r	suhteellinen tiiviys
e	neperin luku
E_d	muodonmuutosmoduuli, ödömetrikoe
E_m	muodonmuutosmoduuli, Youngin menetelmä
f_t	korjattu vaippakitka
f_s	mitattu vaippakitka
f_{si}	maksimivaippakitka kerroksessa i
f_{smax}	maksimivaippakitka riippuen maatyypistä ja CPTU kärkivastuksesta
q_c	mitattu kärkivastus
q_{ci}	kärkivastus kerroksessa i
q_n	nettokärkivastus
q_t	korjattu kärkivastus
Q_s	paalun vaippakitka murtotilassa
Q_{si}	paalun vaippakitka kerroksessa i
Q_p	paalun kärkikantavuus
Q_{tot}	kokonaispuristusvoima
HP	puristin-heijarikairaus
K_0	lepopaine kerroin
M	kokoonpuristuvuusmoduuli
M_{tot}	kokonaisvääntömomentti
M_i	vallitsevan tilan kokoonpuristuvuusmoduuli
m_i	empiirinen kerroin
N_n	nettolyöntiluku
N_{20}	kokonaislyöntiluku
N_{kt}	kerroin, joka on yleensä väliltä 10-20
$N_{\Delta u}$	kerroin, joka on yleensä väliltä 10-20
OCR	yliekonsolidaatioaste

PA	painokairaus
R_f	kitkasuhde
s_i	paalun ympärysmitta
s_u	suljettu leikkauslujuus
u	mitattu huokosvedenpaine
Δu	kärjen aiheuttama huokospainelisäys
u_0	maassa vallitseva huokospaine
w_L	juoksuraja
α	kairauksen inkliinaatio
α_1	maatyyppistä ja CPTU kärkivastuksesta riippuva korjauskerroin
Δl_i	paalun pituus kerroksessa i
σ_c	konsolidaatiojännitys
σ_{v0}	maassa vallitseva pystyjännitys
σ'_{v0}	maassa vallitseva tehokas pystyjännitys
φ	leikkauskestävyyskulma (kitkakulma)

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään FINNMAP Infra Oy:lle. Työn taustalla on tietoisuus siitä, että CPTU-kairaus on Suomessa vähemmän käytetty menetelmä, jonka potentiaali tiedetään, mutta vielä sitä ei osata täysin hyödyntää. Oikeissa paikoissa käytettynä menetelmällä voidaan saada enemmän informaatiota maaperästä kuin muilla yksittäisillä kairausmenetelmillä.

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää CPTU-kairauksen tulkintaa ja siten myös sen ohjelmointia. Lisäksi työssä tutkitaan CPTU-kairauksen hyötyjä verrattuna puristin-heijarikairaukseen ja painokairaukseen. Näillä vertailuilla selvitetään, tuoko CPTU-kairauksen käyttö merkittävää lisähyötyä työssä käytettävässä esimerkkikohteessa. Esimerkkikohteessa tutkitaan myös paineellisen pohjaveden vaikutusta kairaustuloksiin. Lopuksi esitetään, milloin CPTU-kairausta kannattaa käyttää.

Työn tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta ja esimerkkikohteen tulosten analysointia. Kirjallisuuskatsauksella selvitetään ja kootaan jo olemassa olevaa tietoa sekä vertaillaan menetelmiä löydetyn tiedon perusteella. Työssä käytettävä esimerkkikohte on Kurikassa vt 3:lla sijaitseva Kyrönjoen yli rakennettava uusi silta. Kohteessa tehtiin pohjatutkimukset, jotka alkoivat marraskuussa 2013 ja loppuivat helmimaaliskuussa 2014. Esimerkkikohteesta tehdään maalajitulkinnat kairaus- ja näytetulosten perusteella, sekä verrataan CPTU-kairauksen tuloksia muihin menetelmiin ja pohditaan, saatiinko sillä selville jotain sellaista, mitä ei muilla menetelmillä saatu.

Työ rajataan siten, että vertailuissa käytetään vain puristin-heijarikairausta ja painokairausta maanäytteiden ja siipikairausten lisäksi. Lähdeaineistona käytetään Suomen geoteknillisen yhdistyksen (SGY) kairausoppaita, Statens geotekniska institutin (SGI) oppaita, Liikenneviraston oppaita ja ohjeita, sekä pohjatutkimuksia koskevia standardeja.

2 KAIRAUSMENETELMÄT

2.1 Painokairaus

Painokairaus on Suomessa ja muissa Pohjoismaissa erittäin yleinen pohjatutkimusmenetelmä. Se on perusvarma yleiskairaus, jota voidaan käyttää pehmeiköiltä lähtien aina keskittiiviisiin moreeneihin asti. (Jääskeläinen 2011, 246.) Painokairauksella voidaan selvittää maaperän kerrosrajat ja arvioida maakerrosten rakennetta kairausvastuksen ja muiden kairauksen aikaisten havaintojen perusteella (SGY 1980, 4).

Kairaukset tehdään nykyään pääsääntöisesti monitoimikairoilla, mutta peruseriaate on säilynyt samana kuin käsin kairattaessa. Seuraavassa on kuvattuna käsin suoritettavan kairauksen työvaiheet esimerkinomaisesti. (SGY 1980, 4.)

Kairaus alkaa alkukairauksella, jonka tarkoituksena on poistaa pintamaan, juurakon, täytemaan tai routakerroksen kairatankoihin aiheuttama varsikitka. Alkukairaus tehdään häiriötä aiheuttavan kerroksen alapintaan asti ja kairauksen päättymistaso merkitään kairauspöytäkirjaan ja leikkauspiirustuksiin. (SGY 1980, 4.)

Alkukairauksen jälkeen aloitetaan varsinainen painokairaus kokeilemalla painuuko kairan kärki maahan 1 kN:n kuormalla. Jos painuma on nopeampaa kuin 50 mm/s, tulee painoja ottaa pois niin paljon, että painumanopeus pienenee, muttei kuitenkaan alita nopeutta 20 mm/s. Ideana on antaa painuman tapahtua mahdollisimman pienillä painoilla. Kuormitussarjaksi suositellaan 0,05; 0,15; 0,25; 0,50; 0,75 ja 1,00 kN. Aina 20 cm:n painumaa kohden merkitään pöytäkirjaan paino, jolla painuma tapahtui. (Jääskeläinen 2011, 247.)

Painumanopeuden ollessa 1 kN:n painolla alle 5 mm/s aletaan kairaa kiertää ja aina 20 cm:n painuman jälkeen merkitään pöytäkirjaan montako puolikierrrosta kairaa on kierretty. Jos kaira alkaa painua jälleen ilman kiertämistä, painot poistetaan ja haetaan pienin paino, jolla painumaa tapahtuu. (Jääskeläinen 2011, 247.)

Siinä vaiheessa, kun 20 cm painumaan tarvitaan yli 100 puolikierrrosta, voidaan kiertäminen lopettaa ja kairaa lyödään siihen valmistetulla nuijalla, kunnes painumaa ei enää

tapahdu lainkaan (Jääskeläinen 2011, 247). Käytettäessä monitoimikairausvaunua painokairauksessa voidaan lyömisen sijaan haluttaessa painaa kairaa yli 1 kN kuormituksella (SGY 1980, 6).

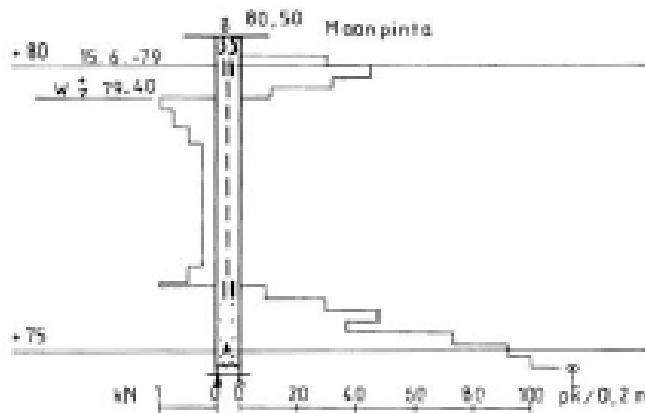
Kairauksen päättymisen syy on aina merkittävä pöytäkirjaan. Syitä voivat olla kairauksen lopettaminen määräsyyvyyteen, kairauksen päättyminen tiiviiseen maakerrokseen, kairauksen päättyminen kiveen tai lohkarreeseen, kairauksen päättyminen kiveen, lohkarreeseen tai kallioon. Yksittäinen kairaus tulisi aina suorittaa yhtäjaksoisesti, sillä tauon aikana etenkin savisissa ja silttisissä maissa kaira voi jumittua ja siten vääristää tuloksia. (SGY 1980, 6.)

Painokairausdiagrammi saadaan tehtyä kairauspöytäkirjan avulla. Esimerkki pöytäkirjasta on esitetty kuvassa 1. Monitoimikairoissa koneet itse rekisteröivät suoraan mittaus-tapahtumat ja tulokset saadaan siirrettyä tietokoneelle tulkintaa varten. (Jääskeläinen 2011, 248-249.)

SIVII <u>1</u>		OY KAIRAUSLIIKE AB		KAIRAAJA <u>VL</u>	
PVM <u>15.6.79</u>		PL/PISTE <u>5</u>		VAS <u>01K</u>	
TILAAJA/TYÖKOHDE <u>Puhkeskus Lahti</u> X <u>Y</u>					
TYÖ NO <u>4911</u>		MAAN/VEDENPINNAN KORKEUS <u>+80.50/-79.40</u>			
<input checked="" type="checkbox"/> PAINOKAIRAUS <input type="checkbox"/> KÄSIN <input checked="" type="checkbox"/> KONEELLINEN <input type="checkbox"/> VAUNU <input type="checkbox"/> HEIJARIKAIRAUS: <input type="checkbox"/> HEIJARIPIUKKI <input type="checkbox"/> VAAPADUORIS <input type="checkbox"/> MUU <input type="checkbox"/> TÄRYKAIRAUS					
Kärjen syvyys m	Painuma m	Kuormitus kN	Puotik- voimien määrä	Arvioidut maalajit	Huom. Kuivakuori, rautaraja, aikukairaus- raustapa ja -syvyys, vedenpinta, näytteet tauot, kairausyritykset ja kallio
0.30	—	—	—	Hm	Kärki lyöty maahan
0.50	0.20	1.00	30	Si, Sa	
0.70	0.20	1.00	45	Si, Sa	
0.90	0.20	1.00	32	Si, Sa	
1.10	0.20	1.00	11	Si, Sa	Veden pinta 1.1m
1.30	0.20	1.00	—	Sa	
1.62	0.32	0.75	—	Sa	
1.90	0.28	0.50	—	Sa	
4.03	2.13	0.25	—	Sa	
4.32	0.29	0.50	—	Sa	
4.40	0.08	1.00	—	Si	
4.60	0.20	1.00	9	Si	
4.80	0.20	1.00	30	Hk	
5.00	0.20	1.00	48	Hk	
5.20	0.20	1.00	37	Hk	
5.40	0.20	1.00	73	Hk	
5.60	0.20	1.00	92	Hk	Kiviä
5.80	0.20	1.00	100	Hr	
5.85	0.05	1.00	100	Hr	
5.96	0.11	1.00	—	Hr	Lyöty 20 kertaa
					Todennäk. kallio
KAIRAUKSEN PÄÄTTYMINEN: <input type="checkbox"/> MÄÄRÄSYV. <input type="checkbox"/> TIIVIS MAAKERROS <input type="checkbox"/> KIVI TAI LOHKARE <input checked="" type="checkbox"/> KIVI, LOHKARE TAI KALLIO <input type="checkbox"/> KALLIO					

KUVA 1. Painokairauspöytäkirja (SGY 1980, 14).

Kairauksella saadusta mitta-aineistosta piirretään diagrammi, jonka avulla tuloksia tulkitaan. Kuvassa 1 olevan kairauspöytäkirjan perusteella on piirretty kuvassa 2 oleva diagrammi. Diagrammin keskelle on piirretty maalajipylväs, johon on merkitty maalajin piirustusmerkki kairaajan tekemien havaintojen perusteella. Pylvään vasemmalle puolelle on piirretty pelkillä painoilla tapahtunut painuma, siten että 1 cm vastaa 1 kN:n kuormaa. Oikealla puolella on kuvattu 0,2 m:n painumaan tarvittavien puolikierrosten määrä siten, että 20 pk / 0,2 m on kuvassa 1 cm. Silloin kuin 0,2 m:n painumaan on tarvittu yli 100 puolikierrosta, ulotetaan viiva vähän yli 5 cm:n päähän pylväästä ja jätetään päästä auki. Samoin tehdään, kun kairaa joudutaan lyömään. (Jääskeläinen 2011, 249.)



KUVA 2. Painokairausdiagrammi (SGY 1980, 14).

Painokairaus on verrattu moniin tarkempiin menetelmiin ja siten kairausvastuksen avulla voidaan tehdä likimääräisiä tulkintoja maaperän ominaisuuksista. Jotta tulkintoja voidaan tehdä, on tiedettävä tutkittavan kerroksen maalaji. (Jääskeläinen 2011, 250.)

Painokairaus on varmimmin tulkittavissa hiekassa, sorassa ja löyhässä moreenissa, mutta keskitiiviissä ja tiiviissä moreenissa ja tiiviissä sorassa kairaa joudutaan lyömään, jolloin tulosten tulkittavuus heikkenee huomattavasti. Savessa ja siltissä tulkinnat ovat epävarmempia (Jääskeläinen 2011, 250.) Arviot lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista muun muassa painokairauksen kairausvastuksen perusteella ovat taulukoissa 1 ja 2. (Tiehallinto 2001, liite 5 10/29).

TAULUKKO 1. Arvio karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista puristin-, paino- ja heijarikairauksen perusteella (Tiehallinto 2001, liite 5 10/29).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m^3) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma ($^\circ$)	Janbun yhtälön muodonmuutos-parametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q_c (MPa)	Paino-kairaus $P_k/0,2$ m	Heijari-kairaus $L/0,2$ m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski-tiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka $d_{10}<0,06$	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keski-tiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka $d_{10}>0,06$	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keski-tiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

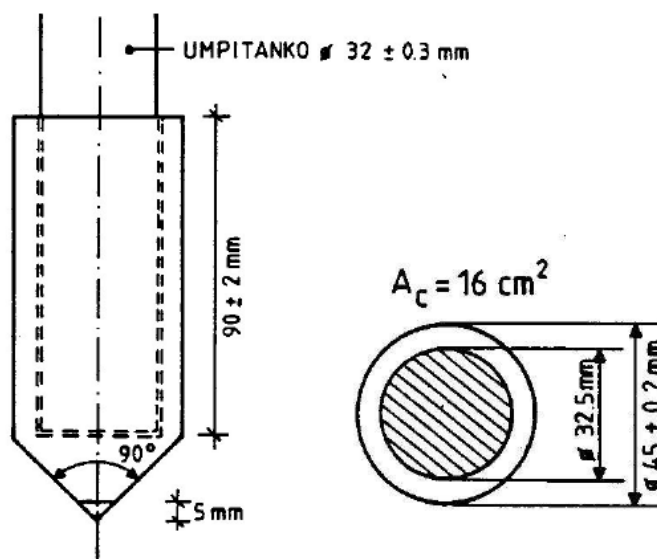
TAULUKKO 2. Arvio soran ja moreenin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista puristin-, paino- ja heijarikairauksen perusteella (Tiehallinto 2001, liite 5 10/29).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m^3) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma ($^\circ$)	Janbun yhtälön muodonmuutos-parametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q_c (MPa)	Paino-kairaus $P_k/0,2$ m	Heijari-kairaus $L/0,2$ m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keski-tiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	> 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤ 100) * 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keski-tiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140

* jos moreeni ei ole ollut jäätikön puristamana

2.2 Puristin-heijarikairaus

Puristin-heijarikairaus on yhdistelmä puristinkairausta ja heijarikairausta. Puristinkaira on hyvä väline hienojakoisissa ja kivettömissä maissa, kun taas heijarikaira on parhaimmillaan keskittiiviissä ja tiiviissä maassa, muttei niinkään pehmeissä tai löyhissä maissa. Menetelmät yhdessä kattavat koko maaperäasteikon. (Jääskeläinen 2011, 267.) Puristin-heijarikairaustulosten perusteella voidaan selvittää kovan pohjan sijainti ja arvioida muun muassa maan kitkakulmaa, suhteellista tiiviyttä ja kokoonpuristuvuusominaisuuksia. Arviot parametreista perustuvat CPTU-kairaukselle kehitettyihin kaavoihin, joten menetelmien kärkivastusten vastaavuus tulee varmistaa aluekohtaisesti, koska kärkikappaleet ovat kooltaan ja muodoltaan erilaiset. Arvioita ei voi käyttää geoteknisen suunnittelun tai mitoituksen lähtöarvoina. (SGY 2001, 78.) Puristinheijarikairauksessa käytetään tavallista heijarikairan irtokärkeä (kuva 3), joka usein jää maahan kairauksen päätyttyä (SGY 2001, 61).



KUVA 3. Puristin-heijarikairan kärki (SGY 2001, 62).

Puristin-heijarikairaus alkaa painokairauksen tavoin alkukairauksella, jotta pintakerros ei pääse vääristämään tuloksia. Varsinainen kairaus alkaa puristinkairauksella, jota jatketaan kunnes saavutetaan käytettävissä olevan laitteen suurin mahdollinen puristusvoima. Puristusnopeuden tulee olla 20 ± 5 mm/s. Kalustosta riippuen suurin puristusvoima on yleensä 30 kN, mutta kevyemmissä laitteissa se voi olla vain 15 kN. Kun suurin mahdollinen puristusvoima on saavutettu, siirrytään heijarikairaukseen, jolla jatketaan kairauksen päättymistasoon asti. Jos heijarikairauksen aikana 0,2 m painumiseen

tarvittavien lyöntien määrä laskee viiteen tai alle yli 0,4 m matkalla, siirrytään takaisin puristinkairaukseen. Kairattavien kerrosten ollessa ohuita (0 - 2 m) ei kairaustyyppejä kannata vaihtaa takaisin puristinkairaukseen tulosten tulkinnan vaikeutumisen takia. Puristin-heijarikairaus päätetään aina heijarikairaukseen ja kairauksen lopetussyy merkitään poikkileikkaukseen. (Jääskeläinen 2011, 268.)

Kairauksen aikana kairaustankoja pyöritetään vakionopeudella, jotta ne pysyvät suorassa ja samalla kitka pienenee. Pyöritysnopeus on noin 12 kierrosta minuutissa. Kairauksen aikana rekisteröidään puristusvoima 4-5 cm välein ja tankojen pyörittämiseen tarvittavaa momenttia 20 cm välein. (Jääskeläinen 2011, 268.) Heijarikairauksen aikana iskujen lukumäärä tallennetaan 40 cm välein, vaikka tulokset esitetään lyöntiä / 20 cm. Vääntömomentti mitataan tankojen liikkeen aikana, mikä saattaa aiheuttaa momentin suurehkoa vaihtelua. (SGY 2001, 64.)

Puristin-heijarikairauksella saatava tärkein tieto on kairausvastuksen suuruus, mikä ilmoitetaan kokonaisvastuksena, kärkivastuksena ja vaippavastuksena. Kärkivastus on edellä mainituista arvoista tärkein, sillä se kertoo kairausvastuksen kärjen kohdalla. Vaippakitkaa tarvitaan laskettaessa kitkasuhdetta, jolla voidaan tehdä arvioita maalajista. Vaippakitka määritetään vääntömomentista, jonka oletetaan olevan yhtä suuri kuin tankoihin ja kärjen vaippaan kohdistuva kitkavoima. (Melander 1989, 47-48.)

Parametritulkintaa varten tuloksista tarvitsee laskea kokonaiskärkivastus (q_c) ja nettokärkivastus (q_n). Kokonaiskärkivastus saadaan laskettua kaavalla 1 ja nettokärkivastus kaavalla 2.

$$q_c = \frac{Q_{tot}}{1000 \cdot A_c} \quad (1)$$

missä q_c = kokonaiskärkivastus [MPa]

Q_{tot} = kokonaispuristusvoima eli puristusvoimaan on lisätty kairatankojen paino [kN]

A_c = kairakärjen poikkileikkauksen pinta-ala [m²]

$$q_n = \frac{Q_{tot}}{1000 \cdot A_c} - k_p \cdot (M_{tot} - \mu_1 \cdot Q_{tot}) \quad (2)$$

missä q_n = nettokärkivastus [MPa]

Q_{tot} = kokonaispuristusvoima [kN]

$$k_p = \text{vakio} = 0,039 \text{ [1/m}^3\text{]}$$

$$M_{\text{tot}} = \text{kokonaisvääntömomentti [Nm]}$$

$$\mu_1 = \text{laitekohtainen vakio, jolla arvioidaan laitteen kitkaa (SGY 2001, 65.)}$$

Nettokärkivastuksen käyttämistä tulkinnassa suositellaan, jos vääntömomentti kasvaa suuresti kesken kairauksen tai kairaussyvyyden ollessa yli 10 m. Alle 10 m kairauksilla nettokärkivastuksen (q_n) ja kokonaiskärkivastuksen (q_c) ero on pieni, jos mahdollinen täytekerros ei hankaa tankoja. (SGY 2001, 65.)

Lukua, joka kuvaa 20 cm kohti tarvittujen lyöntien määrää sanotaan kokonaislyöntiluvuksi (N_{20}). Kokonaislyöntiluvusta voidaan laskea nettolyöntiluku (N_n) vähentämällä kokonaislyöntiluvusta vääntömomentin paljastama hankauksen osuus kaavalla 3. (SGY 2001, 65.)

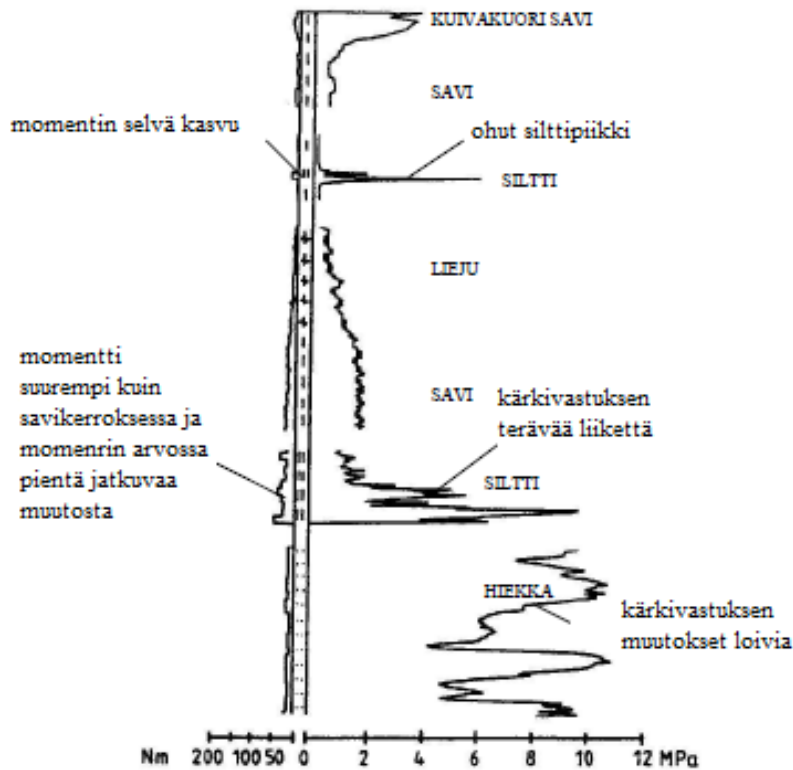
$$N_n = N_{20} - 0,040 \cdot M_{\text{tot}} \quad (3)$$

missä N_n = nettolyöntiluku (1 / 0,2 m)

N_{20} = kokonaislyöntiluku (1 / 0,2 m)

M_{tot} = kokonaisvääntömomentin arvo (Nm) (SGY 2001, 65.)

Kairausdiagrammia tulkittaessa tärkein tieto puristusvaiheesta saadaan kärkivastuksen suuruudesta ja sen vaihtelusta. Kärkivastuksen vaihtelu aiheutuu kitkamaalajeissa tiiviyden ja raekoon muutoksista. Melander esittää tutkimuksessaan mallikuvan (kuva 4) koheesiomaalajien tulkinnasta puristinvaiheessa. (Melander 1989, 59.)



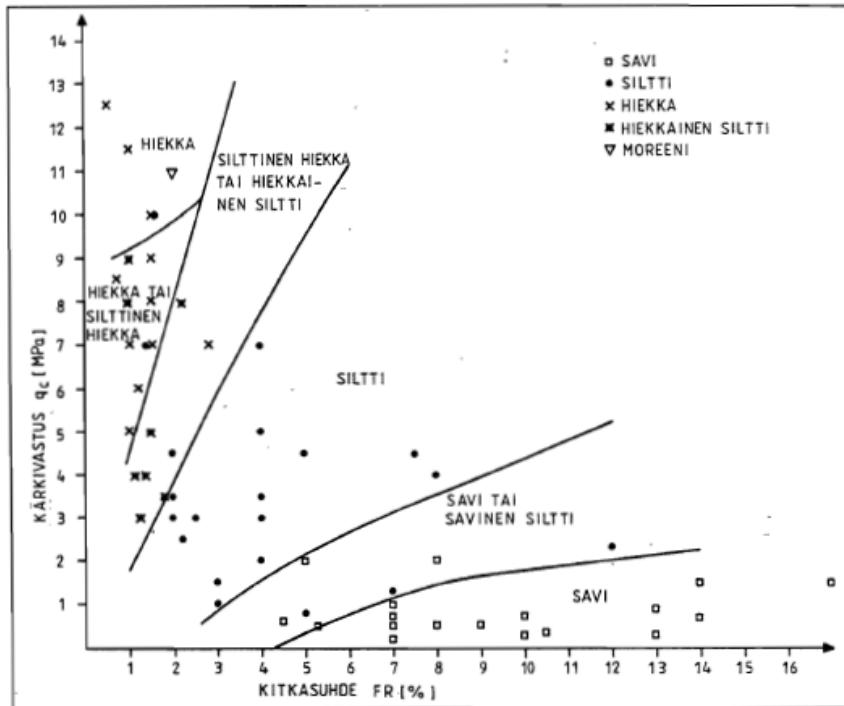
KUVA 4. Eri maalajien aiheuttamat tyypilliset kairausvastukset (Melander 1989, 60).

Melanderin tulkinnan mukaan savelle on tyypillistä lievästi kasvava kairausvastus ja momentti, kun taas savinen lieju erottuu savesta vielä pienempänä kärkivastuksena. Ohuet silttikerrokset näkyvät terävinä piikkeinä kärkivastuksessa ja samalla momentin nousuna kerroksen kohdalla. Paksummat silttikerrokset näkyvät kärkivastuksen terävänä liikehdintänä ja samalla momentin selvänä kasvuna. Momentissa on tuolloin myös jatkuvaa vaihtelua. Hiekat näkyvät kärkivastuksen loivempina muutoksina siltiin verrattuna. (Melander 1989, 59.)

Puristusvaiheen tulkinnassa päästään parempaan tarkkuuteen, jos otetaan huomioon kitkasuhde (R_f), joka lasketaan kaavalla 4. Kitkasuhteen ja kärkivastuksen avulla voidaan tulkita maalaji kuvassa 5 olevasta käyrästä. Näytteenotolla on aina varmistuttava kunkin kerroksen maalajista. (Melander 1989, 56.)

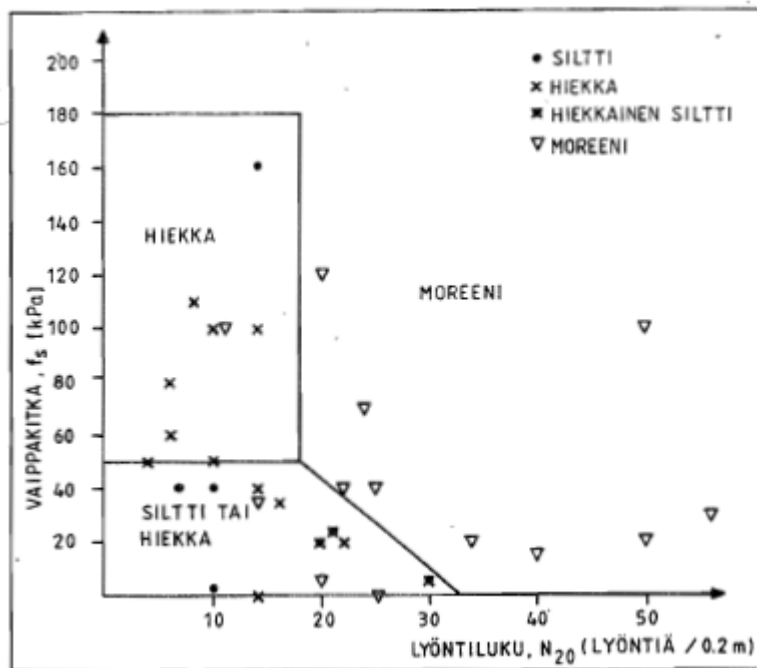
$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \% \quad (4)$$

missä R_f = kitkasuhde [%]
 f_s = vaippakitka [kPa]
 q_c = kärkivastus [MPa]



KUVA 5. Puristusvaiheen maalajitulkinta jossa $FR = R_f$ (Melander 1989, 57).

Heijarivaiheesta on vaikeampi tehdä luotettavaa tulkintaa kuin puristusvaiheesta, sillä työn aikana karkeissa maalajeissa kivien hankaus tankoihin vääristää momentin mittaus- ta. Kuvassa 6 on karkea arvio heijarivaiheen tulkinnan tueksi.



KUVA 6. Heijarivaiheen maalajitulkinta (Melander 1989, 58).

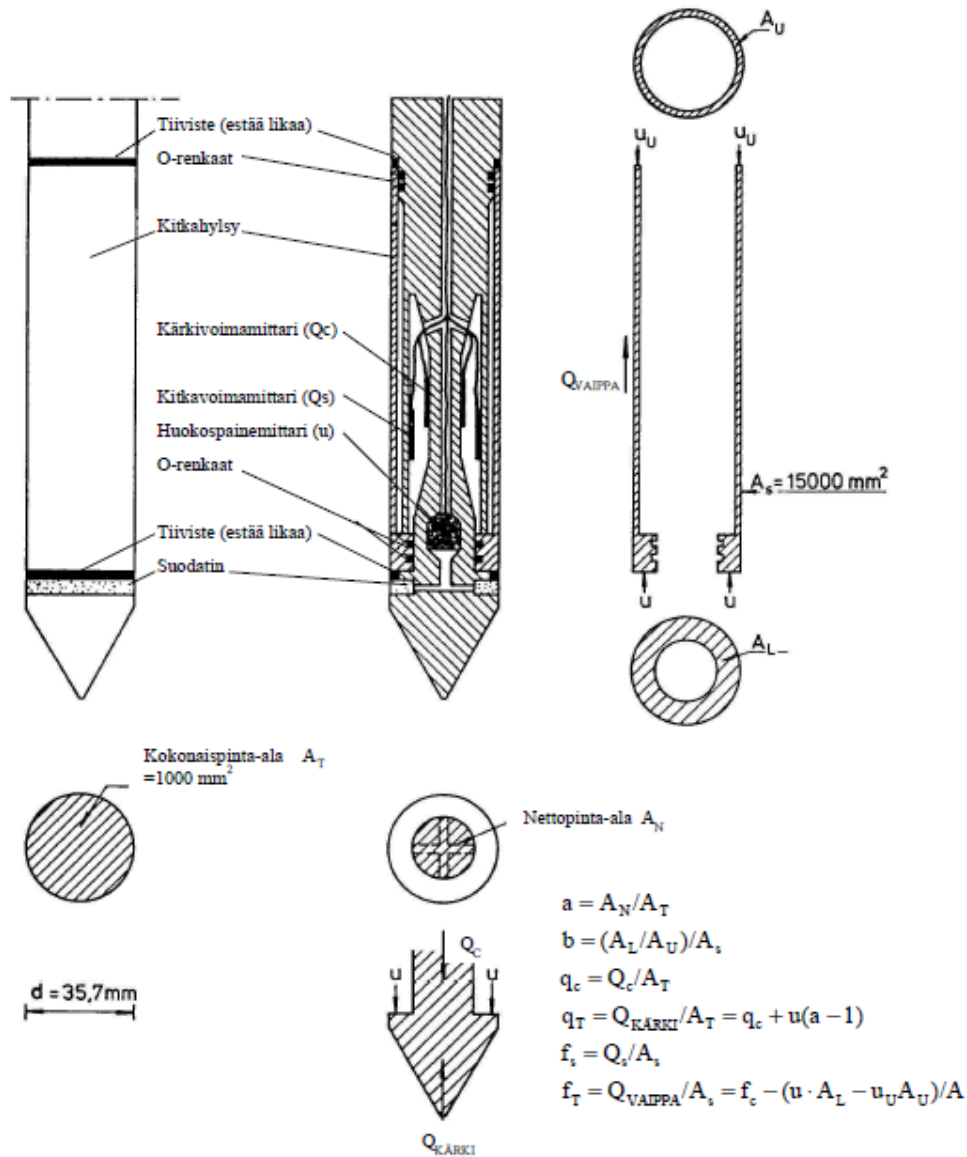
2.3 CPTU-kairaus

2.3.1 Yleistä menetelmästä

CPTU-kairaus (cone penetration test) on puristinkairaus, jolla voidaan mitata myös maaperän huokosvedenpainetta (u). CPTU-kairauksella arvioidaan maakerrosten jatkuvuus ja kerrosrajat, sekä saadaan yleiskäsitys maan ominaisuuksista (SGY 2001, 9). Huokospaineen muutoksista voidaan tunnistaa jopa 30-50 mm paksuja kerroksia (Meigh 1987, 94-95).

Menetelmässä maahan puristetaan vakionopeudella 20 ± 2 mm /s kärkikappaletta, joka mittaa kärkivastusta, vaippakitkaa ja huokosvedenpainetta. Mittaukset rekisteröidään tarvittaessa jopa 0,01 m välein eli syntyy lähes yhtenäinen käyrä. (SGY 2001, 9.) Puristinkairaus on hyvin samanlainen kuin luvussa 2.2 esitetyn puristin-heijarikairauksen puristinvaihe, mutta kärkikappale ja mittaustavat ovat erilaiset. Puristinkairauksessa mittaukset tehdään kärjestä, kun taas puristin-heijarikairauksessa mittaukset tehdään maan päältä.

CPTU-kairauksessa käytettävä kärki on esitetty kuvassa 7. Huokospainetta mittaava laitteisto voi olla kärkikartiassa, kitkahylsyn yläpuolella tai kuvan 7 tapaan kärkikartion ja kitkahylsyn välissä. Suositelluin sijainti on kärkikartion ja kitkahylsyn välissä ja tällöin puhutaan standardimittauksesta (u_2). (EN ISO 22476-1.13 2006, 11.) Mittauspaikan sijainti vaikuttaa kärkivastuksen ja vaippakitkan arvojen korjauksiin (EN ISO 22476-1.13 2006, 20-21).



KUVA 7. CPTU-kairan kärki ja sen osat (SGY 2001, 11).

Kairauskaluston valintaan vaikuttaa kairauskohteen vaativuus ja haluttu tarkkuus. Kairausluokat on jaettu luokkiin 1 – 4 siten, että luokkaa

- 1 käytetään pehmeiden tai löyhien maalajien tulkintaan, sekä silloin kun halutaan määrittää kerrosrajoja ja maalajityyppejä mahdollisimman tarkasti
- 2 käytetään tarkkaan pehmeiden ja tiiviiden maiden tulkintaan, Suomessa etenkin sitkeät savet ja hiekat
- 3 käytetään pehmeiden ja tiiviiden maiden tulkintaan, sekä sitkeiden ja kovien, että tiiviiden ja hyvin tiiviiden kerrosten parametrien arviointiin
- 4 käytetään pehmeiden ja sitkeiden tai löyhistä tiiviisiin kerroksiin tehtävässä likimääräisessä maalajiarviossa. Arvioista ei voi määrittää parametreja. Kyseessä

on tällöin puristinkairaus ilman huokospaineen mittausta. (SGY 2001, 25 ja EN ISO 22476-1.13 2006, 15.)

Taulukossa 3 on kerrottu eri kairausluokkien vaatimat mittaustarkkuudet. Mitattujen tulosten tarkkuuden tulee olla kaikki virhelähteet huomioiden parempi kuin taulukossa annettu suurin arvo käytettävässä kairausluokassa. (EN ISO 22476-1.13 2006, 15.)

TAULUKKO 3. Kairausluokkien vaatimat mittaustarkkuudet (EN ISO 22476-1.13 2006, 16).

Kairausluokka	Mitattu parametri	Sallittu minimitarkkuus	Mittausvälin maksimipituus	Maaperä	Tulkinta
1	Kärkivastus	35 kPa tai 5 %	20 mm	A	G, H
	Vaippakitka	5 kPa tai 10 %			
	Huokospaine	10 kPa tai 2 %			
	Inklinaatio	2°			
	Kairausryvyvyys	0,1 m tai 1 %			
2	Kärkivastus	100 kPa tai 5 %	20 mm	A	G, H*
	Vaippakitka	15 kPa tai 15 %		B	G, H
	Huokospaine	25 kPa tai 3 %		C	G, H
	Inklinaatio	2°		D	G, H
	Kairausryvyvyys	0,1 m tai 1 %			
3	Kärkivastus	200 kPa tai 5 %	50 mm	A	G
	Vaippakitka	25 kPa tai 15 %		B	G, H*
	Huokospaine	50 kPa tai 5 %		C	G, H
	Inklinaatio	5°		D	G, H
	Kairausryvyvyys	0,2 m tai 1 %			
4	Kärkivastus	500 kPa tai 5 %	50 mm	A	G*
	Vaippakitka	50 kPa tai 20 %		B	G*
	Kairausryvyvyys	0,2 m tai 1 %		C, D	G*
A	Tasaisesti kerrostuneissa maakerroksissa pehmeistä sitkeisiin saviin ja siltteihin (tyypillisesti $q_c < 3$ MPa)				
B	Kerrostuneissa maakerroksissa pehmeistä sitkeisiin saviin (tyypillisesti $q_c \leq 3$ MPa ja keskitiiviisiin hiekkoihin (tyypillisesti $q_c = 5 - 10$ MPa)				
C	Kerrostuneissa maakerroksissa sitkeissä savissa (tyypillisesti $q_c = 1,5 - 3$ MPa) ja hyvin tiiviissä hiekoissa (tyypillisesti $q_c > 20$ MPa)				
D	Hyvin sitkeästä kovaan saveen (tyypillisesti $q_c \geq 3$ MPa) ja hyvin tiiviisiin karkeisiin maalajeihin (tyypillisesti $q_c \geq 20$ MPa)				
G	Maaperän profilointi ja maalajitunnistus melko luotettavasti				
G*	Suuntaa antava maaperän profilointi ja maalajitunnistus, joissa paljon epävarmuustekijöitä				
H	Maaperätulkinta suunnittelun tueksi melko luotettavasti				
H*	Suuntaa antava maaperätulkinta suunnittelun tueksi, missä paljon epävarmuustekijöitä				

2.3.2 Tulokset ja arvojen korjaukset

CPTU-kairauksen tulokset esitetään yhtenäisinä käyriä kairausvyöryden suhteen. Tuloksiksi saadaan tiedot:

- kärkivastuksesta q_c [MPa]
- vaippakitkasta f_s [MPa]
- huokospaineesta u [MPa]
- inkliinaatiosta α [°]. (EN ISO 22476-1.13 2006, 23-24.)

Inkliinaation avulla saadaan laskettua todellinen kairausvyöryys kairauskulmasta riippuen. Kärkivastuksesta ja vaippakitkasta lasketaan korjatut arvot (q_t) ja (f_t), joita käytetään tulosten tarkempaan tarkasteluun. Karkeilla maalajeilla korjaukset eivät ole välttämättömiä, sillä korjaus vaikuttaa niissä vain vähän. (EN ISO 22476-1.13 2006, 24.) Korjattu kärkivastus (q_t) lasketaan kaavalla 5.

$$q_t \approx q_c + u \cdot (1 - a) \quad (5)$$

missä

q_c = mitattu kärkivastus

u = mitattu huokosvedenpaine (u_2)

a = pinta-alakerroin, joka saadaan valmistajalta (Kuva 7). (SGY 2001, 12.)

Korjattu vaippakitka (f_t) lasketaan kaavalla 6.

$$f_t \approx f_s - \left[u \cdot b + 0,3 \cdot \Delta u \cdot \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right] \quad (6)$$

missä

f_s = mitattu vaippakitka

u = mitattu huokosvedenpaine (u_2)

Δu = kärjen painamisen aiheuttama huokospainemuutos painamisen aikana ($u - u_0$)

a = pinta-alakerroin, joka saadaan valmistajalta (Kuva 7).

b = pinta-alakerroin, joka saadaan valmistajalta (Kuva 7). (SGY 2001, 13.)

Maalajitulkintaa ja parametrien määrittystä varten tarvitaan myös seuraavia perustietoja maaperästä:

- maassa vallitseva huokospaine u_0
- maassa vallitseva tehokas pystyjännitys σ'_{v0}

- juoksuraja w_L . (SGY 2001, 37.)

Juoksurajan määrittystä tarvitaan savisissa ja eloperäisissä maissa. Maassa vallitseva pystyjännitys saadaan arvioimalla tiheys kairaustuloksista määritetyillä maalaji- ja tiivysarvioilla. Maassa vallitseva huokospaine arvioidaan pohjavedenpinnan mukaan tai läpäisevissä kerroksissa mitattujen huokospaineiden avulla. Perusparametrien lisäksi tulkinnassa voidaan tarvita lisäparametreja, joita ovat:

- kärjen aiheuttama huokospainelisäys $\Delta u = u - u_0$
- kitkasuhde $R_f = \frac{f_c}{q_c} \cdot 100 \%$
- huokospainesuhde $B_q = \frac{\Delta u}{(q_t - \sigma_{vo})}$
- nettokärkivastus $q_n = q_t - \sigma_{vo}$ (SGY 2001, 37 ja EN ISO 22476-1.13 2006, 24.)

Laskettaessa kitkasuhdetta, huokospainesuhdetta tai maaperäparametreja käytetään kärkivastuksen, vaippakitkan ja huokospaineen keskiarvoja eri maakerroksissa. Keskiarvoa laskettaessa poistetaan vakiopoikkeamaa suuremmat poikkeaman arvot. Keskiarvojen laskemisessa on huomioitava, että eri arvot mitataan samalla hetkellä, mutta kärjen rakenteesta johtuen mittaukset tapahtuvat eri syvyyksillä. Standardimittauksessa kärkivastuksen arvo mitataan n. 21 mm, huokospaine n. 38 mm ja vaippakitka n. 110 mm kairan kärjestä. Tällöin arvot voidaan korjata samaan syvyyteen siirtämällä kärkivastuksen arvoja n. 20 mm ylös ja vaippavastuksen arvoja n. 70 mm alas. (SGY 2001, 38 ja 41.)

Kairauksen alussa CPTU-kärjestä mitataan nolla-arvot (vrt. vaa'an nollaus). Nolla-arvoilla tarkoitetaan kärjessä olevaa jännitystä ennen sen osumista maahan. Ne mitataan myös kairauksen päättymisen jälkeen, kun kaira on nostettu ylös. Nolla-arvojen vertailulla varmistetaan osaltaan kairauksen onnistuminen.

Kairauksen alussa ja kairauksen jälkeen mitattuja nolla-arvoja verrataan ja jos arvojen välillä on merkittävä ero, otetaan se huomioon tuloksia tulkittaessa. Jos kairauksen aikana on osuttu kiveen tai erittäin kovaan maakerrokseen, käytetään osuman yläpuolella ennen kairausta mitattuja nolla-arvoja ja alapuolella kairauksen jälkeen mitattuja nolla-arvoja. Tapauksissa, joissa loogista selitystä nolla-arvojen eroihin ei löydy, on tutkittava lämpötilavaikutukset. Jos lämpötilavaikutukset aiheuttavat eron, silloin tulkinnassa käy-

tetään keskiarvoja. Mikäli lämpötilavaikutustenkaan ei uskota aiheuttaneen virhettä, on suoritettava uusi kairaus. (SGY 2001, 38.)

Tulokset esitetään q_t -, f_t - ja u -käyrinä kairausyvyyden suhteen ja arvioinnin tueksi voidaan esittää myös u_0 -, Δu -, R_f - ja B_q -käyrät syvyyden suhteen (SGY 2001, 39). Standardissa EN ISO 22476-1.13 suositellaan kitkasuhteen esittämistä aina, mutta muiden laskettujen parametrien käyttöä pidetään vapaaehtoisena, sillä ne ovat riippuvaisia tulkinnoista (EN ISO 22476-1.13 2006, 24).

Mittaustuloksia käsiteltäessä voidaan virheellisiä tietoja karsia harkitusti. Esimerkiksi kairauksen aikaisten pysähdysten aiheuttamat arvojen hetkelliset laskut voidaan jättää huomioimatta. (SGY 2001, 40.)

2.3.3 Tulosten tulkinta kuvaajien avulla

CPTU-kairauksia tulkittaessa käytetään kairausdiagrammeja ja kairajan tekemiä muistiinpanoja. Diagrammin perusteella tehdyt tulkinnat on suositeltavaa tarkastaa näytteenotolla. Tulokset ovat puristin-heijarikairauksen kanssa melko hyvin vertailukelpoisia, mutta paino- ja heijarikairauksen kanssa huonommin. (SGY 2001, 43.)

CPTU-kairauksen päätarkoitus ei ole maaperäluokitusten teko vaan maakerrosrajojen määrittäminen ja luoda yleiskuva maan ominaisuuksista (SGI 2007, 47).

Maaperäluokitusta ei tule tehdä pelkästään CPTU-kairauksen perusteella, vaan tutkimuksia on täydennettävä esimerkiksi seuraavilla tutkimuksilla:

- erillisillä huokospainemittauksilla
- näytteenotolla
- mittaamalla lisäparametreja
- vertailukairauksilla. (SGY 2001, 43.)

Yksi CPTU-kairauksella mitattavista suureista on kärkivastus, jonka suuruuden perusteella voidaan tehdä arvioita maan tiiviyydestä, kerrosvaihteluista ja rakeisuudesta. Menetelmän erottelutarkkuus on melko hyvä hienorakeisesta maasta soraan asti. Maan

ominaisuuksien vaikutusta kärkevustukseen on kuvattu Kairausoppaassa VI seuraavanlaisesti. (SGY 2001, 43.)

Maan ominaisuudet vaikuttavat kärkevustukseen siten, että kärkevustus on sitä suurempi mitä

- *karkeampi maa-aines on kyseessä*
- *suurempi maassa vallitseva pystyjännitys on*
- *suurempi vaakapaine maassa vallitsee*
- *suurempi on maan tiiviysaste*
- *suurempi on maan ylikonsolidaatioaste. (SGY 2001, 43)*

Toinen mitattavista suureista on vaippakitka, joka kuvaa kairauksen aikaisia vaakasuuntaisia paineita. Vaippakitkan suuruuteen vaikuttavat maalaji ja maan ylikonsolidaatioaste. Maalajien vaihtelua arvioidaan kitkasuhteen (R_f) avulla. Maan ominaisuuksien vaikutusta vaippakitkan suuruuteen kuvataan Kairausoppaassa VI seuraavasti. (SGY 2001, 44.)

Maan ominaisuudet vaikuttavat vaippakitkan arvoon siten, että vaippakitka on sitä

- *suurempi mitä karkeampi maa-aines on kyseessä*
- *suurempi mitä tiiviimpi kitkamaa on*
- *pienempi mitä suurempi on maan sensitiivisyys*
- *suurempi mitä suurempi on koheesiomaan ylikonsolidaatioaste (SGY 2001, 44.)*

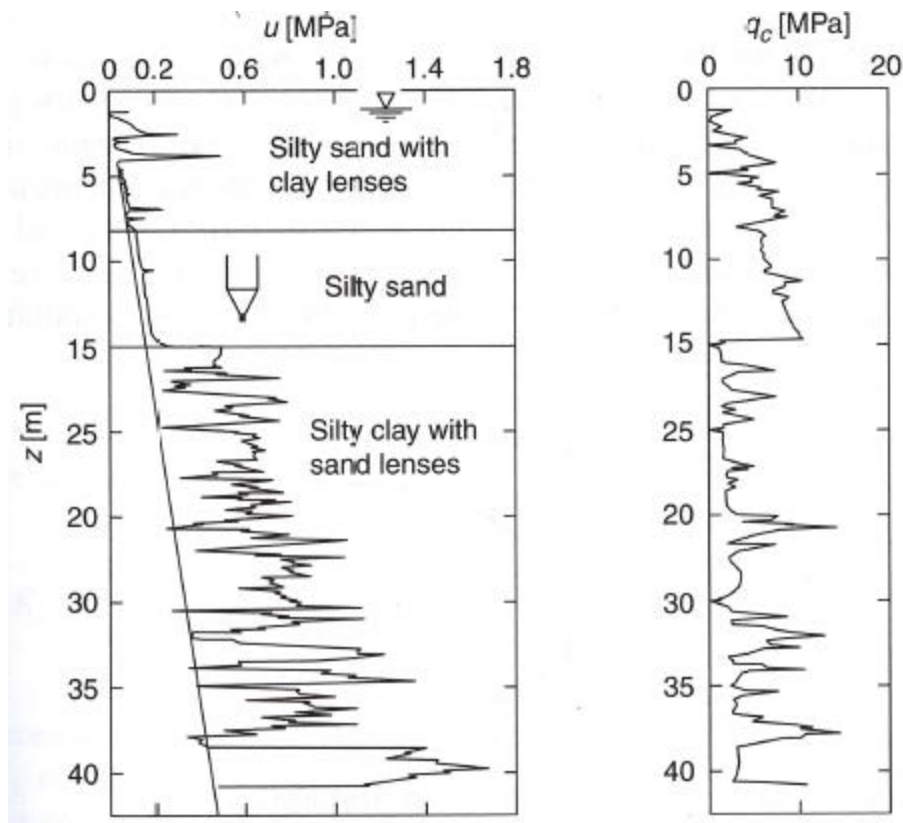
Kolmas mitattava suure on huokospaine, joka kuvaa maassa vallitsevan huokosvedenpaineen suuruutta kairauksen aikana. Saatavaa arvoa vertaamalla laskennalliseen huokosvedenpaineeseen voidaan tehdä tulkintoja maalajeista. Kairausoppaassa VI kuvataan maan ominaisuuksien vaikutusta huokospaineeseen seuraavanlaisesti. (SGY 2001, 44.)

Maan ominaisuudet vaikuttavat huokospaineeseen siten, että huokospaine on sitä

- *korkeampi mitä hienorakeisempi maa-aines on kyseessä*
- *suurempi mitä suurempi on koheesiomaan suljettu leikkauslujuus*
- *pienempi mitä suurempi on maan ylikonsolidaatioaste*

- suurempi mitä suurempi on maalajin sensitiivisyys. (SGY 2001, 44.)

Renato Lancellotta oppikirjassa Geotechnical engineering kerrotaan huokospaineen mittaamisen tekevän maalajitulkinnoista suoraviivaisempia. Lancellotta käyttää kirjassaan esimerkkiä (kuva 8), jossa on maalajitulkinnessa käytetty huokospaineenmittausta ja kärkivastusta. (Lancellotta 2009, 292.)

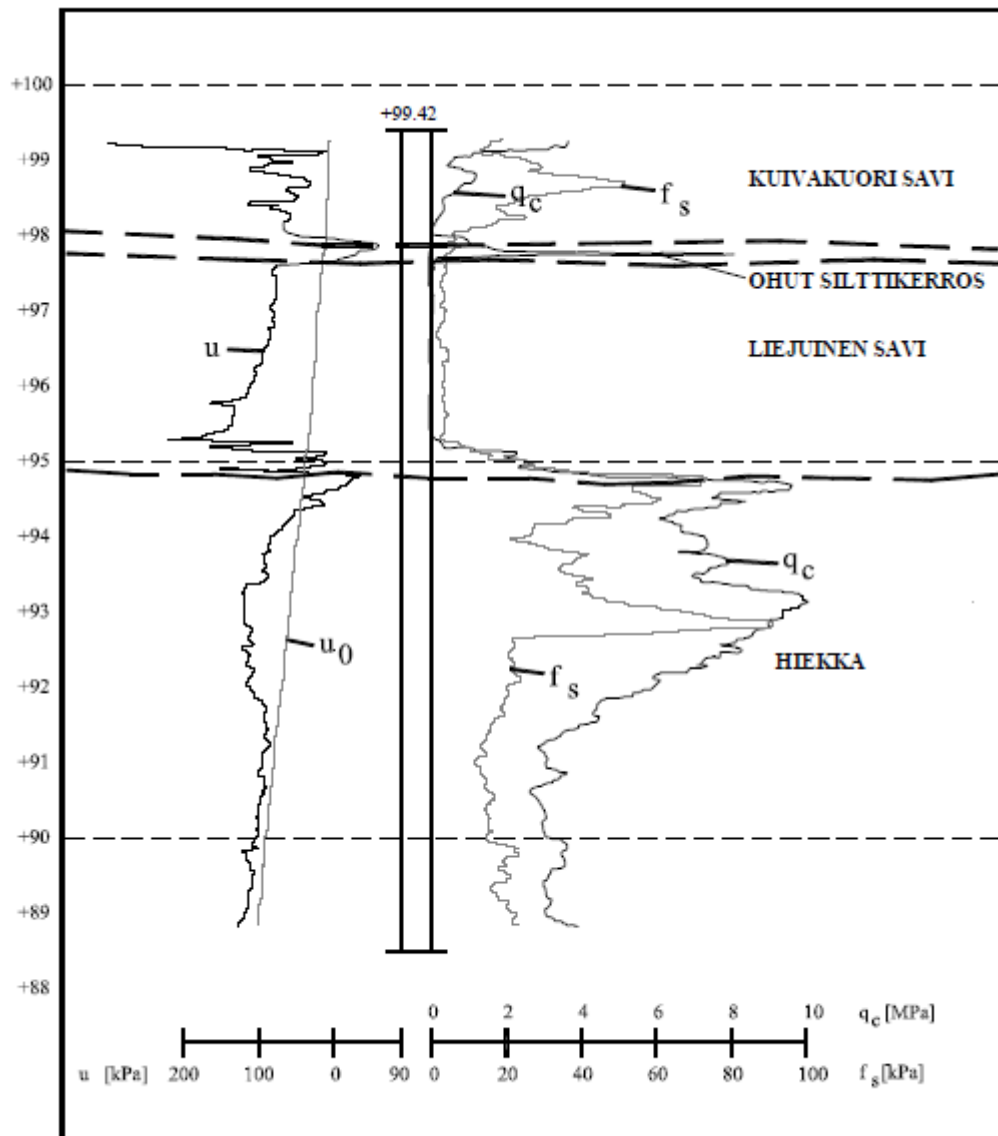


KUVA 8. CPTU-kairauksen tulkinta huokospaineen ja kärkivastuksen avulla (Lancellotta 2009, 291).

Kuvan 8 tulkinnessa on käytetty apuna kärkivastusta ja huokospaineen suuruutta. Ensimmäiset 15 m on tulkittu löyhäksi tai keskitiiviiksi hiekaksi, sillä kärkivastus on suuri, mutta huokospaine on lähellä laskennallista arvoa eli maa johtaa hyvin vettä. Alempana kärkivastus ja huokospaine alkavat sahata voimakkaasti, siten, että kärkivastuksen pienentyessä huokospaine kasvaa ja päinvastoin. Tämä viittaa savisiin kerroksiin, joissa on hiekkakerroksia väleissä. (Lancellotta 2009, 292.)

Lancellotta mukaan on huomionarvoista, että huokospaineen mittauksen ollessa tarkempi kuin kärkivastuksen, niin CPTU on käyttökelpoinen väline maakerrosrajojen määrittämiseen (Lancellotta 2009, 292).

Kuvan 9 tulkinta on esitetty Kairausoppaassa VI perustuen kärkivastuksen (q_c), vaippakitkan (f_s) ja huokospaineen (u) muutoksiin.



KUVA 9. CPTU-kairausdiagrammi (SGY 2001, 45).

Kairausoppaan VI mukaan savelle on tyypillistä lievästi kasvava kairausvastus ja vaippakitka. Savinen lieju erottuu savea pienemmän kärkivastuksen perusteella. Näytteenotolla on varmistettava, että kyseessä on lieju. (SGY 2001, 45.)

Ohuet silttikerrokset näkyvät kärkivastuksen piikkeinä ja samaan aikaan huokospaineen selvänä laskuna. Paksuissa silttikerroksissa kärkivastus tekee terävää liikettä ja vaippakitka on suurempi kuin savella. Silttikerroksissa vaippakitkassa on usein myös pientä jatkuvaa vaihtelua. (SGY 2001, 46.)

Hiekassa kärkivastuksen liikkeet ovat loivempia kuin siltissä. Tasarakeisessa hiekassa vaippakitka voi olla saven kaltainen, mutta kivisessä maassa se voi vaihdella voimakkaasti. Huokosvedenpaineen muutos kairauksen aikana on pieni. (SGY 2001, 46.)

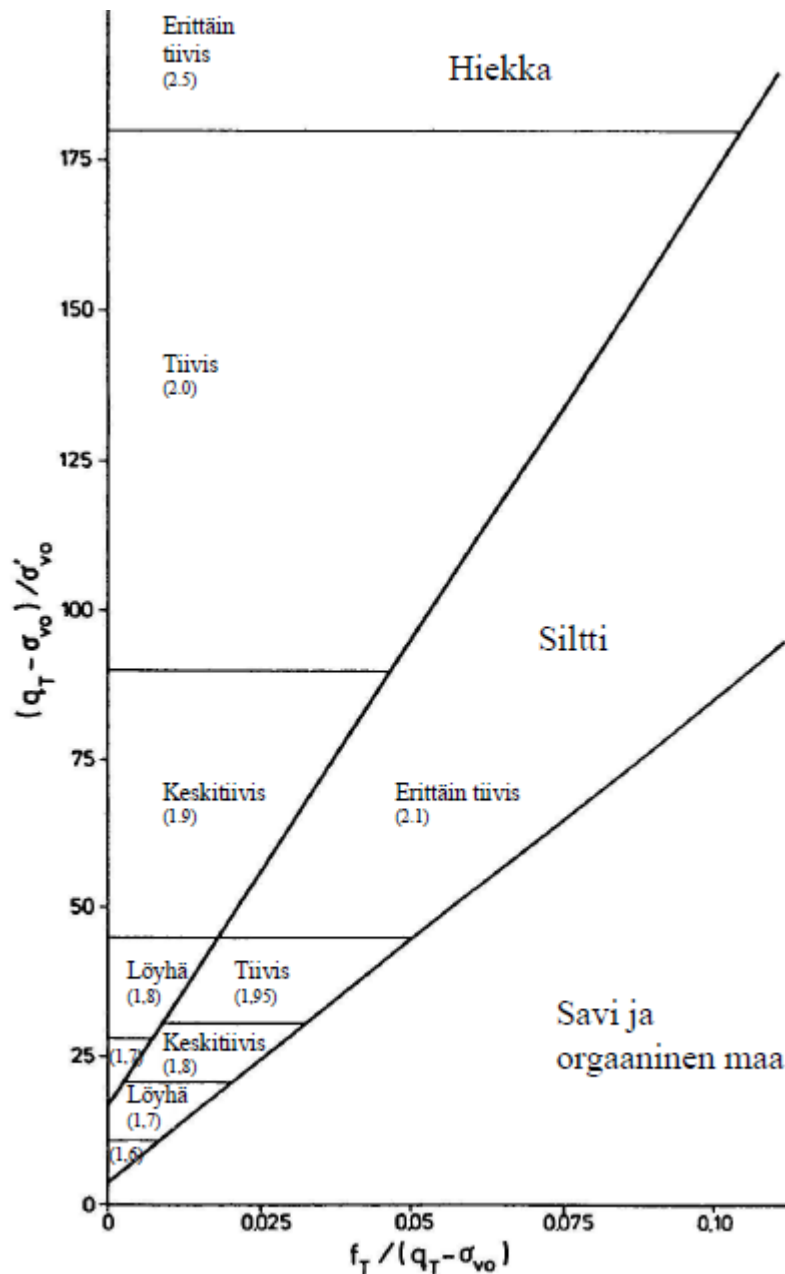
2.3.4 Maalajimääritys

Alustava maalajimääritys voidaan tehdä kairausoppaan VI mukaan seuraavanlaisesti:

1. *Lasketaan eri kerroksissa vallitseva pystysuora jännitys ($\Delta\sigma_{v0}$) tunnetuilla tiheysarvoilla.*
2. *Lasketaan mitattujen huokospainearvojen avulla maassa vallitseva tehokas pystyjännitys ($\Delta\sigma'_{v0}$).*
3. *Määritetään kuivakuorikerroksen ja/tai täytteen tiheysarvot ja lasketaan kokonaispaine sekä alapuolisissa kerroksissa vaikuttavat paineet eri syvyyksissä 0,2 m välein. Syvyysjaksojen tiheydet joko määritetään tulosten perusteella tai niiden puuttuessa käytetään lähintä tulosten perusteella määritettyä yläpuolisen maan tiiviysarvoa.*
4. *Lasketaan normalisoitu nettokärkivastus $\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}$ ja parametri $\frac{f_t}{(q_t - \sigma_{v0})}$ eri tasoissa.*
5. *Arvioidaan maalaji luokitusdiagrammin perusteella. (SGY 2001, 46.)*

Kuvassa 10 on esitetty hiekan ja siltin luokitusdiagrammi, jota voidaan käyttää maalajin arvioimiseen edellä mainittujen tietojen avulla. Diagrammissa olevan saven ja orgaanisen maan erotuslinja on todettu suhteellisen paikkansa pitäväksi, mutta hiekka- ja siltti-ryhmien rajoja on pidettävä lähinnä suuntaa antavina. (SGY 2001, 46.)

Luokitusdiagrammit toimivat vain suhteellisen tasarakeisissa maissa ja siksi rajanveto maalajien välille on vaikeaa. Lähelle hiekan ja siltin rajaa sijoittuvat maa-ainekset voivat koostua siltistä, hiekkaisesta siltistä, silttisestä hiekasta tai hiekasta. Samoin siltin ja saven rajapinnan lähellä olevat siltit voivat olla savisia. Hiekkainen savi tai hienorakeinen moreeni asettuvat myös savipitoisuudesta riippuen siltti- tai savirajojen sisään. (SGY 2001, 46.)



KUVA 10. Hiekan ja siltin luokitusdiagrammi sekä koheesiomaan erotuslinja. Suluissa on arvioitu kiintotiheys [t / m^3] täysin kyllästyneessä tilassa (SGY 2001, 47.)

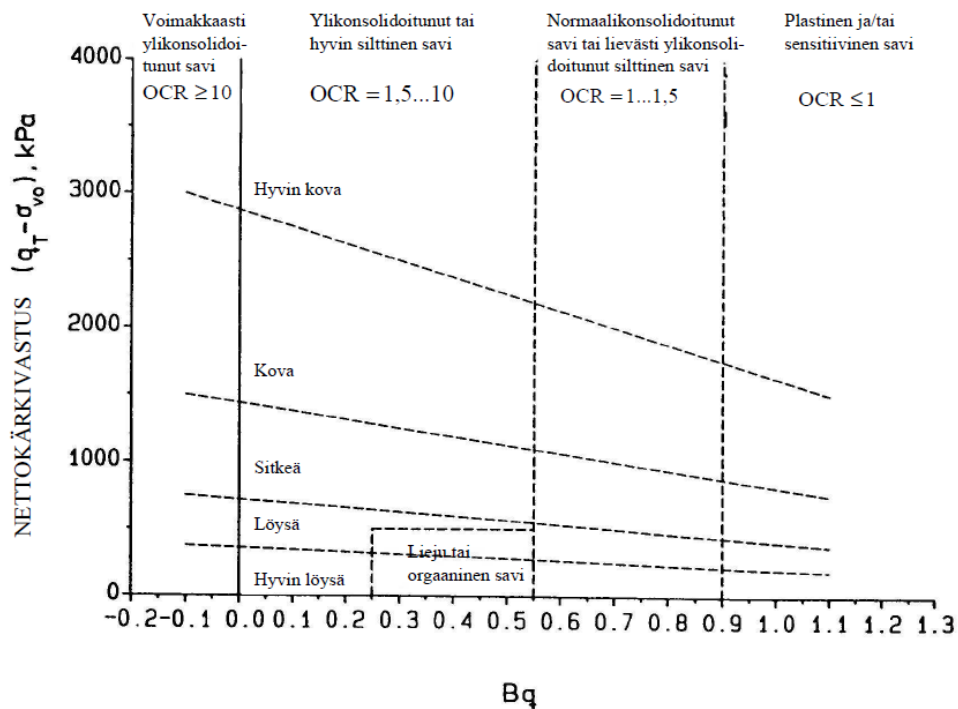
Kärkivastukseen ja vaippakitkaan perustuvaa tulkintaa ei tule käyttää pelkästään, vaan maalajimäärityksessä tulee tehdä vertailua myös huokosylipaineen arvoihin. Ilman huokosylipaineen huomioimista tulkinnaassa on mahdollista, että esimerkiksi suuria huokosylipaineen arvoja muodostavat kerrokset luokitellaan virheellisesti hiekaksi pelkästään kärkivastuksen ja vaippakitkan perusteella. (SGY 2001, 47.)

Kuvan 10 tulkintaan aiheutuu virhettä, jos pehmeässä savessa mitattu vaippakitka on hyvin pieni. Tällöin kitkasuhteesta tulee pieni, mikä viittaa kitkamaahan saven sijasta. Saven ollessa erittäin ylikonsolidoitunutta kärkivastus voi olla samaa suuruusluokkaa

kuin löyhissä kitkamaissa, mutta tällöin kuitenkin saadaan usein suurempi kitkasuhteen arvo, joka viittaa saveen. (SGY 2001, 47.)

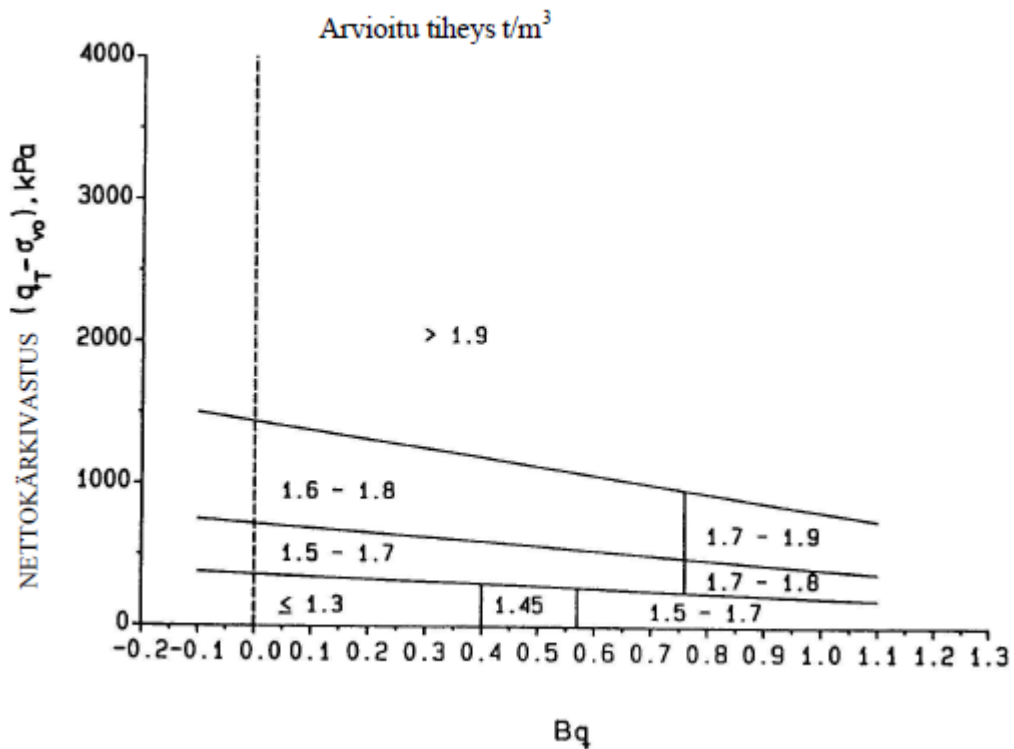
Diagrammin antama tulos voi olla epäluotettava myös sensitiivisissä ja silttisissä savissa, joissa vaippakitka voi olla hyvinkin pieni, mutta maassa vallitsevan pystyjännityksen perusteella maa olisi silttiä. Tällaisissa savissa syntyy usein korkeita huokospaineita ja siksi luokiteltaessa maa saveksi tai siltiksi onkin tarkasteltava onko huokospainesuhde (B_q) yli vai alle 0,6. Arvon ollessa yli 0,6 kyseessä on savi. Pintakerroksissa nettokärkivastuksen arvo voi johtaa virheelliseen tulkintaan pienten pystyjännitysten takia. (SGY 2001, 47.)

Tulkintaa voidaan tarkentaa kuvan 11 diagrammilla, jos kuvan 10 perusteella maalaji on tulkittu saveksi tai orgaaniseksi maaksi. Diagrammi perustuu nettokärkivastukseen (q_n) ja huokospainesuhteeseen (B_q).



KUVA 11. Saven ja orgaanisen maan luokitusdiagrammi (SGY 2001, 48).

Koheesiomaan tiheyttä voidaan arvioida nettokärkivastuksen (q_n) ja huokospainesuhteen (B_q) perusteella kuvan 12 diagrammista (SGY 2001, 49).



KUVA 12. Koheesiomaan tiheyden arviointi nettokärkivastuksen ja huokospainesuhteen avulla (SGY 2001, 49).

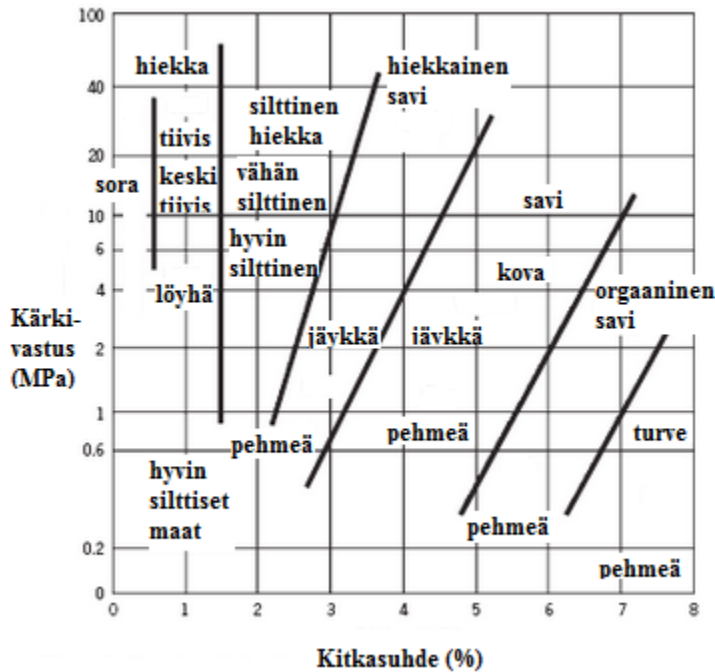
Nettokärkivastuksen (q_n) ollessa yli 0,5 MPa, luokitellaan maa siltiksi ja sen ollessa yli 1,5 MPa, luokitellaan maa hiekaksi. Nettokärkivastuksen perusteella voidaan määrittää hiekan ja siltin tyypilliset tiiviudet taulukon 4 mukaisesti. (SGY 2001, 48.)

TAULUKKO 4. Hiekan ja siltin tiiviysarvot nettokärkivastuksen perusteella. (SGY 2001, 48).

	Hiekka	Siltti
Hyvin tiivis	> 20 MPa	> 10 MPa
Tiivis	> 10 MPa	> 5 MPa
Keskitiivis	> 5 MPa	> 2,5 MPa
Löyhä	> 2,5 MPa	> 1 MPa
Hyvin löyhä	< 2,5 MPa	< 1 MPa

Maalajimääritys voidaan vaihtoehtoisesti tehdä käyttämällä kuvan 13 diagrammia. Diagrammin tulkinnassa tarvittava kitkasuhde (R_f) lasketaan kaavalla 7 ja kärkivastuksena käytetään korjaamatonta kärkivastusta (q_c). (RIL157-1 1985, 138.)

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \% \quad (7)$$



KUVA 13. Maalajimääritys kärkevyyden ja kitkasuhteen avulla (Brouwer 2007).

2.3.5 Geotekniset parametrit

CPTU-kairauksen avulla voidaan tehdä arvioita eri geoteknisistä parametreista. Luotettavimmat tulokset pystytään tekemään koheesiomailla leikkauslujuudesta ja kitkamailta kitkakulmasta. Pelkästään CPTU-kairauksen perusteella tehtyjä arvioita parametreista ei tule käyttää mitoitusparametreina. CPTU-kairauksen perusteella tehdyt arviot tulee aina tarkistaa vähintään yhdellä maanäytteellä kustakin tulkittavasta maakerroksesta. Maanäytteiden lisäksi tulee tehdä esimerkiksi siipikairauksia, joilla pystytään parantamaan tulosten luotettavuutta. (SGY 2001, 49-50.)

Leikkauslujuus

Suljettua leikkauslujuutta voidaan arvioida hienorakeisissa maissa nettokärkevyyden (q_t) ja maan juoksurajan (w_L) avulla kaavalla 8. Kaavalla lasketut arvot vastaavat melko hyvin siipikairalla saatuja arvoja. Leikkauslujuuden määrittämisen tarkkuus riippuu kairausluokasta, mutta jos halutaan määrittää leikkauslujuus tarkasti, on tulokset kalibroitava aina siipikairaustulosten ja mielellään myös suorien leikkauskokeiden perusteella (SGY 2001, 50-51).

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65 \cdot w_L} \quad (8)$$

missä q_t = korjattu kärkivastus [kPa]
 σ_{v0} = maassa vallitseva pystysuora jännitys [kPa]
 w_L = juoksuraja

Kaavaa käytettäessä on huomioitava, että saatu leikkauslujuus koskee vain homogeenista maata. Lisäksi leikkauslujuuden ja nettokärkivastuksen välinen suhde on herkkä juoksurajalle. Häiriintyneessä tai epähomogeenisessa maassa leikkauslujuus saatetaan yliarvioida kärjen pienen vaikutusalueen takia, jolloin huomioidaan laskelmissa ainoastaan puolet kaavan antamasta leikkauslujuuden arvosta. (SGY 2001, 50.)

Leikkauslujuutta voidaan laskea kaavalla 9 silloin, kun juoksurajaa ei tiedetä.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (9)$$

missä q_t = korjattu kärkivastus
 σ_{v0} = maassa vallitseva pystyjännitys
 N_{kt} = empiirinen kerroin, joka on yleensä väliltä 10-20 (Kärki 2010, 22).

Oppaissa suositellaan kertoimen (N_{kt}) arvoksi savella 16,3, liejulla 24 ja savimoreenilla 11 (SGY 2001, 50 ja SGI 2006, 50-51). Arvot ovat kokemuseräisiä.

Leikkauslujuutta voidaan arvioida myös mitatun huokospaineen avulla käyttämällä kaavaa 10.

$$S_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (10)$$

missä u_2 = mitattu huokospaine (standardimittaus)
 u_0 = maassa vallitseva huokospaine
 $N_{\Delta u}$ = empiirinen kerroin, joka on yleensä väliltä 10-20. (Kärki 2010, 22.)

Empiirisen kertoimen avulla leikkauslujuuden arvot voidaan kalibroida vastaamaan siipikairauksella saatavia leikkauslujuuden arvoja. Jos sekä kärkivastuksen että huokos-

paineen avulla määritetyt leikkauslujuudet täsmäävät siipikairaustulosten kanssa, voidaan tulosta pitää melko luotettavana. (Kärki 2010, 23.)

Kitkakulma

Kitkakulmaa voidaan arvioida kaavalla 11. On olemassa muitakin menetelmiä ja menetelmien välinen hajonta muodostuu varsin suureksi eli pitkälle meneviä johtopäätöksiä kannattaa välttää. (SGY 2001, 51.)

$$\varphi' = \arctan\left(0,096 + 0,386 \cdot \log\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}}\right)\right) \quad (11)$$

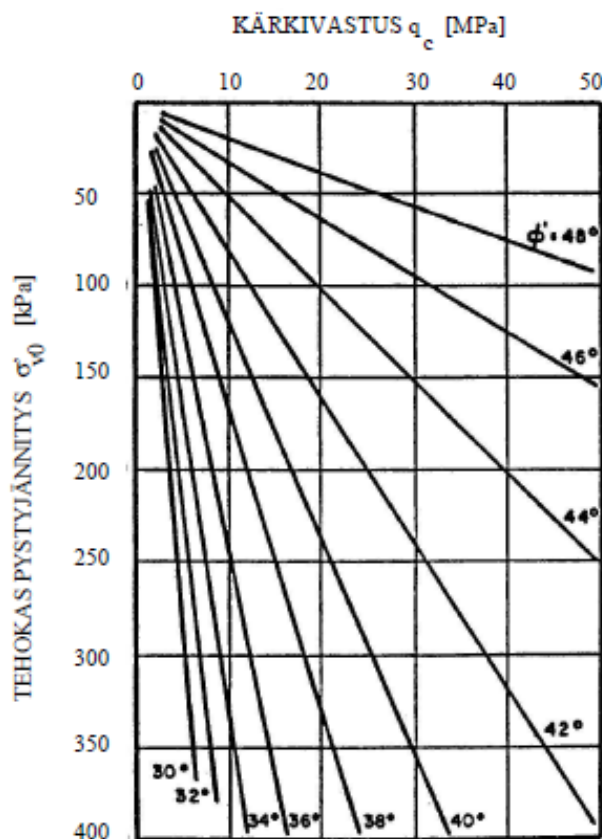
missä

φ' = tehokas kitkakulma [°]

q_c = korjaamaton kärkivastus [kPa]

σ'_{v0} = tehokas pystysuora jännitys [kPa] (SGY 2001, 51.)

Kaavan perusteella on tehty kuva 14, josta voi arvioida kitkakulman likimäärin hiekka-
maassa.



KUVA 14. Kitkakulman ja korjaamattoman kärkivastuksen välinen riippuvuus hiekka-
maassa (SGY 2001, 52).

Suhteellinen tiiviys

Kitkamaan suhteellinen tiiviys voidaan määrittää CPTU-kairauksella ainoastaan normaalikonsolidoituneessa ja suhteellisen tasarakeisessa hiekassa. Tuolloin tuloksien hajonta on normaalisti $\pm 10\%$, mutta hiekkaa karkeammilla mailla on suhteellista tiiviyttä vähennettävä 10–15 %. Suhteellinen tiiviys voidaan laskea kaavalla 12. (SGY 2001, 51.)

$$D_r = -99 + 66 \cdot \log\left(\frac{q_t}{\sqrt{\sigma'_{v0}}}\right) \quad (12)$$

missä q_t = korjattu kärkivastus [kPa]

σ'_{v0} = maassa vallitseva tehokas pystysuora jännitys [kPa]

Suhteellisen tiiviyden kaavat on kehitetty lähinnä laboratorioissa tehtyjen kokeiden perusteella ja siten maastossa mitattuihin arvoihin liittyy epävarmuustekijöitä, joten pitkälle meneviä johtopäätöksiä kannattaa välttää (SGY 2001, 52).

Konsolidaatiojännitys ja ylikonsolidaatioaste

Koheesiomaan konsolidaatiojännitys (σ'_c) voidaan yleisesti määrittää suuntaa-antavasti kaavojen 13 ja 14 avulla. Luotettavamman tuloksen saamiseksi on suositeltavaa käyttää kaavaa 14, jossa on mukana juoksuraja. (SGI 2007, 48 ja Törnqvist, Juvankoski & Tammirinne 2001, 32.)

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{3,43} \quad (13)$$

tai

$$\sigma'_c \approx \frac{q_t - \sigma_{v0}}{1,21 + 4,4w_L} \quad (14)$$

missä q_t = korjattu kärkivastus [kPa]

σ_{v0} = maassa vallitseva pystysuora jännitys [kPa]

w_L = juoksuraja

Ylikonsolidaatioaste voidaan laskea konsolidaatiojännityksen avulla kaavalla 15 (SGI 2007, 48).

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} \quad (15)$$

CPTU-kairaustuloksista ylikonsolidaatioaste voidaan määrittää kaavan 16 avulla ilman konsolidaatiojännityksen määrittystä (Törnqvist ym 2001, 32).

$$\log OCR = 0,167 \cdot \frac{q_t - u}{\sigma'_{v0} \cdot (5,0w_L - 0,6)} - 0,05 \quad (16)$$

missä u = mitattu huokospaine
 q_t = korjattu kärkivastus [kPa]
 σ'_{v0} = tehokas pystysuora jännitys [kPa] (Törnqvist ym 2001, 32).

Muodonmuutosominaisuudet

CPTU-kairauksella voidaan määrittää muodonmuutosominaisuuksia suuntaa antavasti. Varmaa määrittystä ei pystytä tekemään, koska maahan tunkeutuessaan CPTU-kairan kärki aiheuttaa ympäröivään maahan muodonmuutoksia (jatkuva murtotila) ja lisäksi jännitysjakama kärjen ympärillä on vaikeasti ennustettavissa. Muodonmuutosominaisuuksien määrittämisessä käytettävät kertoimet ovat kokemusperäisiä, joten niiden käyttö erilaisissa maaperäolosuhteissa antaa vain suuntaa-antavia arvoja. (Törnqvist ym 2001, 40.)

Saven kokoonpuristuvuusmoduuli (M) voidaan määrittää kaavalla 17.

$$M_i = m_i \cdot q_c \quad (17)$$

missä M_i = vallitsevan tilan kokoonpuristuvuusmoduuli [kPa]
 m_i = empiirinen kerroin
 q_c = korjaamaton kärkivastus [kPa] (SGY 2001, 53.)

Empiirinen kerroin (m_i) määräytyy taulukon 5 mukaan.

TAULUKKO 5. Kertoimen (m_i) määrittäminen taulukosta, jossa (q_n) on nettokärkivastus ja (B_q) huokospainesuhde. (SGY 2001, 53).

m_i	B_q	q_n
2...15	< 0,2	1000...2000
8...12	0,2...0,6	800...1000
5...8	0,6...0,9	500...800

Siltin kokoonpuristuvuusmoduuli (M) voidaan määrittää kaavalla (18).

$$M_i = m \cdot (q_n \cdot p_a)^{0,5} \quad (18)$$

missä $m = 40 \pm 10$
 $p_a = 100 \text{ kPa}$
 $q_n = \text{nettokärkivastus (Törnqvist ym 2001, 41).}$

Hiekan kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan määrittää kaavalla 19.

$$M \approx 14,48 \cdot q_t \left[\frac{(1+2 \cdot K_0)}{300} \right]^{-0,116} \cdot e^{-1,123 \cdot D_r} \quad (19)$$

missä $K_0 \approx 0,45 = \text{maan lepopainekerroin}$
 $q_t = \text{korjattu kärkivastus [kPa]}$
 $D_r = \text{suhteellinen tiiviys}$
 $e = \text{neperin luku (SGI 2007, 58).}$

Muodonmuutosmoduuli E_d voidaan määrittää karkeille maalajeille kaavan 20 mukaan. Menetelmä vastaa ödometrikokeella saatavia arvoja.

$$E_d = k_E \cdot q_c \quad (20)$$

missä $k_E = 2 \text{ maalajin ollessa siHk}$
 $k_E = 4 \text{ maalajin ollessa Hk}$
 $k_E = 8 \text{ maalajin ollessa srHk}$
 $q_c = \text{korjaamaton kärkivastus (SGY 2001, 53.)}$

Muodonmuutosmoduuli E_m (Youngin menetelmä) voidaan interpoloida taulukosta 6 korjaamattoman kärkivastuksen (q_c) suhteen (SGY 2001, 53).

TAULUKKO 6. Muodonmuutosmoduulin E_m määrittäminen (SGY 2001, 53).

Korjaamaton kärkivastus q_c [MPa]	Muodonmuutosmoduuli E_m [MPa]
0	0...10
2,5	10...20
5	20...30
10	30...60
20	60...90

Taulukossa 7 esitetään muodonmuutosmoduulin (E) ja keskimääräisen kairausvastuksen (q_0) välinen riippuvuus hiekassa (Törnqvist ym 2001, 43).

TAULUKKO 7. Muodonmuutosmoduulin ja kärkivastuksen riippuvuus hiekassa (Törnqvist ym 2001, 43).

Kärkivastus CPT q_c (MPa)	Tiivysluokka	Kimmomoduli E (MPa)	Kitkakulma, astetta
0-2.5	hyvin löyhä	<10	29-32
2.5-5.0	löyhä	10-20	32-35
5.0-10.0	keskitiivis	20-30	35-37
10.0-20.0	tiivis	30-60	37-40
>20	hyvin tiivis	60-90	40-42
Moduulin arvot voivat olla silttimaissa 50 % pienempiä ja sorassa 50 % suurempia, kuin taulukossa esitetyt arvot. Ylikonsolidoituneissa maissa moduuli voi olla merkittävästi taulukon arvoja suurempi.			
Kitkakulman arvot pätevät hiekalle. Silttimaissa kitkakulman arvoa pitää pienentää 2° ja sorassa arvoa voidaan suurentaa 2°			

Vedenläpäisevyyden mittaus

CPTU-kairauksella voidaan selvittää haluttujen kerrosten vedenläpäisevyyttä pysäyttämällä kairaus ja tarkkailemalla huokosylipaineen purkautumista. Kerrokset, joista vedenläpäisevyyttä halutaan tutkia, päätetään aikaisemmin tehtyjen puristin- tai CPTU-kairauksen perusteella. (Törnqvist ym 2001, 33.)

Huokospaineen purkautumisen mittaus tehdään pysäyttämällä kairaus haluttuun kerrokseen, kunnes vähintään 50 % kairauksen aiheuttamasta huokosylipaineesta purkautuu. Pysäytys saattaa viedä paljonkin aikaa, sillä luotettavan purkautumiskäyrän (huokosylipaineen purkautuminen havaintoajan funktiona) saaminen saattaa kestää useita tunteja. Tuloksen tulkitsemiseksi tarvitaan luotettava tieto pysäytystasolla vallitsevasta huokospaineesta. (Törnqvist ym 2001, 33.)

Kokeen onnistuminen vaatii kokeen suorittajalta huolellisuutta. Huokospaineanturin ja kärjen suodattimien ja nesteiden ilmanpoisto on tehtävä huolellisesti, sillä niillä on välitön vaikutus tuloksiin. Pysäytyskokeessa käytetään standardikärkeä, jossa huokospainetiehyet ja huokoskivi on täytetty ilmattomalla vedellä. Kärjen tiedonsiirrossa ei suositella käytettävän akustista menetelmää, sillä värähtely häiritsee mittausta. (Törnqvist ym 2001, 33.)

Huokospaineen purkautumisen perusteella voidaan määrittää konsolidaatiokerroin eri menetelmillä. Suositeltavimpia menetelmiä ovat Torstenssonin malli, NHT-malli, MIT-malli ja Oxford-malli. Menetelmät antavat erisuuruisia arvoja, joten suositeltavaa on käyttää vähintään kahta menetelmää. Lisätietoa menetelmistä löytyy Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelman menetelmäkuvaus julkaisusta TPPT 11. (Törnqvist ym 2001, 33.)

Paalun kantavuuden arviointi kärkivastuksen perusteella

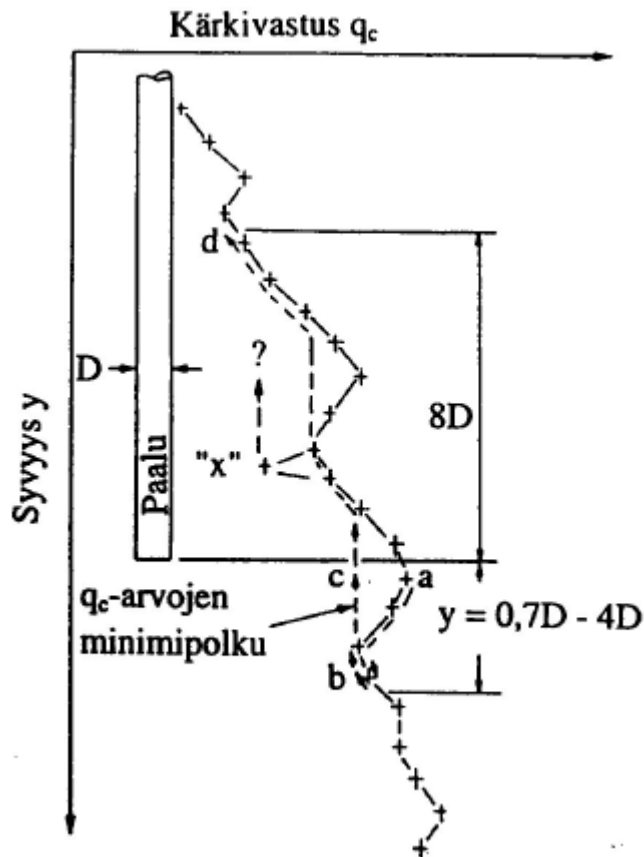
Puristinkairauksen avulla voidaan arvioida paalun kantavuutta laskemalla paalun kärkivastus kaavalla (21). Ennen kaavan käyttöä, on määritettävä kairausdiagrammista minimipolku kuvan 15 tapaan. (SGY 2001, 54.)

Minimipolku on kuvaaja, joka määritetään kairausdiagrammista tietylle syvyydelle tätä syvyyttä alempana sijaitsevien kerrosten minimikairausvastuksena. Minimipolkuperiaatteen käyttäminen pienentää paalun kärkikantavuuden (Q_p) arvioitua arvoa varsinkin maakerroksissa, joissa kärkivastus vaihtelee paljon. (SGY 2001, 54.)

$$Q_p = A_p \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad (21)$$

missä Q_p = paalun kärkikantavuus
 A_p = paalun poikkipinta-ala [m^2]
 q_{c1} = kairan keskimääräinen kärkivastuksen q_c -arvo etäisyydellä y paalun kärjen alapuolella (polku a-b-c kuvassa 15). Arvot (q_c) lasketaan yhteen sekä alaspäin (a-b) käyttäen todellisia q_c -arvoja että ylöspäin (b-c) käyttäen minimipolkusääntöä. q_c -arvot lasketaan välille y ja arvoista käytetään pienintä.

q_{c2} = kairan keskimääräisen kärkivastuksen q_c -arvo matkalla $8D$ kärjen yläpuolella (polku c-d kuvassa y). Minimipolkusääntöä käytetään laskennassa kuten q_{c1} -arvon laskennassa. X-piikit jätetään huomioimatta kitka-
maassa. (SGY 2001, 54.)



KUVA 15. Minimipolkusääntö (SGY 2001, 54).

Paalun kärkivastuksen lisäksi voidaan laskea paalun vaippakitkan osuus kaavoilla 22 ja 23. Kaavojen käyttöön tarvitaan taulukossa 8 esitetyjä arvoja. (SGY 2001, 55.)

$$Q_s = \sum Q_{si} = \sum (f_{si} s_i \Delta l_i) \quad (22)$$

$$f_{si} = \frac{q_{ci}}{\alpha} \leq f_{smax} \quad (23)$$

missä Q_s = paalun vaippakitka murtotilassa (MPa)
 Q_{si} = paalun vaippakitka kerroksessa i (MPa)
 f_{si} = maksimivaippakitka kerroksessa i (MPa)

f_{smax} = maksimivaippakitka riippuen maatyypistä ja CPTU-kärkivastuksesta (MPa)

q_{ci} = kärkivastus q_c kerroksessa i (MPa)

s_i = paalun ympärysmitta (m)

Δ_i = paalun pituus kerroksessa i (m)

α_1 = maatyypistä sekä kärkivastuksesta riippuva korjauskerroin

TAULUKKO 8. Vaippakitkan laskennassa tarvittava kerroin (α) ja (f_{smax}) (SGY 2001, 55).

Maalaji	q_{c1}	Kerroin α_1	f_{smax}
Lieju Pehmeä savi	< 1	30	0,015
Kohtalaisen tiivis savi	1...5	40	0,035
Siltti Löyhä hiekka	≤ 5	60	0,035
Tiivis ja jäykkä hiekka Tiivis siltti	> 5	60	0,035
Kohtalaisen tiivis hiekka Kohtalaisen tiivis sora	5...12	100	0,08
Tiivis ja hyvin tiivis hiekka Tiivis ja hyvin tiivis sora	> 12	150	0,12

2.3.6 Virhelähteet

CPTU-kairauksen onnistuminen edellyttää tarkkaa ja yksityiskohtaista standardien noudattamista niin välineistön kunnon kuin itse kairauksen osalta (SGY 2001, 8). Välineistön kuntoa tarkastettaessa on huomioitava muun muassa kärkikappaleen toleranssit, kairatankojen suoruus, suodattimen kunto, koko ja oikea asennus. Itse kairaussuorituksessa on huomioitava kairauslaitteiston asemointi ja tarvittaessa ankkurointi, ettei laitteisto liiku kesken kairauksen. (SGY 2001, 15-21.)

Kairauksen aluksi on suositeltavaa tehdä alkukairaus kuivakuorikerroksen tai täytekeroksen läpi, sillä kairattaessa niiden läpi CPTU-kairalla on mahdollista, että kärkikappaleen huokostilasta valuu neste maakerrokseen. Nesteen valuttua maakerrokseen tulokseen syntyy epätarkkuutta mitattuihin huokospaineen arvoihin. (SGY 2001, 29.)

EN ISO 22476-1.13 standardissa CPTU-kairauksen epävarmuustekijöiksi mainitaan:

- nolla-arvojen muutokset
- kairan kärjen muodon poikkeamat
- ongelmat datankeräyslaitteissa
- virheelliset kuormituksen arvot johtuen liasta raoissa ja tiivisteissä
- kärjen huono tai tekemätön nestetäyttö
- väärät kalibrointi-arvot (esimerkiksi taipumasta tai vauriosta johtuen)
- joko ympäristöstä tai kairauksesta aiheutuneet lämpötilan muutokset kärjessä

(EN ISO 22476-1.13 2006, 32.)

Vaikka CPTU-kairauksen valmistelut hoidettaisiin ohjeiden mukaan, lämpötilan muutokset voivat silti aiheuttaa virhettä tuloksiin ja ne ovatkin yleisin virhelähde. Lämpötila voi muuttua kairauksen aikana, joko johtuen kairan kärjen ja maan lämpötilaerosta kairauksen alkaessa tai kärjen lämpenemisestä kitkan vaikutuksesta. Kairan kärjen ja maan ollessa aluksi erillämpöisiä tulokset voidaan korjata, mutta kitkan aiheuttamia lämpötilan muutoksia ei voida. (EN ISO 22476-1.13 2006, 32.)

Ohuissa maakerroksissa kairaus aiheuttaa virheellisiä kärkivastuksen arvoja, sillä kairaus vaikuttaa maaperän ominaisuuksiin 5 – 20 kertaa kärjen halkaisijan etäisyydellä sekä ylös- että alapäin. Tästä seuraa, että löyhän maan välissä olevan tiiviin maakerroksen tulee olla 0,4-0,7 m paksu ja tiiviin maan keskellä olevan löyhän maakerroksen tulee olla 0,2-0,4 m paksu, jotta tulokset rekisteröityvät oikein. (SGI, Information 15, 42.)

CPTU-kairaus on Suomessa vielä vähemmän käytetty menetelmä eikä kaikilla kairaajilla ole paljoa kokemusta menetelmästä, joten työnaikaiset virheet ovat mahdollisia. Etenkin kärjen nestekyllästys vaatii huolellisuutta ja ammattitaitoa.

2.4 Menetelmien vertailu

Puristin-heijarikairaus on pehmeissä kerroksissa kerrosrajojen määrittelyssä vähintään yhtä tarkka kuin painokairaus. Kitkamaissa puristin-heijarikairaus antaa paremman kuvan kerrosrajojen vaihteluista ja maan tiiviydestä kuin painokairaus. (SGY 2001, 79.)

Painokairaukseen vaikuttaa yli 10 m syvissä kairauksissa etenkin kivisissä ja tiiviissä kerroksissa suurempi tankokitka kuin puristin-heijarikairaan, joten tulkinnat voivat olla erilaiset. Hyvin tiiviissä maassa, kun painokairaa joudutaan lyömään, on vaikeampi arvioida maan tiiviyyttä. Puristin-heijarikairan tunkeutumissyvyys on pidempi, jolloin pystytään arvioimaan paremmin maakerroksen tiiviyyttä. (SGY 2001, 79-80.)

Määritettäessä puristin-heijarikairauksen perusteella parametreja käytetään paljon CPTU-kairauksessakin käytettäviä tulkintamenetelmiä, jotka perustuvat lähinnä kärkivastukseen. Suurimmat erot CPTU-kairauksen ja puristin-heijarikairauksen välillä ovat datan mittaustavassa ja siinä, että puristin-heijarikairauksessa tankoja pyöritetään koko ajan. CPTU-kairauksessa mittaus tapahtuu suoraan kärjessä, milloin tankokitkaa ei tarvitse huomioida erikseen tuloksissa puristin-heijarikairauksen tapaan. Tankokitkan vaikutus tuloksiin nähdään etenkin kairattaessa yli 10 metrin syvyyteen. Kyseisten menetelmien vaippakitkat eivät myöskään vastaa toisiaan erilaisten mittaustapojen takia. Puristin-heijarikairauksen nettokärkivastus (q_n) vastaa kohtuullisen hyvin CPTU-kairauksen korjaamatonta kärkivastusta (q_c), jos nettokärkivastus lasketaan kaavalla 2. Puristin-heijarikairauksella päästään keskimäärin syvemmälle jo puristusvaiheessa kuin CPTU-kairauksella tankojen pyörittämisen ja niiden pienemmän halkaisijan ansiosta. (SGY 2001, 79.)

Pohjatutkimusmenetelmillä tutkittavat maan geotekniset ominaisuudet ovat seuraavan sivun taulukossa 9.

Kairausmenetelmien työsaavutukset vaihtelevat menetelmäkohtaisesti erilaisissa olosuhteissa. Työvuoron työsaavutukset on lueteltu liitteen 1 taulukossa. (Tiehallinto 2008, 8.)

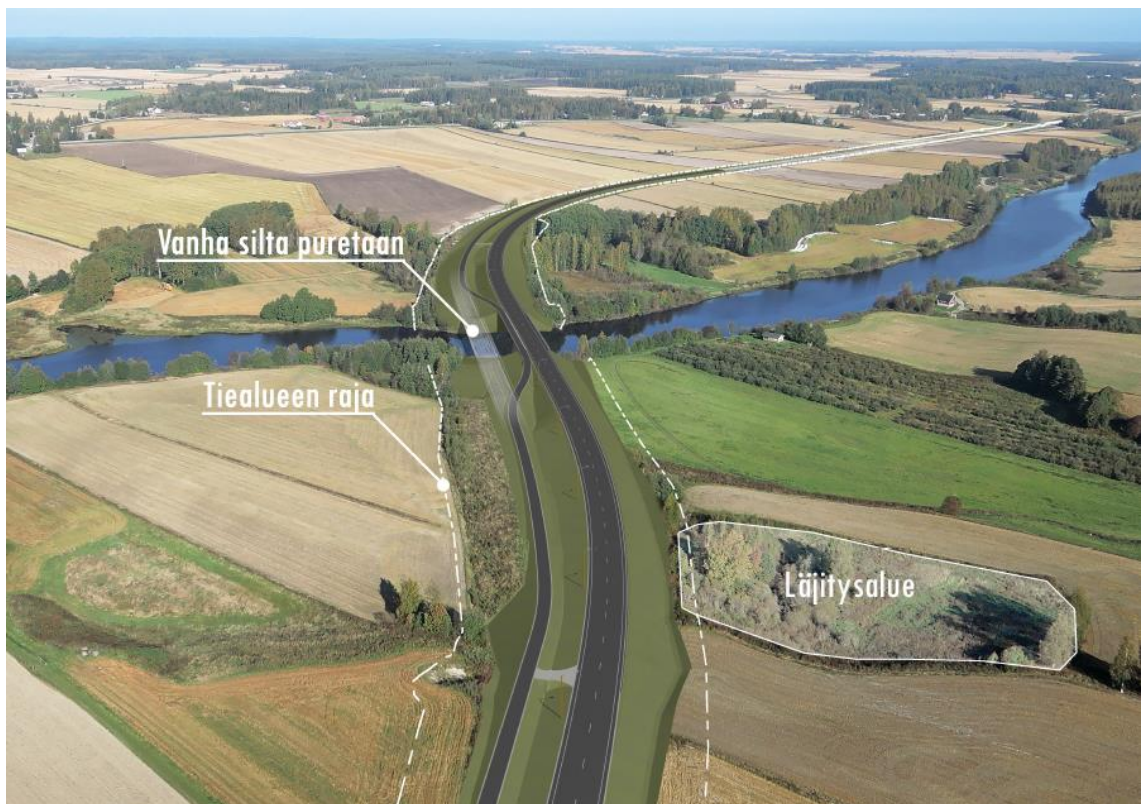
TAULUKKO 9. Pohjatutkimusmenetelmien soveltuvuus maan ominaisuuksien määrittämiseen (Tiehallinto 2008, 29).

	Maalaji	Kerrosten laajuus	Pohjaveden korkeustaso	Huokosvedenpaine	Irtotiheys	Leikkauslujuus	Kokoonpuristuvuus	Vedenläpäisevyys
Kenttäkokeet								
CPTU	C2 F2 M3	C1 F1 M3	C2 M3	C2 F2 M3	C2 F2 M3	C2 F2 M3	C1 F2 M3	C3 F2 M3
Painokairaus	C3 F3 M3	C3 F2 M3			C3 F3 M3	C2 F3	C2 M3	
Puristin- heijarikairaus	C2 F2 M2	C1 F1 M1			C2 F2 M2	C2 F2 M3	C1 F2 M3	
Soveltuvuus								
C1 Hyvin karkearakeiselle maalle								
C2 Keskinkertaisesti karkearakeiselle maalle								
C3 Huonosti karkearakeiselle maalle								
F1 Hyvin hienorakeiselle maalle								
F2 Keskinkertaisesti hienorakeiselle maalle								
F3 Huonosti hienorakeiselle maalle								
M1 Hyvin moreenille								
M2 Keskinkertaisesti moreenille								
M3 Huonosti moreenille								

3 CASE VT 3, KYRÖNJOEN SILTA

3.1 Yleistä kohteesta

Kyrönjoen silta sijaitsee valtatie 3:lla lähellä Kurikan ja Ilmajoen rajaa. Kyrönjoen ylittää vanha, huonokuntoinen silta, jonka viereen rakennetaan uusi silta ja vanha puretaan. Samalla tien geometriaa parannetaan. Kuvassa 16 on havainnekuva kohteesta. Alueella tehtiin pohjatutkimukset tielinjan ja sillan rakennussuunnittelua varten.



KUVA 16. Havainnekuva kohteesta etelästä pohjoiseen. (FINNMAP Infra Oy 2014).

Kyrönjoki virtaa kyseisellä kohdalla syvässä uomassa ja tiedetään, että alueella on paineellista pohjavettä, joka tulee asettamaan haasteita pohjatutkimuksien tekemiselle ja tulkinnalle, sekä myöhemmin sillan rakentamiselle. Joen pohjoispuolella on tulva-alue, jonne vesi nousee joen tulviessa, mutta maakerrosten muodon takia alue ei kuivu kunnolla. Joen eteläpuolella on myös tulva-alue, mutta sieltä vesi pääsee virtaamaan pois joen pinnan laskiessa. Maaperästä tiedetään vanhojen tutkimusten perusteella, että päälimmäisenä on savea ja silttiä sisältäviä kerroksia ja niiden alla kitkamaakerroksia.

Pohjatutkimuksissa käytettiin kairausmenetelminä paino-, puristin-heijari-, CPTU-, porakone- ja siipikairauksia. Lisäksi alueelta otettiin maanäytteitä, asennettiin pohjaveden tarkkailuputkia, sekä huokospainekärkiä.

Pohjatutkimukset aloitettiin syksyn 2013 aikana kuivilta alueilta ja viimeiset maalla tehdyt tutkimukset tehtiin tammikuussa 2014. Joen keskellä aloitetaan tutkimukset laualta kevään 2014 aikana. Pohjatutkimusohjelman keskeiset osat ovat liitteessä 4.

3.2 Tulokset

Pohjatutkimusten perusteella huomataan, että luvussa 3.1. esitetyt oletukset maalajeista ovat paikkansapitäviä. Alueella on päällimmäisenä kuivakuorisilttikerros, jonka alla on hyvin pehmeää savea. Saven alla on silttiä ja paikoitellen silttikerroksessa on ohuita kerroksia hiekkaa tai silttistä hiekkaa. Siltin alla on hiekkaa ja lopulta moreenia. Alueella suoritettujen CPTU-kairausten pituus vaihteli noin kymmenestä metrillä kahdeksanteen metrin.

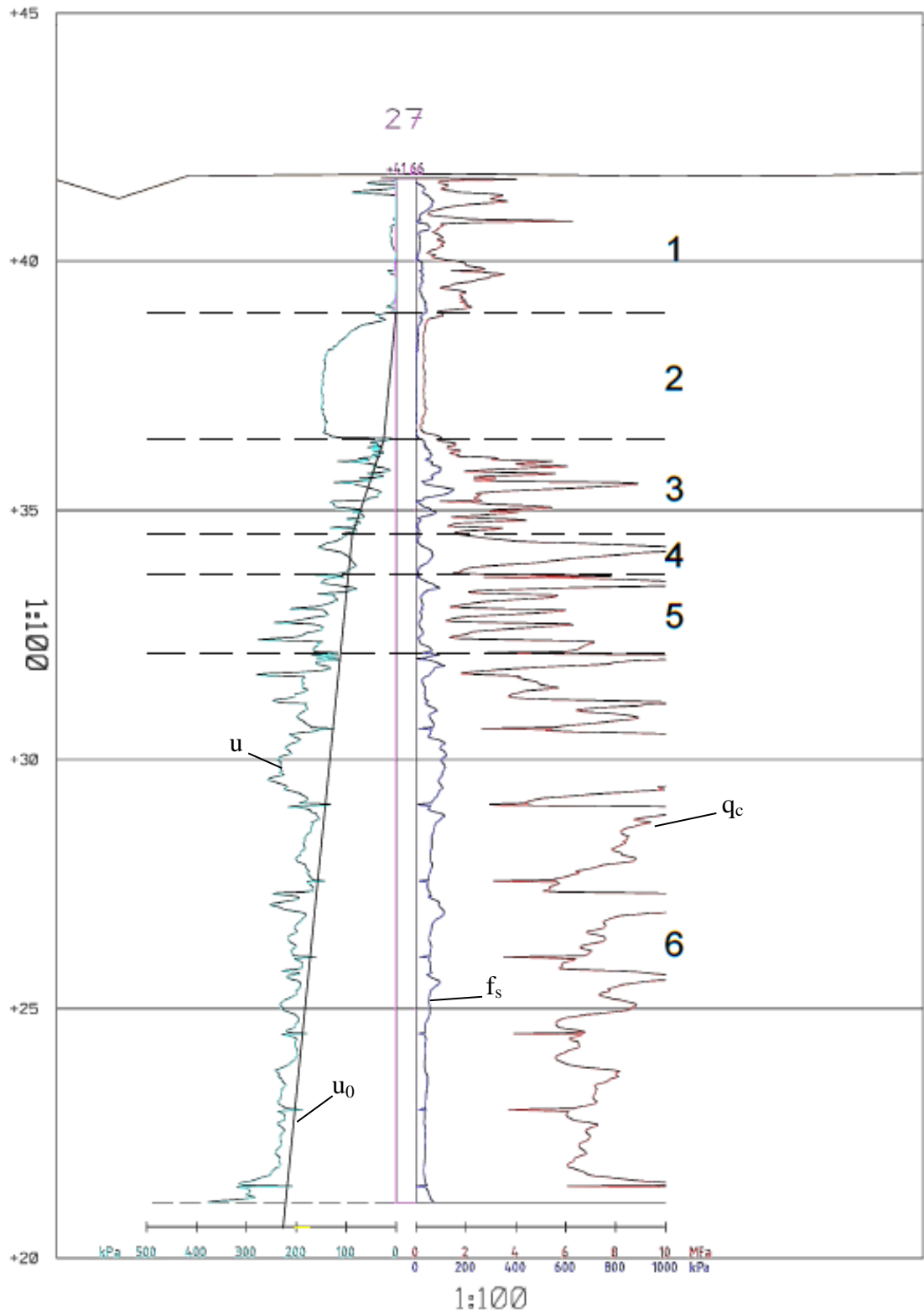
CPTU-kairausdiagrammien perusteella tehdään arviot maalajirajoista, joita verrataan myös puristin-heijari- ja painokairauksiin. Maalajeista arvioidaan luvussa 3.2.1 joitakin parametreja ja verrataan niitä laboratoriosta saatuihin arvoihin. Luvussa 3.2.2 verrataan CPTU-kairausta, puristin-heijarikairausta ja painokairausta.

Alueelle tyypillisen paineellisen pohjaveden vaikutus CPTU-kairaustuloksiin saadaan poistettua käyttämällä korjatun kärkivastuksen (q_c) ja vaippavastuksen (f_t) laskennassa mitattuja huokospaineen arvoja luvussa 2.3.2 esitetyissä kaavoissa 5 ja 6. Jos korjaus jätettäisiin tekemättä, kärkivastuksen (q_c) ja vaippavastuksen (f_c) arvot olisivat suuremmat kuin todellisuudessa. Korjaus on tarpeen tehdä, kun halutaan selvittää maaperäparametreja laskemalla CPTU-kairausten tuloksista, kuten luvussa 3.2.1 tullaan tekemään.

3.2.1 Maalajirajat ja parametrit

CPTU-kairausdiagrammien perusteella voidaan tehdä arviot maakerrosrajoista. Kaikkien CPTU-kairausten kairausdiagrammit on esitetty maalajiraja-arvioineen liitteessä 2.

Alla olevassa kuvassa 17 on diagrammissa esimerkkitulkinta maalajirajoista kairauspisteestä 27. Kuvassa on lisäksi vasemmalle puolelle piirrettyä massa vallitsevaa huokospainetta kuvaava viiva (u_0).



KUVA 17. Maalajirajat CPTU-kairausdiagrammissa (FINNMAP Infra Oy 2014).

Kuvan 17 diagrammin perusteella huomataan, että maan pinnasta noin 2,8 metrin syvyyteen on kuivakuorikerros (kerros 1), jonka alla 5,2 metrin syvyyteen pehmeä savi-kerros (kerros 2). Savikerroksen tunnistaa pienistä vaippakitkan ja kärkivastuksen arvoista, sekä siitä, että kummassakin arvossa on vain pientä muutosta. Samalla mitattu huokospaine on huomattavasti suurempi kuin maassa vallitseva huokospaine, mikä taas kuvastaa saven huonoa vedenjohtokykyä.

Savikerroksen alla on 7,1 metrin syvyyteen silttikerros (kerros 3), jonka tunnistaa kärkivastuksen suuresta ja terävästä vaihtelusta. Siltille on ominaista myös savea suurempi vaippakitka, jossa on usein myös liikehdintää. Siltissä huokospaine laskee rajusti kärkivastuksen kasvaessa ja se käy usein myös maassa vallitsevaa huokospainetta pienemmässä arvossa, jolloin huokospainemittariin saattaa syntyä imu.

Silttikerroksen alla on ohut karkearakeisempi maakerros 7,9 metrin syvyyteen, luultavasti hiekkaa tai siltistä hiekkaa (kerros 4). Kerroksen tunnistaa kärkivastuksen ja vaippakitkan kuvaajien loivemmista muutoksista.

Karkeamman kerroksen alla on siltiä 9,5 metrin syvyydelle (kerros 5), jonka jälkeen on hiekkaa kairauksen päättymiseen asti (kerros 6). Hiekassa kärkivastuksen ja vaippakitkan muutokset ovat rauhallisempia kuin siltissä, sekä kärkivastuksen arvot voivat olla suurempia. Hiekassa myös huokospaineen muutokset ovat rauhallisempia kuin siltissä ja huokospaine on lähempänä maassa vallitsevaa painetta.

Pisteen 27 kairausdiagrammissa hiekkakerroksessa olevat terävät piikit johtuvat kairauksen pysähdyksistä, jotka johtuvat todennäköisesti kairatankojen lisäyksestä. Sama ilmiö on nähtävissä myös muissa alueella tehdyissä CPTU-kairauksissa. Parametrien määrittämistä varten ko. arvot voidaan jättää huomiotta.

Luvussa 3.2.2 on kuvassa 22 leikkaus, jossa näkyy pisteen 27 rinnakkaisia kairauksia samalta paalulta. Kuvasta voi varmistaa maalajirajojen paikkansapitävyyttä etenkin toisen CPTU-kairauksen (piste 29) suhteen.

Tehdään vielä maalajimääritys luvussa 2.3.4 esitetyn menettelyn mukaisesti kairauspisteelle 27. Laskennassa käytetään pinta-alakertoimina $a=0,8$ ja $b=0$, koska tarkempia kertoimia ei ole saatavilla. Kertoimet ovat kärkikohtaisia ja ne ilmoitetaan yleensä kär-

jen kalibrointitodistuksessa. Esimerkkikohteessa oli käytössä Geomil equipmentin valmistama kärki, jonka kalibrointitiedoissa ei ollut mainittu kertoimia. Geomil equipment kuitenkin ilmoittaa mallistossaan kertoimista yleisesti, että $a \approx 0,8$ ja $b \approx 0$. Taulukossa 10 on maalajimäärittämissä käytetyt lähtöarvot kerroksittain kairauspisteessä 27. Arvot ovat kerroskohtaisia keskiarvoja, joista on poistettu vakiopoikkeamaa suuremmat arvot.

TAULUKKO 10. Laskennassa käytettävät lähtöarvot kerroksittain.

	1	2	3	4	5	6
qt [Mpa]	1,4	0,3	2,7	5,5	4,5	7,3
ft [kPa]	23	2,1	48,8	24,6	22,4	51,4
γ [kN/m ³]	21 ¹⁾	19,7 ¹⁾	19,0 ²⁾	20,0 ²⁾	19,5 ²⁾	20,0 ²⁾
1) Laboratoriokokeista						
2) Arvio						

Lasketaan normalisoitu nettokärkivastus kaavalla 24 ja kitkaa kuvaava parametri kaavalla 25. Parametrit lasketaan jokaiselta mittausvytyydeltä, minkä jälkeen määritetään ko. parametrin keskiarvo kussakin kerroksessa siten, että keskiarvosta poistetaan vakiopoikkeaman ulkopuolelle jäävät arvot.

$$\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (24)$$

missä q_t = korjattu kärkivastus
 σ_{v0} = maassa vallitseva pystyjännitys (= $\gamma \cdot z$)
 σ'_{v0} = maassa vallitseva tehokas pystyjännitys (= $\sigma_{v0} - u$)

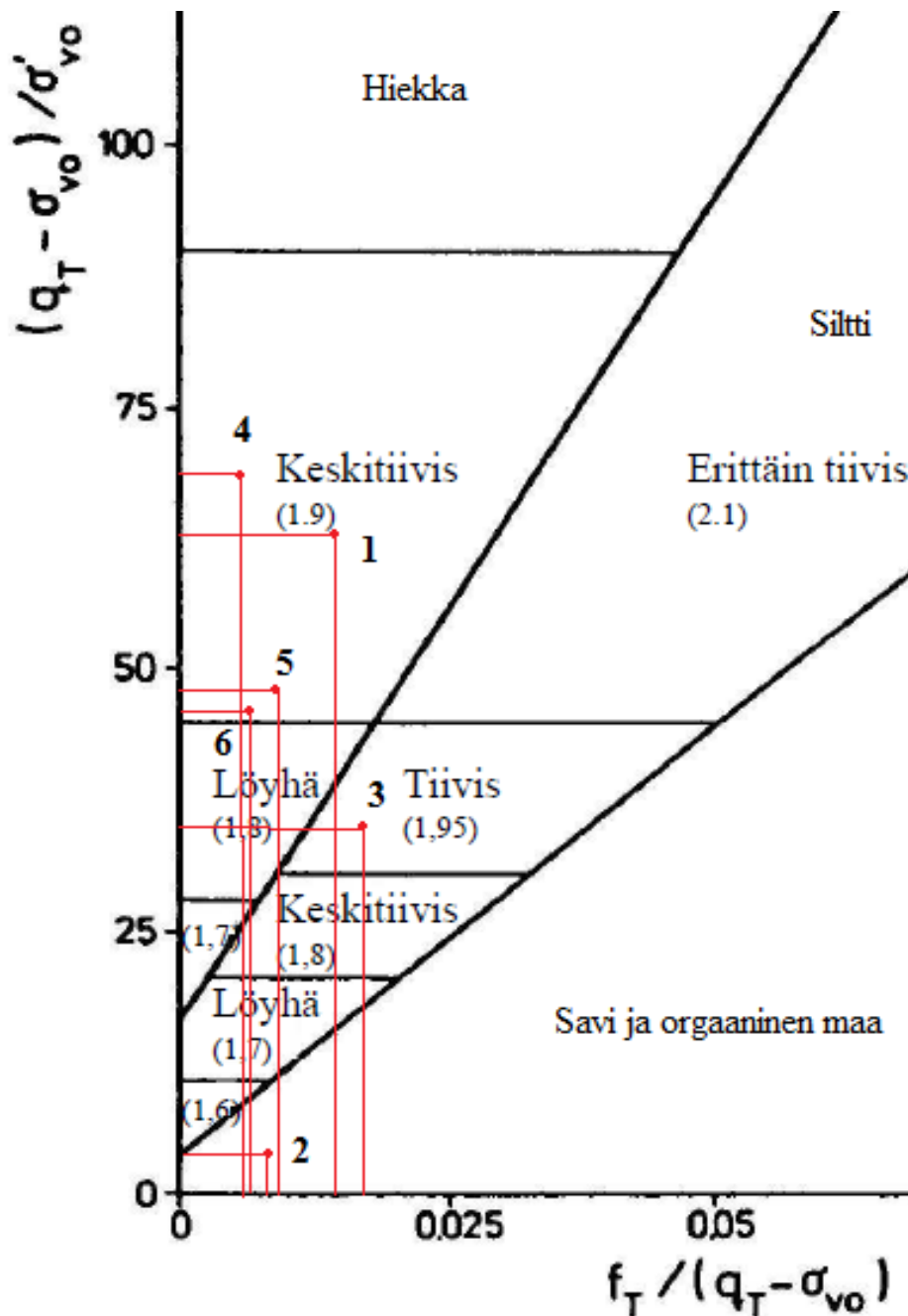
$$\frac{f_t}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (25)$$

missä f_t = korjattu kitkavastus (SGY 2001, 46).

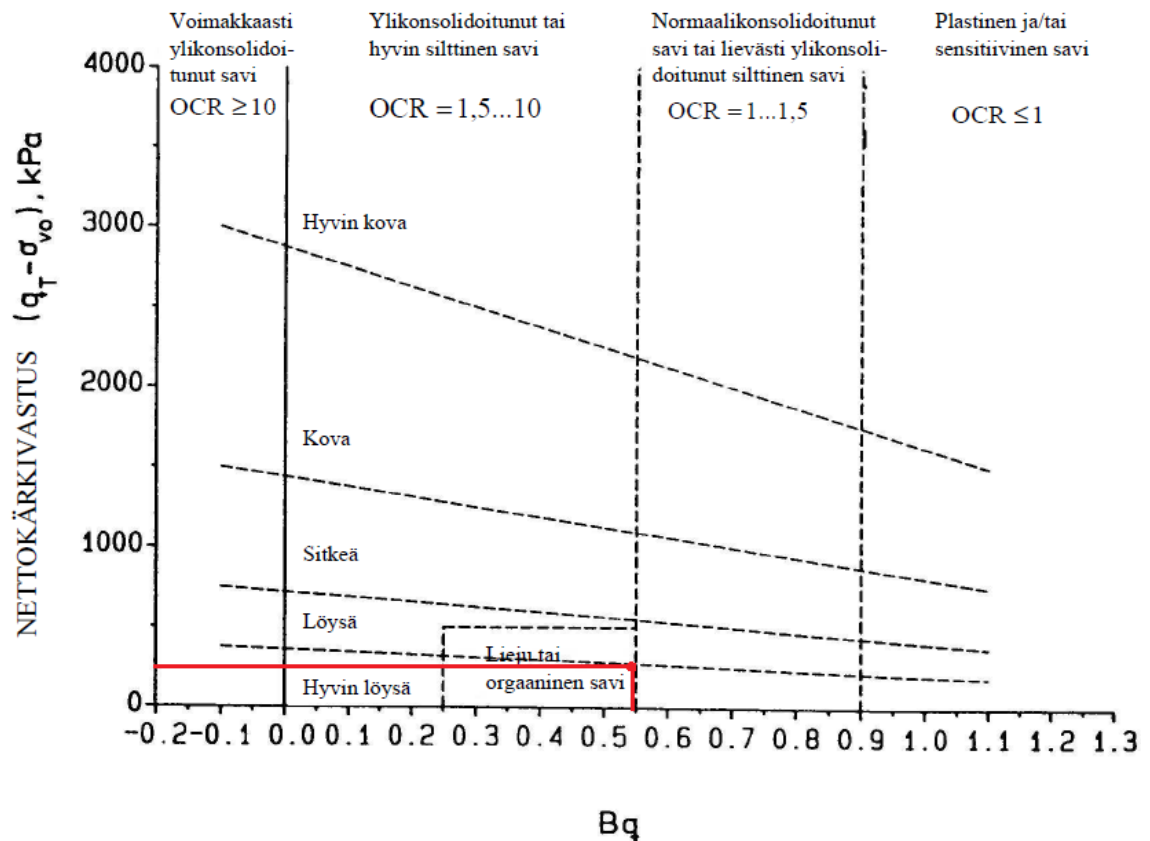
Kunkin kerroksen maalajimäärittämissä tarvittavat parametrit ovat taulukossa 11. Taulukossa on lisäksi kuvan 18 mukaiset maalajitulkinat. Kerros 2 on tulkinnan mukaan savea tai orgaanista maata, jolloin tulkintaa voidaan tarkentaa huokospainesuhteen (B_q) ja nettokärkivastuksen (q_n) avulla kuvan 19 mukaisesti. Kerroksen 2 maalajiksi saadaan tällöin lieju tai orgaaninen savi. Taulukossa on myös maalajitulkinat maanäytteen perusteella.

TAULUKKO 11. Maalajimääritys kairauspisteessä 27.

Kerros	$(q_T - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$	$f_T / (q_T - \sigma_{v0})$	B_q	q_n	Tulkinta kuvista 18 ja 19	Näytteen perusteella
1	63	0,015			Keskitiivis hiekka	Siltti
2	4,8	0,01	0,51	217,7	Savi tai orgaaninen maa	Savinen siltti
3	39,6	0,018			Tiivis siltti	Siltti
4	64	0,007			Keskitiivis hiekka	Siltti
5	46,6	0,006			Keskitiivis hiekka	Siltti
6	43,5	0,007			Löyhä hiekka	Hieno hiekka



KUVA 18. Maalajimääritys kairauspisteessä 27 (SGY 2001, 47).



KUVA 19. Kerroksen 2 tarkempi maalajimääritys kairauspisteessä 27. (SGY 2001, 48).

Kerrokset 5 ja 6 ovat keskittiiviin hiekan ja löyhän hiekan rajapinnassa, mutta kun otetaan huokospainekuvaaja huomioon, kerros 5 on luultavammin silttiä nopeammin muuttuvien ja korkeampien huokospainearvojen perusteella. Kerros 6 on todennäköisemmin hiekkaa kuin silttiä huokospaineen perusteella.

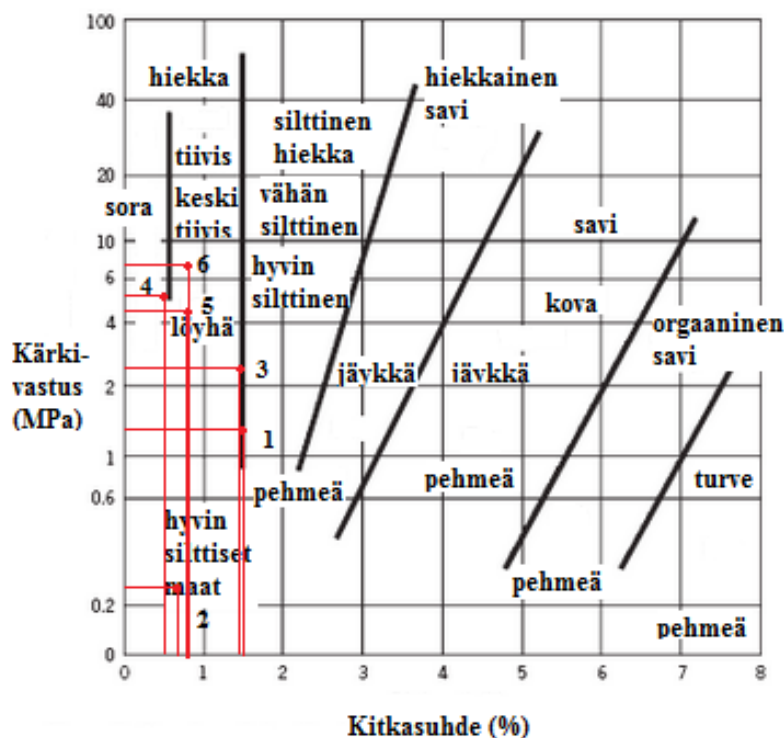
Yleisesti taulukosta 11 huomataan maalajimäärityksen antavan karkeampia maalajeja kuin mitä näytetulokset osoittavat.

Alustava maalajimääritys voidaan tehdä myös kitkasuhteen avulla. Menetelmän etuna on se, että siinä ei tarvitse tehdä oletuksia maaperäominaisuuksista, kuten tilavuuspainosta. Taulukossa 12 on maalajimäärityksen lähtöarvot ja tulkinnat kuvan 20 perusteella. Taulukossa kärkivastuksen (q_c) ja kitkasuhteen (R_f) arvot ovat kerroskohtaisia keskiarvoja, joista on poistettu vakiopoikkeamaa suuremmat arvot. Taulukossa on myös maanäytteiden perusteella tehdyt maalajitulkinnot eri kerroksissa.

TAULUKKO 12. Maalajimääritys kitkasuhteen (R_f) ja kärkivastuksen (q_c) perusteella.

	q_c [MPa]	R_f [%]	Tulkinta kuvasta 20	Näytteen perusteella
1	1,4	1,65	Silttinen hiekka	Siltti
2	0,3	0,63	Siltti	Savinen siltti
3	2,7	1,57	Silttinen hiekka	Siltti
4	5,5	0,47	Sora	Siltti
5	4,5	0,72	Hiekka	Siltti
6	7,3	0,71	Hiekka	Hieno hiekka

Taulukosta 12 ja kuvasta 20 huomataan, että maalajimääritys kitkasuhteen avulla antaa maalajeiksi karkeampia maalajeja, kuin laboratoriokokeet.



KUVA 20. Maalajimääritys kitkasuhteen avulla kairauspisteessä 27 (Brouwer 2007).

Lasketaan seuraavaksi parametreja eri kerroksissa kairauspisteessä 27 kohdalla. Vertailuun käytetään samasta pisteestä otettuja näytteitä. Parametrit lasketaan jokaisesta mitaussyvyydestä, joista lasketaan keskiarvo, josta poistetaan poikkeaman ulkopuolelle jääneet arvot. Parametrit pisteessä 27 on esitetty taulukossa 13 ja alla on esimerkkilaskut kustakin selvitettävästä parametrilla. Esimerkkilaskujen syvyydet ovat määrättyneet sattumanvaraisesti niistä maakerroksista, joihin kulloinkin määrittävän parametrin määritystapa soveltuu.

Lasketaan suljettu leikkauslujuus syvyydellä 3,92 m kaavalla 9, jossa $N_{\Delta u}$ on kairausoppaan VI suosituksen mukaisesti 16,3.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} = \frac{314,8 \text{ kPa} - 80,8 \text{ kPa}}{16,3} = 14,4 \text{ kPa} \quad (9)$$

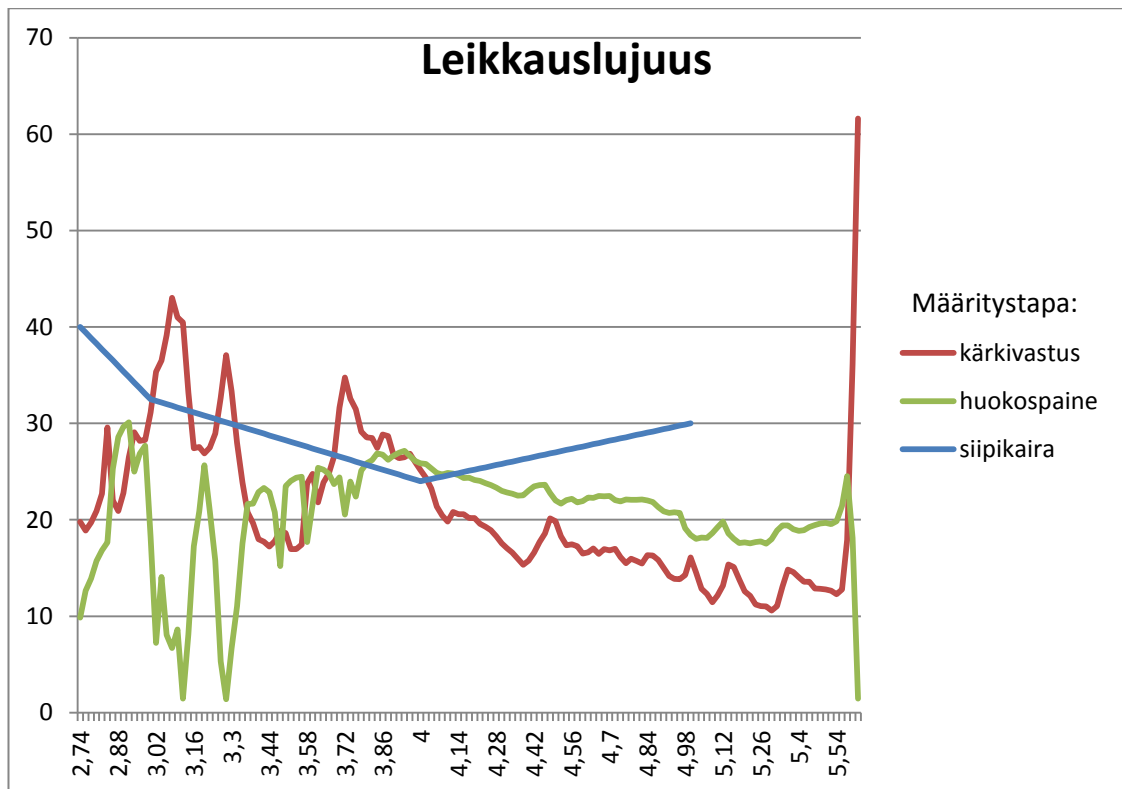
Laskettaessa koko kerroksen 2 leikkauslujuuden arvoa lasketaan koko kerroksen leikkauslujuuksien keskiarvo ja poistetaan siitä vakiopoikkeaman ulkopuolelle jääneet arvot. Tällöin saadaan koko kerroksen leikkauslujuuden arvoksi 13,4 kPa. Laboratoriotulosten mukaan häiriintymättömän näytteen leikkauslujuus on samalla syvyydellä 26,8 kPa. Viereisen tutkimuspisteen siipikairaus antaa saman leikkauslujuuden kuin kartiokoe. Huomataan, että kaavan antama tulos ei ole erityisen luotettava.

Tarkastellaan myös huokospaineen avulla laskettavaa leikkauslujuuden arvoa samalla syvyydellä. Laskennassa käytetään kaavaa 10.

$$S_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} = \frac{146,1 \text{ kPa} - 24,8 \text{ kPa}}{16,3} = 7,4 \text{ kPa} \quad (10)$$

Kun koko kerroksen keskiarvoista poistetaan vakiopoikkeaman ulkopuolelle jääneet arvot, saadaan koko kerroksen leikkauslujuudeksi 6,8 kPa. Jos kokeillaan luvussa 2.3.5 kerrotun mukaisesti sijoittaa jakajaan arvoja, joilla saataisiin molemmilla menetelmillä lasketut arvot vastaamaan toisiaan ja laboratoriotuloksia, ei saada menetelmien välille selvää yhteyttä.

Pisteessä 29, mistä on saatavilla myös siipikairaustulokset, voidaan verrata huokospaineen, sekä kärkivastuksen avulla laskettuja leikkauslujuuden arvoja siipikairaustuloksiin. Kuvasta 21 huomataan, että selvää yhteyttä menetelmien välillä ei ole. Jotta käyrät on saatu edes lähelle toisiaan, on kertoimina käytetty: $N_{\Delta u} = 7,5$ ja $N_{kt} = 14$.



KUVA 21. Leikkauslujuudet pisteessä 29. Vaaka-akselilla on syvyys [m] ja pystyakselilla leikkauslujuus [kPa].

Tämä leikkauslujuuden määrittäminen ei toiminut tässä luultavasti siksi, että maa on liian silttistä.

Lasketaan kitkakulma pisteessä 27 syvyydellä 7,14 m kaavalla 11.

$$\varphi' = \arctan\left(0,096 + 0,386 \cdot \log\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}}\right)\right) \quad (11)$$

$$\varphi' = \arctan\left(0,096 + 0,386 \cdot \log\left(\frac{1948 \text{ kPa}}{75,5 \text{ kPa}}\right)\right) = 32,7^\circ$$

Koko kerroksen 4 kitkakulmaksi saadaan 38° . Luku on hieman yläkanttiin, sillä keskiarvoon hiekan kitkakulma on normaalisti $33\text{--}35^\circ$ välillä (Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet 2001, liite 5 10/29).

Tarkastellaan kerroksen 2 konsolidaatiojännitystä ja ylikonsolidaatioastetta. Lasketaan konsolidaatiojännitys syvyydellä 3,9 m kaavalla 13. Samalta syvyydeltä on olemassa myös punttiödometrin antama konsolidaatiojännitys.

$$\sigma'_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{3,43} = \frac{323 \text{ kPa} - 80 \text{ kPa}}{3,43} = 70,6 \text{ kPa} \quad (13)$$

Ödometrikokeella Kotziaksen menetelmällä konsolidaatiojännitykseksi on saatu 74,3 kPa ja numeerisella sovituksella 98,1 kPa. Tulos on Kotziaksen menetelmään verrattuna suuruusluokaltaan oikea, mutta pitkälle meneviä johtopäätöksi kannattaa välttää. Koko kerroksen konsolidaatiojännitykseksi saadaan 62,0 kPa.

Lasketaan ylikonsolidaatioaste syvyydellä 3,88 m kaavalla 15.

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} = \frac{67,2 \text{ kPa}}{48,9 \text{ kPa}} = 1,4 \quad (15)$$

Koko kerroksen 2 ylikonsolidaatioasteeksi saadaan 1,3. Tulosta ei voida pitää kovin luotettavana, sillä jo konsolidaatiojännityksen tuloksessa on epävarmuutta.

Lasketaan kokoonpuristuvuusmoduuli M kerroksessa 2 syvyydellä 3,9 m käyttämällä savelle tarkoitettua kaavaa 17, jossa m_i katsotaan taulukosta 4.

$$M_i = m_i \cdot q_c = 8 \cdot 352 \text{ kPa} = 2816 \text{ kPa} \quad (17)$$

Vastaavalla syvyydellä ödometrikokeen perusteella laskemalla saadaan $M = 2945 \text{ kPa}$, kun $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ (numeerisella sovituksella). Jos $\sigma'_c = 74 \text{ kPa}$ (Kotziaksen menetelmällä), tulokseksi saadaan $M = 2605 \text{ kPa}$. CPTU-kairaustuloksista laskemalla saatiin $\sigma'_c = 71 \text{ kPa}$, joten Kotziaksen menetelmällä ratkaistu konsolidaatiojännitys olisi paremmin linjassa CPTU-kairauksen avulla määritetyn jännityksen kanssa. Huomataan, että epävarmuustekijöitä on useita, joten tuloksiin on suhtauduttava varauksella. Tarkemmat laskut ovat liitteessä 3.

Kokoonpuristuvuusmoduulin (M) arvot muissa kerroksissa ovat taulukossa 13. Muiden kerrosten arvoja ei päästy vertaamaan muilla menetelmillä määritettyihin arvoihin, joten niiden luotettavuuteen ei tässä työssä oteta kantaa.

Lasketaan muodonmuutosmoduuli E_d kerroksessa 4 syvyydellä 7,92 m kaavalla 20.

$$E_d = k_E \cdot q_c = 4 \cdot 1,948 \text{ MPa} = 7,792 \text{ MPa} \quad (20)$$

missä $k_E = 4$, kun maalaji on hiekka

Koko kerroksen keskimääräiseksi muodonmuutosmoduuliksi E_d saadaan 22,0 MPa. Tulosta voidaan pitää kyseisessä kerroksessa melko luotettavana, sillä Tiehallinnon julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan keskitiiviin hiekan muodonmuutosmoduulin E_d tulee olla 20 -30 MPa ja nyt kun kärkivastus on kerroksessa keskimäärin 5,6 MPa tulee E_d :n olla lähempänä arvoa 20 MPa. (Tiehallinto 1999, 9.)

Arvioidaan kitkamaan suhteellista tiiviyyttä kerroksessa 4 syvyydellä 7,14 m kaavalla 12.

$$D_r = -99 + 66 \cdot \log\left(\frac{q_t}{\sqrt{\sigma'_{vo}}}\right) = -99 + 66 \cdot \log\left(\frac{1927}{\sqrt{75,5}}\right) = 56,8 \% \quad (12)$$

Koko kerroksen 4 suhteelliseksi tiiviydeksi saadaan 84,1 %. Tiiviysluokittelussa kerros 4 tulkittaisiin tiiviiksi, vaikka maalajimäärityksen mukaan kyseessä on keskitiivis hiekka (Jääskeläinen 2001, 52). Tulokseen tulee suhtautua suurella varauksella. Käytettävä kaava soveltuu parhaiten kitkamaille, joten taulukossa 13 olevat silttikerrosten arvot ovat erittäin viitteellisiä.

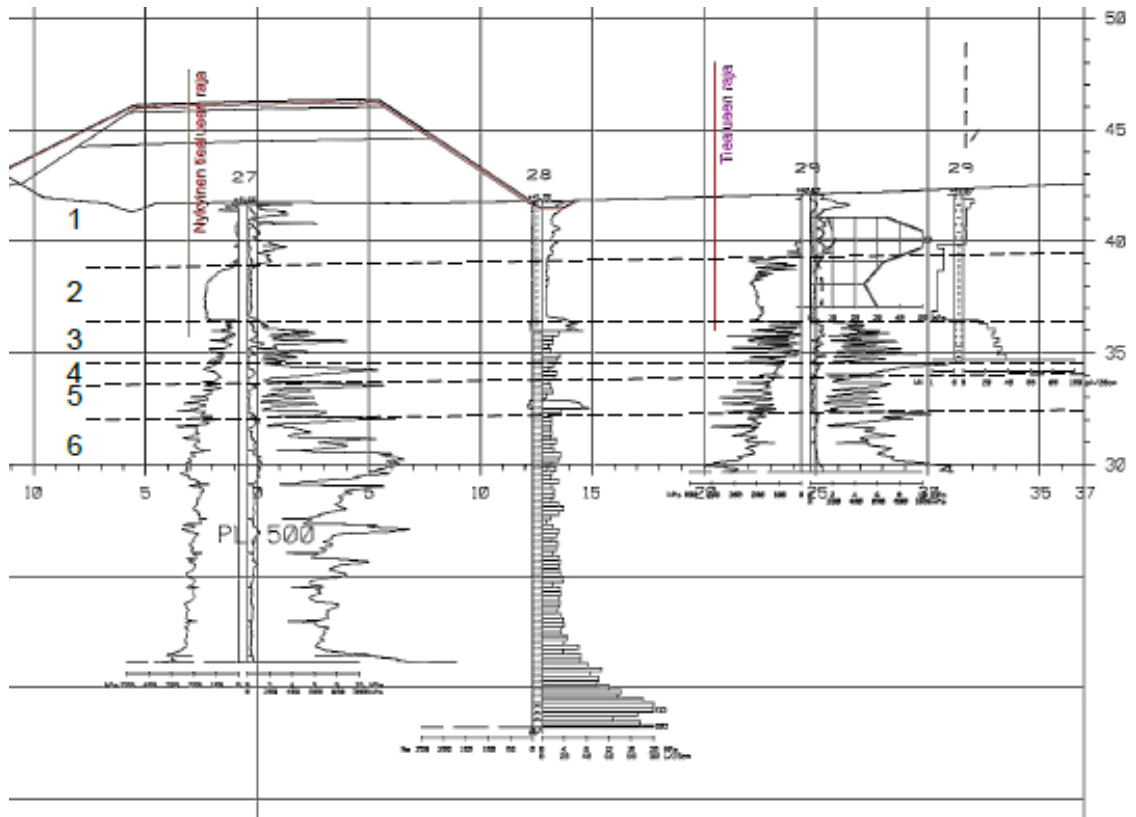
Kaikkien kerrosten parametrit kairauspisteessä 27 ovat taulukossa 13. Arvot ovat keskiarvoja, joita laskettaessa laskennan ulkopuolelle on jätetty keskihajonnan ulkopuoliset arvot.

TAULUKKO 13. Kairauspisteen 27 parametrit kerroksittain niistä kerroksista, joihin määrittäminen soveltuvat.

	su (u) kPa	su (qt) kPa	φ °	M kPa	E_d MPa	D_r %	Rf %	σ'_c kPa	OCR
1					2,8		1,65		
2	6,8	13,1		2563			0,63	62	1,3
3			35,5	20337	5,4		1,57	752	6,5
4			38,4	53478	22,0	84,1	0,47		
5			36,6	26130	9,0	77,1	0,72		
6			36,8	73484	29,3	84,7	0,71		

3.2.2 CPTU-HP-PA -vertailu

Tässä luvussa vertaillaan CPTU- ja puristin-heijarikairaustuloksia käyttämällä leikkauskuvaa. Leikkauskuvassa (kuva 22) on pisteessä 27 suoritettu CPTU-käiraus, pisteessä 28 puristin-heijarikäiraus ja pisteessä 29 on CPTU-, paino- ja siipikäiraus.



KUVA 22. Maalajirajat leikkauskuvassa kairauspisteiden 27 kohdalla (FINNMAP Infra Oy 2014).

Kuvasta huomaa, että CPTU-käiraus on tarkin menetelmä maalajirajojen määrittämiseen. Puristin-heijarikäirauksen puristinvaiheen tuloksista huomaa maalajirajat melko hyvin ja rajat vastaavat CPTU-käiraustuloksista määritettyjä maalajirajoja.

Puristin-heijarikäirauksen heijarivaiheesta maalajirajojen määrittäminen on hyvin haastavaa näin hienorakeisessa maassa. Tämä näkyy leikkauskuvassa siten, että CPTU-käiraustuloksessa näkyvä hiekkaisempi kerros silttikerroksen keskellä ei erotu heijarivaiheesta mitenkään. Maalajimuutosta siltistä hiekaksi ei myöskään huomaisi, ellei siltissä olisi kokeiltu välillä kairata puristamalla.

Painokairaus korreloi melko hyvin CPTU-kairauksen kanssa, kuten leikkauskuvasta (kuva 22) näkee. Kuivakuorikerroksen alareunan huomaa hyvin, kun painokairaus vaihtuu painojen puolelle, saman huomaa myös CPTU-kairauksen kärkivastuksen pienene- misestä ja huokospaineen kasvusta. Savikon alla maalajin muuttuessa silttiseksi paino- kairaus menee jälleen kiertämisen puolelle ja samalla CPTU-kairauksen kärkivastus kasvaa ja huokospaine pienenee.

Maalajirajojen määrittämisessä painokairaus ja puristin-heijarikairaus toimivat yhtä hyvin, joskin puristin-heijarikairauksella päästään syvemmälle. Vaikka puristin- heijarikairauksella on puristusvaiheessa parempi tarkkuus kuin painokairauksella, tässä kohteessa se ei aiheuttanut tulkintojen välille eroa. Puristin-heijari- ja painokairauksen välinen yhteys on nähtävissä kuvasta 22. Kuva on isompana liitteessä 5.

3.2.3 Mitä jäi puuttumaan pohjatutkimuksista

Tässä kohteessa kairaukset olivat pääasiassa kattavat, mutta haluttaessa määrittää maa- peräparametreja mahdollisimman tarkasti tulisi savikerroksissa suorittaa joitakin vertai- levia CPTU-kairauksia pienemmän painoluokan (1 tonnin) kärjellä. Sillä voidaan mitata kärkivastusta ja vaippakitkaa tarkemmin hienojakoisissa kerroksissa.

Parametrien määrittämiseen tarvitaan kärkikohtaisia pinta-alakertoimia (a) ja (b), jotta mitattujen arvojen korjaukset voidaan tehdä. Tässä tapauksessa tarkkoja kertoimia ei saatu kairaajalta eikä kärjen valmistajalta, joten käytettiin valmistajan ilmoittamia yleis- päteviä kertoimia ($a \approx 0,8$) ja ($b \approx 0$). Vaikka standardien mukaisilla CPTU-kärjillä pin- ta-alakertoimet ovat kyseistä suuruusluokkaa, tarkkoja arvoja laskettaessa tulisi tietää käytettävän kärjen arvot. Arvojen tulisi olla kärjen kalibrointitodistuksessa.

CPTU-kairaukset tulee Kairausopas VI:n mukaan aloittaa alkukairauksella kuivakuori- kerroksen läpi (SGY 2001, 29). Kairaustuloksissa niitä ei ollut merkittynä, joten on syytä uskoa, että niitä ei ollut tehty kohteen CPTU-kairauksissa. Tätä seikkaa tulisi jat- kossa painottaa kairaajille. Kairaustuloksista puuttui myös pohjavedenpinta, joka olisi hyvä ilmoittaa väärinkäsitysten välttämiseksi.

4 MILLOIN CPTU-KAIRAUSTA KANNATTAA KÄYTTÄÄ

CPTU-kairaus on käyttökelpoinen menetelmä, kun halutaan määrittää maakerrosrajat mahdollisimman tarkasti löyhissä ja hienorakeisissa maissa, sillä huokospaineen mittauksen ansiosta jopa 30-50 mm paksut kerrokset näkyvät kairaustuloksessa (Meigh 1987, 94-95.) Menetelmän pääasiallinen tarkoitus on maakerrosrajojen ja kerrosten jatkuvuuden määrittäminen. Nämä voidaan päätellä kuvaajista tulkitsemalla.

Menetelmällä voidaan myös arvioida maalaji melko luotettavasti sekä määrittää joitakin maaperäparametreja. Sivun 40 taulukossa 8 on kerrottu mitä maaperäparametreja menetelmällä voidaan määrittää ja millä tarkkuudella.

Menetelmän avulla määritettyjen maaperäparametrien avulla voidaan muodostaa parempi kokonaiskuva tutkittavan alueen maaperästä. CPTU-kairauksen ja maaperäparametrien välinen yhteys tulee varmistaa aluekohtaisesti vertaamalla kairaustulosta tarkempiin menetelmiin, minkä jälkeen voidaan tehdä arvio kokonaisuudesta käyttäen enemmän CPTU-kairausta ja vähemmän muita menetelmiä, kuten esimerkiksi siipikairausta. Tällöin voitaisiin saada enemmän tietoa alueen maaperästä käyttämällä vain yhtä kairausmenetelmää monen sijaan.

CPTU-kairauksella voidaan osittain korvata tarvittaessa siipikairauksia, jos samalla alueella tehtyjen vertailevien tutkimusten avulla löydetään siipikairauksen ja CPTU-kairauksen välinen yhteys (SGY 2001, 50). Tällöinkin CPTU-kairauksella saatavia leikkauslujuuden arvoja tulee pitää ainoastaan suuntaa-antavina. Tämän tapainen CPTU-kairauksen käyttö tulee kyseeseen esimerkiksi ratakohteissa tai muissa sellaisissa paikoissa, joissa kairauksen tulee tapahtua nopeasti.

5 POHDINTA

Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää kirjallisuuden avulla, mitä CPTU-kairauksella pystytään selvittämään ja siten kehittää tulosten tulkintaa ja kairausten ohjelmointia. Koottua tietoa käytettiin apuna esimerkkikohteen kairaustuloksia tulkittaessa. Toisena tavoitteena oli tutkia CPTU-kairauksen hyötyjä suhteessa puristinheijari- ja painokairaukseen. Menetelmiä vertailemalla oli tarkoitus selvittää, saadaanko CPTU-kairausta käyttämällä esimerkkikohteessa selville jotain sellaista, mitä ei muilla menetelmillä saada. Kolmantena tavoitteena oli selvittää paineellisen pohjaveden vaikutusta CPTU-kairaustuloksiin.

CPTU-kairaustulosten tulkinta

Ensimmäiseen tavoitteeseen päästiin hyvin, sillä luotettavaa tutkimusta aiheen tiimoilta oli helposti saatavilla. CPTU-kairausta on tutkittu paljon maailmalla, joskin suurin osa parametrien laskukaavoista ja käyrästöistä perustuu hiekassa tehtyihin tutkimuksiin, joten ne eivät suoraan sovellu Suomen savisiin ja silttisiin maihin. Suomen geoteknillisen yhdistyksen kairausoppaaseen VI on kerätty Suomen maaperäolosuhteisiin hyvin soveltuvia parametreja laskukaavoineen. Kairausopas perustuu paljolti ruotsalaisen Statens geotekniska institutin tekemään Information 15 -julkaisuun, jossa on tutkittu ja koottu Ruotsin maaperään soveltuvia laskentakaavoja.

Kirjallisuudesta selvisi, että CPTU-kairauksella pystyy määrittämään suuntaa-antavasti monia maaperäparametreja, mutta niiden luotettavuus on tarkistettava tarkempia ja yksilöidympiä tutkimusmenetelmiä käyttämällä. Vaikka menetelmällä pystyy määrittämään maaperäominaisuuksia, CPTU-kairauksen pääasiallinen tarkoitus on maalajirajojen ja kerrosten jatkuvuuden määrittäminen kairausdiagrammeista. Diagrammeista maakerrosrajojen määrittäminen on melko nopeaa ja diagrammien muodosta pystyy päättämään maalajin suuntaa-antavasti.

CPTU-kairausdatan avulla voidaan laskemalla määrittää maalaji luvun 3.2.1 mukaisesti. Käyttämällä nettokärkivastusta ja kitkaa kuvaavaa parametria joudutaan käyttämään

oletuksia maan tilavuuspainosta ja maassa vallitsevasta huokospaineesta, ellei niitä ole selvitetty erillisin kokein. Oletuksien käyttö lisää maalajimäärityksen epävarmuutta, mutta kokenut tulkitsija osaa päätellä maan tilavuuspainon kairausdiagrammien avulla, jolloin tulosta voidaan pitää melko luotettavana. Maalajimääritystä tehtäessä käyttämällä kairausvastusta ja kitkasuhdetta ei tarvitse tehdä oletuksia missään vaiheessa.

Kairausdatasta laskettavista parametreista leikkauslujuuden ja kitkakulman määritykset ovat kirjallisuuden perusteella luotettavimpia. Esimerkkikohteessa tosin leikkauslujuuden määrittäminen ei aivan onnistunut ainakaan verrattuna siipikairaukseen ja kartiokokeeseen, jotka olivat yhtenevät toistensa kanssa. Syy tähän on luultavasti liian silttinen ja kerroksellinen maa, mikä aiheuttaa kärkivastukseen ja mitattuun huokospaineeseen heilahtelua. Kitkakulman määrittäminen hiekkaisimmissa kerroksissa antoi järkeenkäyviä tuloksia.

Muiden parametrien osalta tulokset olivat enemmän tai vähemmän epäluotettavia. Suhteellisen tiivyyden laskennassa käytettiin kaavaa, joka soveltuu parhaiten kitkamaihin, joten esimerkkikohteessa hiekkaisimpien kerrosten suhteellisia tiivyyksiä voidaan pitää suuruusluokaltaan oikeina. Epäilyksiä herättää kylläkin se, että alimmassa hiekkakerroksessa suhteellinen tiiviyys oli ajoittain yli 100 %, mikä on todellisuudessa mahdotonta.

Muodonmuutosmoduuli (E_d) oli helppo laskea hiekka- ja silttikerroksissa ja etenkin hiekassa saadut tulokset olivat suuruusluokaltaan oikeita. Kokoonpuristuvuusmoduulin (M) arvot savessa olivat oikean suuntaiset verrattuna ödometrikokeella saatuihin arvoihin, joten savelle tarkoitettua kaavaa voinee pitää toimivana kohteessa. Muiden maalajien kohdalta ei ollut vertailuarvoja, joten luotettavuuteen on vaikea ottaa kantaa.

Konsolidaatiojännityksen tulokset ovat oikean suuntaisia, mutta ödometrikokeella saatuihin tuloksiin verrattuna niin kaukana, ettei CPTU-kairauksella saatuja tuloksia kannata ainakaan tässä kohteessa hyödyntää. Ylikonsolidaatioasteen arvoihin ei kannata tässä esimerkkikohteessa luottaa, koska jo konsolidaatiojännityksen arvoissa on epävarmuutta.

Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana Tutkimusohjelmaa Elinkaaritehokas RAAta (TERA) ja sen projektia Radan stabiliteetin paranta-

mismenetelmät (RASTAPA) on tutkittu CPTU-kairauksen luotettavuutta ja virhelähteitä. Tutkimuksessa on huomattu, että CPTU-kairan kärjen kalibroitu kuormitusluokka vaikuttaa kärkivastuksen ja vaippakitkan mittaustarkkuuteen pienillä, etenkin alle 0,5 MPa, kuormituksilla. Kuormitusluokaltaan 0,75 tonnin kärjellä tehdyt rinnakkaiset tutkimukset ovat tarkempia ja paremmin toistettavissa, kuin 7,5 tonnin kärjellä tehdyt vastaavat tutkimukset. Kuormitusluokaltaan 0,75 tonnin kärjellä tarkoitetaan kärkeä, jonka kärkivastuksen kalibroitu mitta-alue on 0 – 7,5 MPa ja vastaavasti 7,5 tonnin kärjellä 0 – 75 MPa. Sama ilmiö on huomattu myös 1 tonnin ja 10 tonnin kärjillä. Mitatuissa huokospaineissa ei kuitenkaan ole havaittu eroja eri kuormitusluokan kärkien välillä. Tämän esiselvityksen raportti julkaistaan keväällä 2014.

Tässä kohteessa CPTU-kärjen kuormitusluokka oli 10 tonnia, joten ainakin savisissa kerroksissa pienempikin kärki olisi riittänyt ja määritetyt parametrit olisivat voineet olla lähempänä todenmukaisia arvoja. Pienemmän kuormitusluokan kärjellä olisi voitu saada esimerkkikohteessa etenkin tarkempia leikkauslujuuden arvoja. Esimerkkikohteen maaperä oli tosin niin siltistä, että optimaaliseen tulokseen tuskin olisi päästy pienemmätkään kuormitusluokan kärjellä.

Haluttaessa tarkempia tuloksia pehmeissä kerroksissa, voidaan myös miettiä mahdollisuutta valita kevyemmän painoluokan CPTU-kärki tarkastelemalla alueella aikaisemmin tehtyjä kairauksia. Esimerkiksi voisi ajatella, että painokairan painuessa pitkään painoilta tai vähällä kiertämisellä voisi ajatella kevyemmän painoluokan CPTU-kärjen toimivan hyvin, ellei jopa paremmin kuin isomman painoluokan kärjen. Vastaavasti puristinheijarikairauksen puristusvaiheen kärkivastuksesta voisi päätellä, milloin CPTU-kairauksen voisi tehdä kevyemmän luokan kärjellä.

CPTU-kairauksella voidaan korvata osittain joitakin toisia kairausmenetelmiä alueellisesti, jos kyseisten menetelmien välille on löydetty selvä yhteys. Esimerkiksi, jos leikkauslujuuden määrittäminen CPTU-kairauksella saadaan onnistumaan siipikairaukseen verraten, voidaan osa siipikairauksista alueella korvata CPTU-kairauksella. Tällöin on kuitenkin muistettava, että CPTU-kairaus ei ole yhtä luotettava kuin siipikairaus eli tuloksia on verrattava keskenään ja tehtävä johtopäätökset harkintaa käyttäen.

Kairausmenetelmien vertailu

Työn toinen tavoite oli tarkastella, saatiinko CPTU-kairauksella selville jotain sellaista, mitä muilla menetelmillä esimerkkikohteessa ei olisi saatu. Tavoitteeseen päästiin, sillä leikkauksia oli saatavilla muutamasta kohdasta siten, että rinnakkain olivat CPTU-, puristin-heijari- ja painokairausdiagrammit.

CPTU-kairauksella saatiin maalajirajat selville tarkemmin kuin muilla käytetyillä menetelmillä. Kuivakuoren ja saven sekä saven ja siltin rajat oli melko selvästi huomattavissa kaikilla kairausmenetelmillä, mutta syvemmällä olleet ohuet kerrokset näkyivät vain CPTU-kairauksen tuloksissa. Osa syvemmällä olleista kerrosrajoista jäi puristin-heijarikairauksesta huomaamatta suureksi osaksi siksi, että syvemmällä kairaus tapahtui heijarikairauksella, vaikka vastaavasti paikoitellen samalla syvyydellä CPTU-kairaus eteni edelleen. Tähän on saattanut vaikuttaa väärä kairaustapa tai viallinen kone, sillä Kairausopas VI:n mukaan puristin-heijarikairauksen pitäisi keskimäärin mennä jo puristamalla syvemmälle kuin CPTU-kairauksen (SGY 2001, 79).

Paineellisen pohjaveden vaikutukset

Kolmas tavoite oli tarkastella paineellisen pohjaveden vaikutusta CPTU-kairaustuloksiin, sillä esimerkkikohteessa tiedettiin olevan voimakkaasti paineellista pohjavettä. Tavoitteeseen päästiin, sillä paineellisen pohjaveden vaikutus kärkivastukseen korjaantuu korjattua kärkivastusta (q_t) ja vaippakitkaa (f_t) laskettaessa. Parametreja laskettaessa ylipaine otetaan huomioon, kun lasketaan maassa vallitsevaa huokospainetta (u_0). Kairausdiagrammeista tulkittaessa paineellisen pohjaveden vaikutus oli ainakin tässä kohteessa niin vähäinen, että sitä ei tarvinnut ottaa huomioon.

Mitä kannattaa aina tutkia

CPTU-kairausta tulkittaessa kannattaa aina määrittää maalajirajat ja tehdä maalajimäärittäminen. Maalajimäärittäminen kannattaa tehdä kuvaajista sekä numeerisella määrittelyllä esimerkiksi kitkasuhteen avulla. Tällöin kuvaajista tehtyjä määrittelyksiä tulee verrata kitkasuhteen avulla tehtyihin maalajimäärittelyksiin. Vertailussa tulee muistaa, että kuvaajista tulkittaessa pystyy huomioimaan huokospaineen muutokset toisin kuin kitkasuhteen avulla

määritettäessä. Kitkasuhteen avulla tehtävä maalajimääritys on melko nopea tehdä eikä se vaadi oletuksia maaperästä. Maalajimääritykset tulee aina varmistaa maanäytteillä.

Parametreista luotettavimpia kirjallisuuden perusteella ovat leikkauslujuus ja kitkakulma. Kummankin luotettavuus tarvitsee tarkastaa näytteistä ennen laajempaa käyttöä. Leikkauslujuuden määrittämisessä olisi hyvä tietää maan juoksuraja, jotta voitaisiin hyödyntää tarkempaa kaavaa 8.

Laboratoriosta tulosten tulkinnan avuksi ja tueksi tarvitaan maanäytteet jokaisesta tutkittavasta maakerroksesta. Näytteistä määritetään maalaji, jota voidaan verrata omaan tulkintaan, jolloin saadaan käsitys tulkintojen oikeellisuudesta. Savi- ja silttimaissa tulee määrittää myös juoksuraja, jota voidaan käyttää parametrien määrittämisessä. Sitä tarvitaan esimerkiksi leikkauslujuuden kaavaan 8, joka on kirjallisuuden mukaan tarkempi kuin kokemusperäiset kaavat 9 ja 10. Yleisesti voidaan sanoa, että CPTU-kairaustuloksista määritettävien parametrien laajempaa käyttöä varten tarvitaan jokaiselle parametrille laboratoriosta vertailuarvo, jotta tiedetään määrittämenetelmän luotettavuus.

6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä kerättiin CPTU-kairauksen tulkinnasta olemassa olevaa tietoa kirjallisuudesta ja kokeiltiin löydettyä tietoa esimerkkikohteen tulosten tulkinnassa.

Tämän työn perusteella voidaan todeta, että CPTU-kairaus on hyvin käyttökelpoinen väline, kun tutkitaan maakerrosten jatkuvuutta ja maakerrosrajoja. Menetelmän avulla voidaan määrittää maakerrosten maalajit hyvällä tarkkuudella muihin kairausmenetelmiin verrattuna. Lisäksi voidaan määrittää eri maaperäparametreja, joiden luotettavuus tosin vaihtelee suuresti, eikä niitä voida käyttää yksinään geoteknisen mitoituksen lähtöarvoina.

CPTU-kairauksen käyttö lisääntyy Suomessa nopeasti ja sen myötä aiheesta julkaistaan lisää tutkimuksia kiihtyvällä tahdilla.

Jatkotutkimuksille on tarvetta, sillä esimerkiksi CPTU- ja puristin-heijarikairauksen välistä yhteyttä voisi selvittää erilaisissa maaperäolosuhteissa, etenkin parametrien laskennassa. CPTU- ja siipikairauksen välisestä yhteydestä leikkauslujuutta selvittäessä on jo tehty tutkimuksia ja tullaan varmasti tekemään lisää. Jatkotutkimuksilla voisi myös selvittää ajallisia ja taloudellisia näkökulmia CPTU-kairauksen käytöstä verrattuna muihin menetelmiin, esimerkiksi siipikairaukseen. Mitä enemmän luotettavia tutkimuksia pystytään tekemään vain yhdellä kairauksella, sitä tehokkaampaa pohjatutkiminen on.

LÄHTEET

Brouwer J.J.M. 2007. In-Situ Soil Testing

EN ISO 22476-1.13. 2006. Geotechnical investigation and testing – Field testing - Part 1: Electronical cone and piezocone penetration tests

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet

Kärki, I. 2010. Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä

Lancellotta R. 2009. Geotechnical engineering

Meigh, A. C. 1987. Cone Penetration Testing

Melander, K. 1989. Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä

SGI, 2007. Information 15. CPT-sondering

SGY, 1980. Kairausopas I

SGY, 2001. Kairausopas VI

Tiehallinto, 1999. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa

Tiehallinto, 2001. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet

Tiehallinto, 2008. Pohjatutkimuksen työsaavutukset ja kustannukset

Törnqvist, Juvankoski, Tammirinne, 2001. Menetelmäkuvaus TPPT 11

LIITTEET

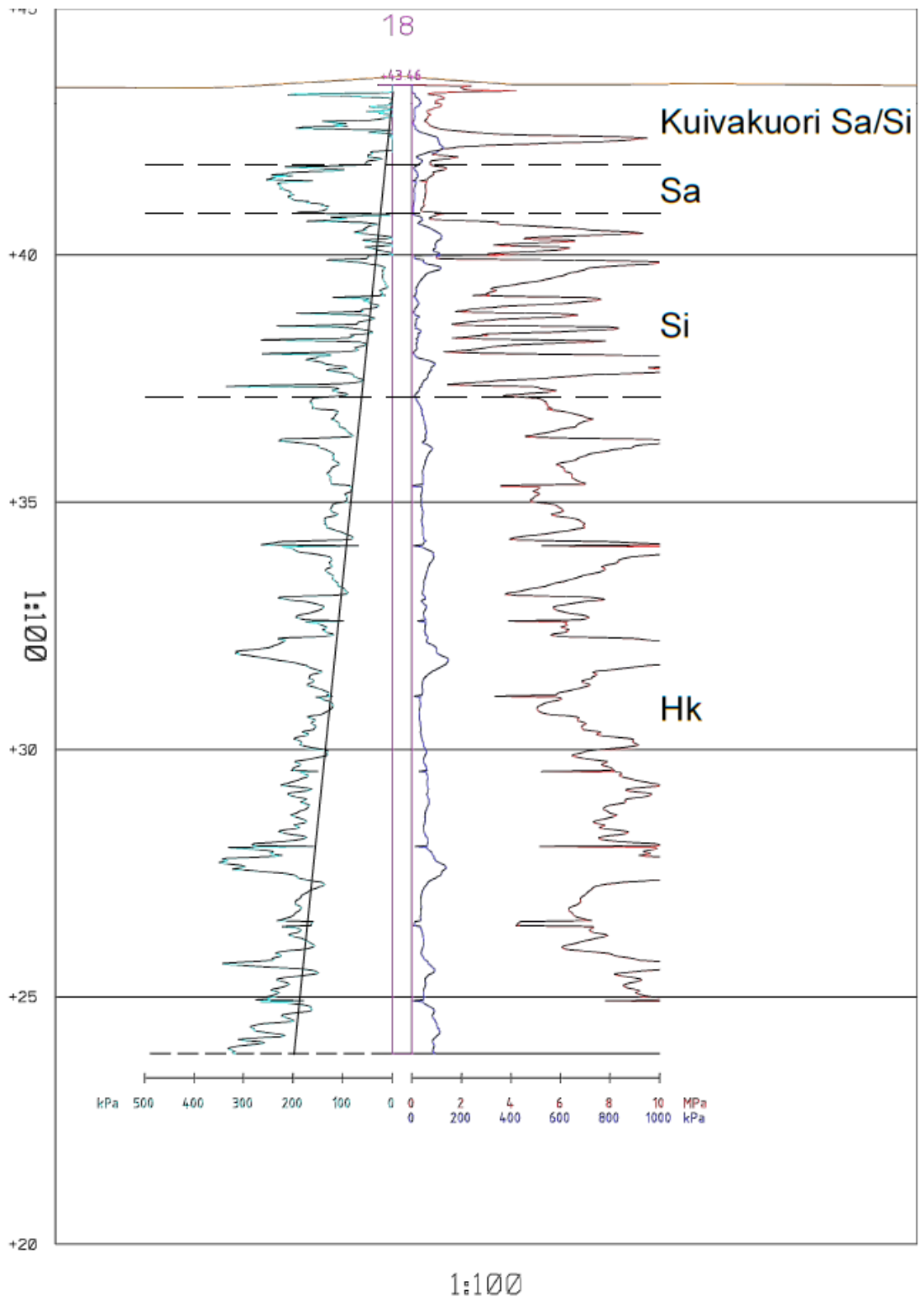
Liite 1. Eri kairausmenetelmien työsaavutukset metriä / työvuoro.

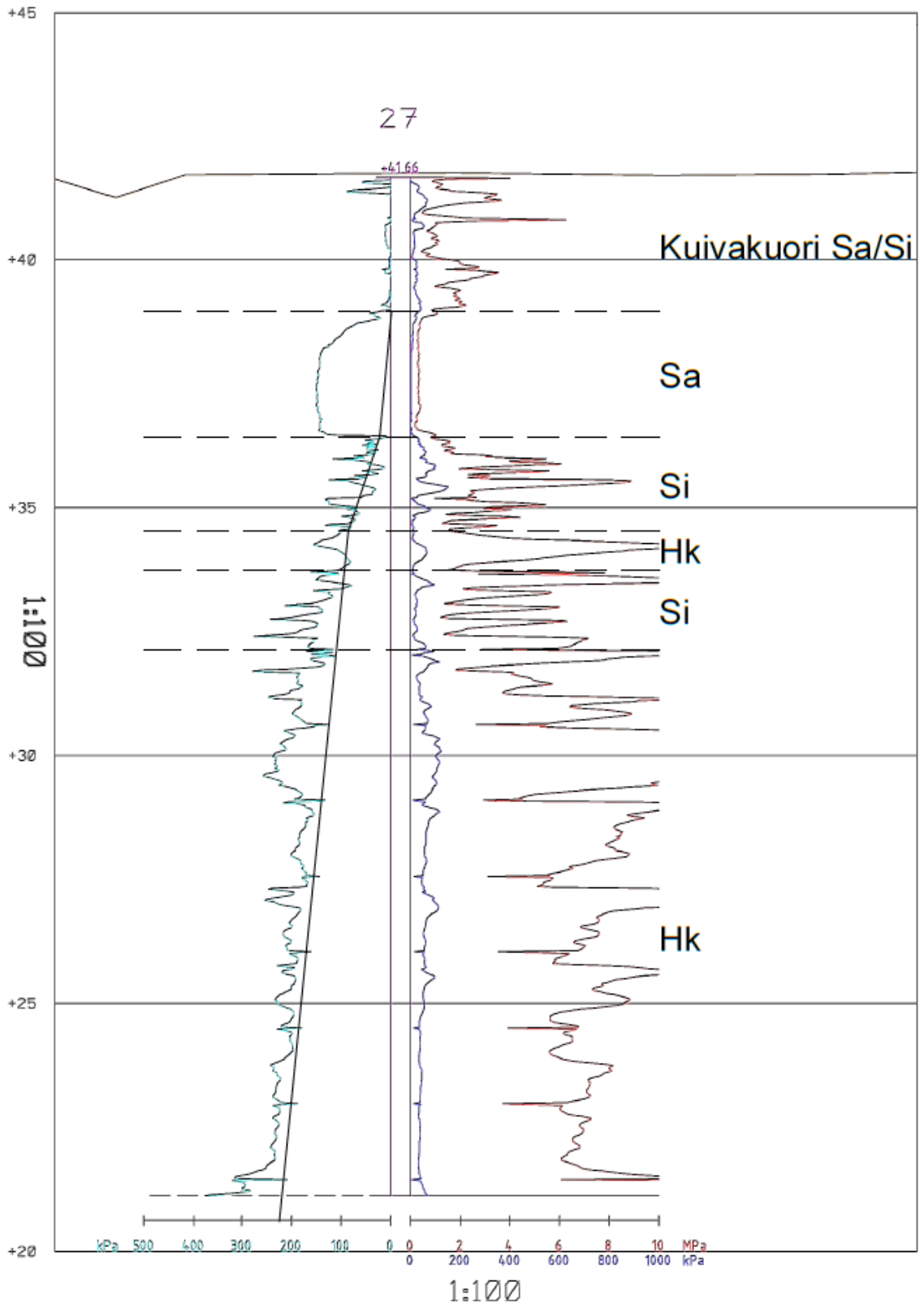
Taulukon lähde Tiehallinto 2008, 8.

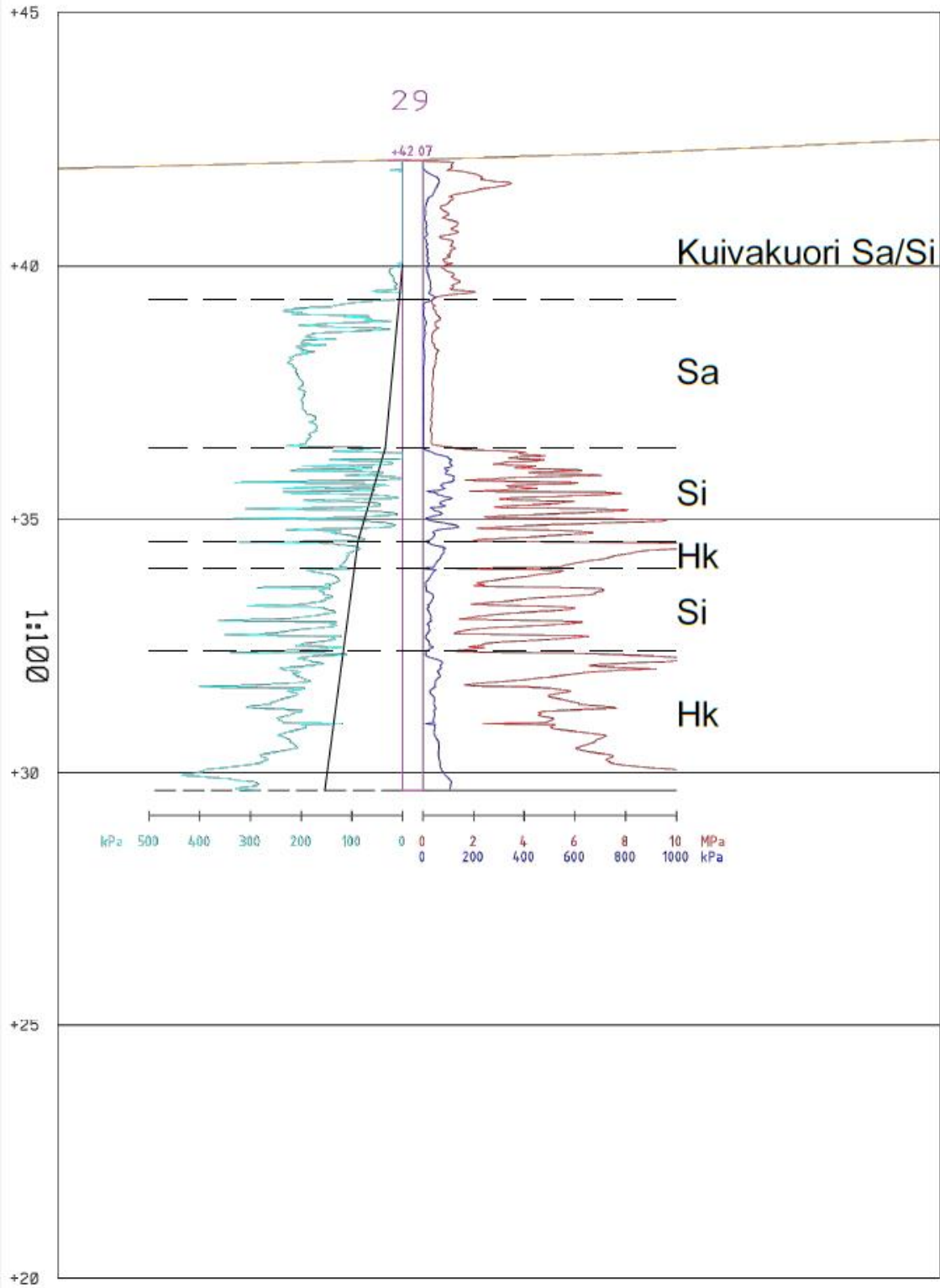
Olosuhteet	Savi ja siltti		Hiekka ja löysä sora		Löysä moreeni		Keskittivis moreeni		Tiivis moreeni	
	Kairaussyvyys alle 5 m	Kairaussyvyys 5 - 10 m	Kairaussyvyys alle 5 m	Kairaussyvyys 5 - 10 m	Kairaussyvyys alle 5 m	Kairaussyvyys 5 - 10 m	Kairaussyvyys alle 5 m	Kairaussyvyys 5 - 10 m	Kairaussyvyys alle 5 m	Kairaussyvyys 5 - 10 m
Painokairaus										
helpot	100	150	70	120	50	80	100	40	50	60
keskinkertaiset	80	120	60	80	40	60	80	30	35	50
vaikeat	50	90	40	60	30	40	60	20	20	40
erittäin vaikeat	30	50	25	40	20	30	40	15	20	30
Puristin- heijarikairaus										
helpot	100	140	80	100	70	90	110	50	70	80
keskinkertaiset	80	110	60	80	60	70	90	40	50	60
vaikeat	50	90	40	60	40	50	70	30	40	50
erittäin vaikeat	30	50	25	40	25	35	50	20	30	40
CPTU-kairaus										
helpot	100	140	80	100						
keskinkertaiset	80	110	60	80						
vaikeat	50	90	40	60						
erittäin vaikeat	30	50	25	40						
Olosuhteet:										
Helpot	Tutkimuspisteet ovat alle 40 m:n etäisyydellä toistaan ja ovat lumettomalle peltoalueella tai helppokulkuisessa metsässä ja liikenne ei häiritse työskentelyä.									
Keskinkertaiset	Tutkimuspisteet ovat alle 80 m:n etäisyydellä toistaan tai kun kulkemista vaikeuttaa jonkin verran maasto, lumi tai kasvillisuus. Liikenne ei häiritse työskentelyä.									
Vaikeat	Tutkimuspisteet ovat alle 80 - 200 m:n etäisyydellä toistaan tai kun maasto on vaikeakulkuista tai kulkua vaikeuttaa runsas lumi tai kasvillisuus. Tai liikenteistä on häiritsevä työskentelylle ja kun tutkimuksia joudutaan tekemään rata-alueella									
Erittäin vaikeat	Tutkimuspisteet ovat yli 200 m:n etäisyydellä toistaan tai kun maasto on erittäin vaikeakulkuista tai työskenneltävää väylää liikennöidyillä väyillä tai vesistöissä.									

Liite 2. CPTU-kairausdiagrammit.

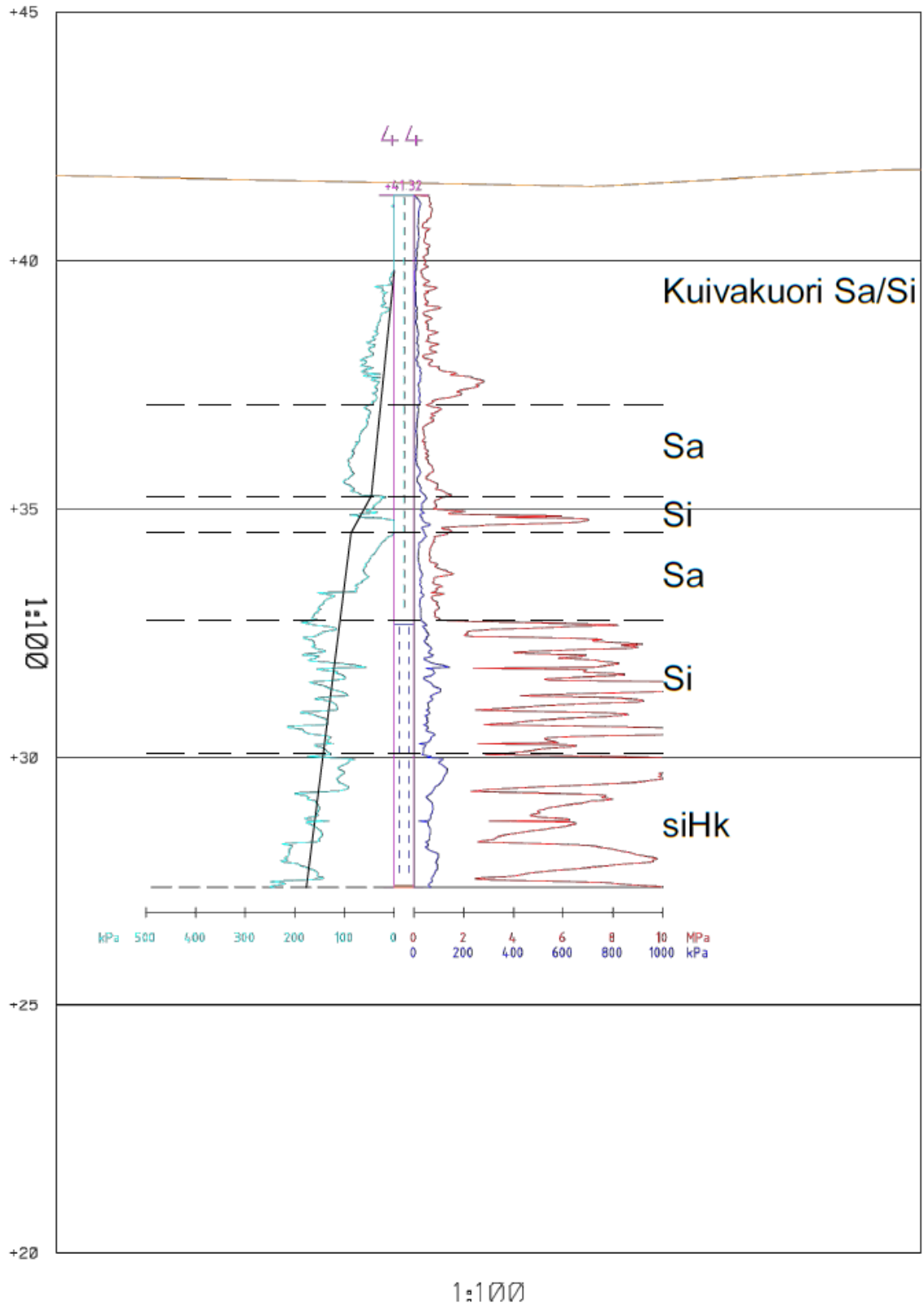
1 (6)

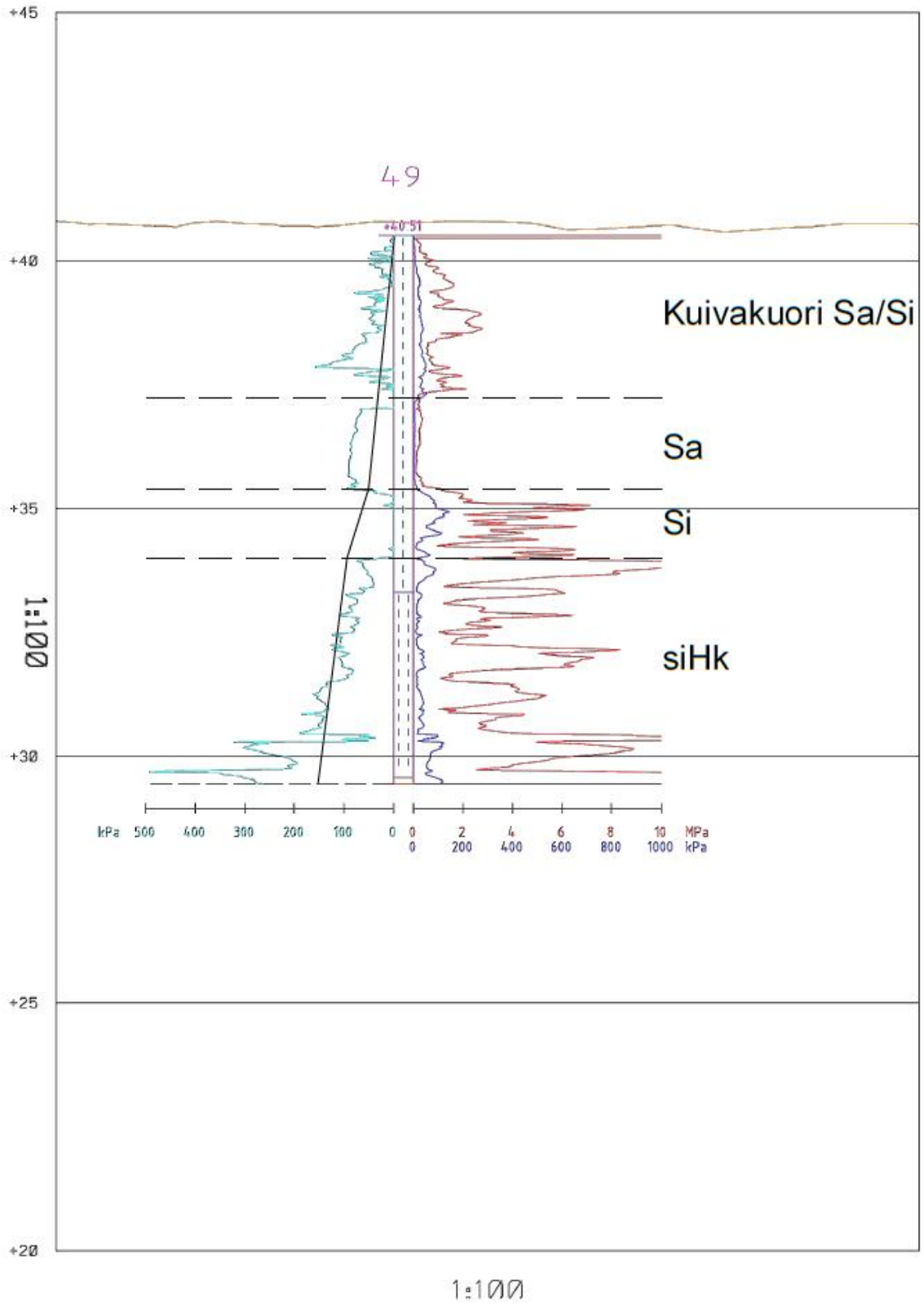


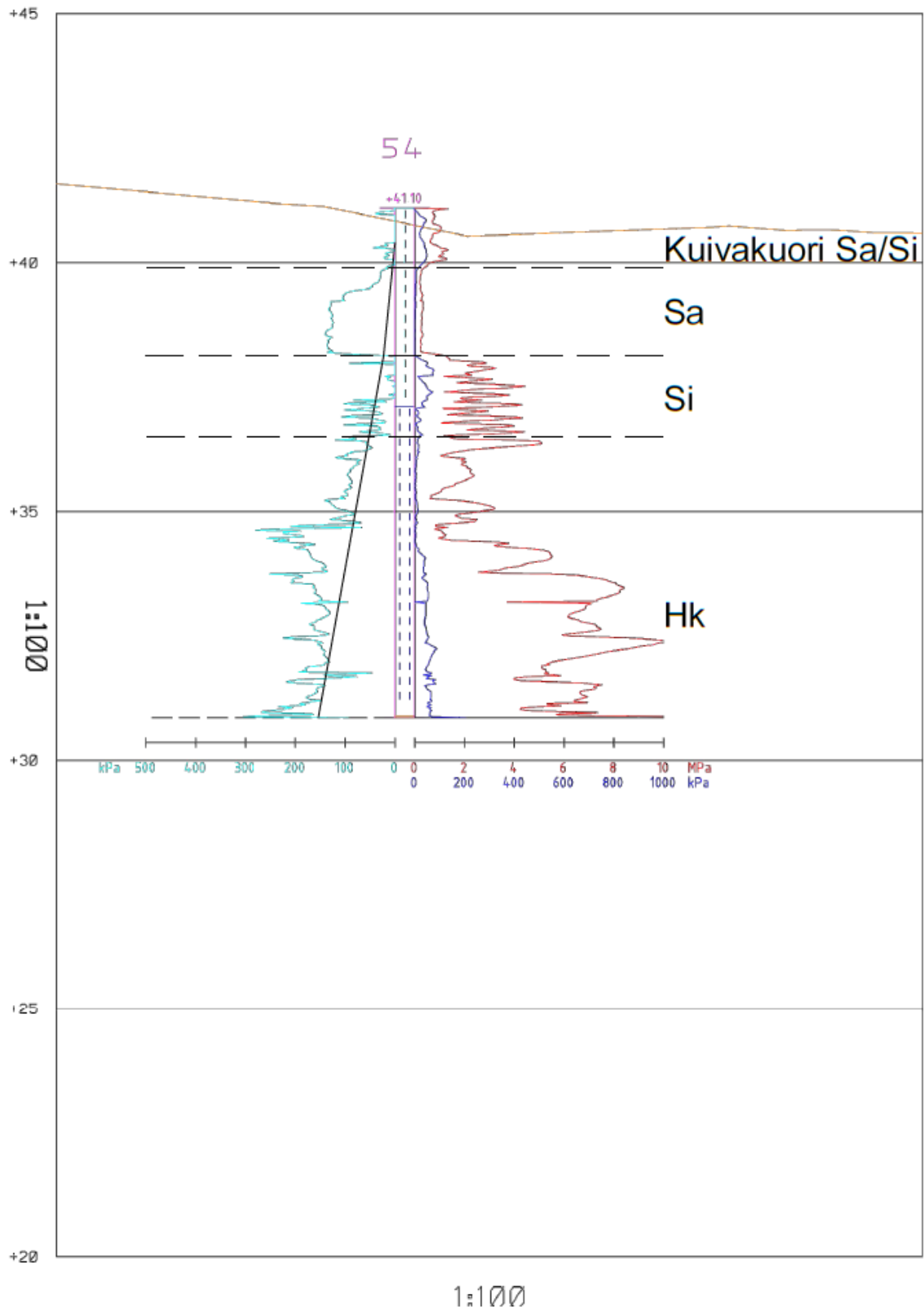




1-1777





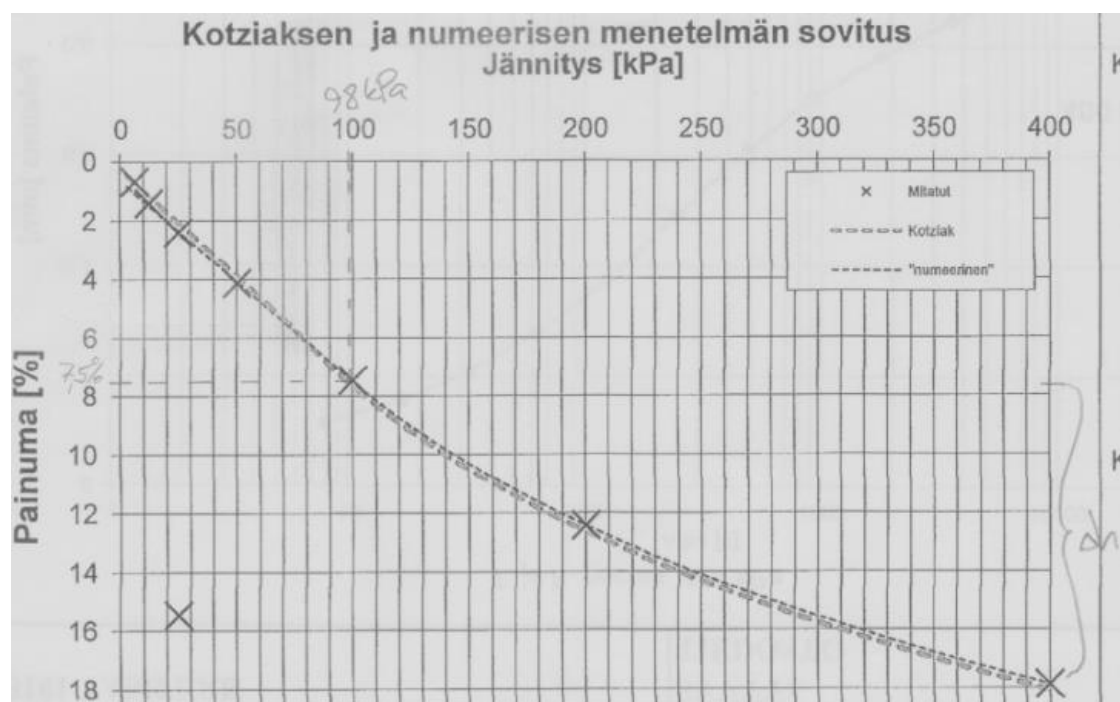


Liite 3. Kokoonpuristuvuusmoduulin M laskeminen ödometrikoetuloksista.

1 (2)

Lasketaan kokoonpuristuvuusmoduuli M ödometrikokeen tuloksista kairauspisteessä 27 syvyydellä 3,9 m.

Numeerisella menetelmällä konsolidaatiojännitykseksi δ_c saadaan 98 kPa. Kuvasta 24 nähdään, että tuolloin painumista on tapahtunut 7,5 %. Kokonaispainuma kokeen aikana on 18 %, jolloin konsolidaatiojännityksen ylittävän jännityksen suuruudeksi saadaan $18 \% - 7,5 \% = 10,5 \%$.



KUVA 24. Numeerisen menetelmän mukainen konsolidaatiojännitys ja -painuma.

Lasketaan kokoonpuristuvuusmoduuli M kaavalla 26.

$$M = \frac{\frac{\Delta\sigma}{\Delta h}}{h} \quad (26)$$

missä $\Delta\delta = \delta - \delta_c = 400 \text{ kPa} - 98 \text{ kPa} = 302 \text{ kPa}$

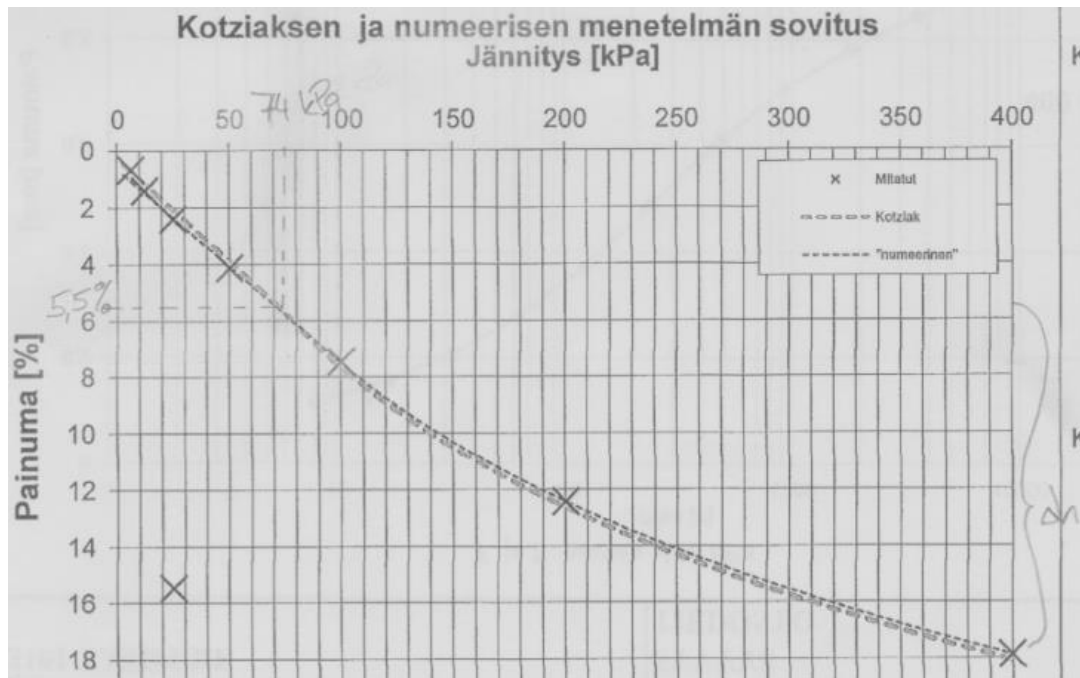
$h = 3,9 \text{ m}$

$\Delta h = 3,9 \text{ m} \cdot 0,105 = 0,4 \text{ m}$

$$M = \frac{\frac{302}{0,4}}{3,9} = 2945 \text{ kPa} \quad (26)$$

2 (2)

Kotziaksen menetelmällä konsolidaatiojännitykseksi δ_c saadaan 74 kPa. Kuvasta 25 nähdään, että tuolloin painumista on tapahtunut 5,5 %. Kokonaispainuma kokeen aikana on 18 %, jolloin konsolidaatiojännityksen ylittävän jännityksen suuruudeksi saadaan $18\% - 5,5\% = 12,5\%$.



KUVA 25. Kotziaksen menetelmän mukainen konsolidaatiojännitys ja -painuma.

Lasketaan kokoonpuristuvuusmoduuli M kaavalla 26.

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta h}{h}} \quad (26)$$

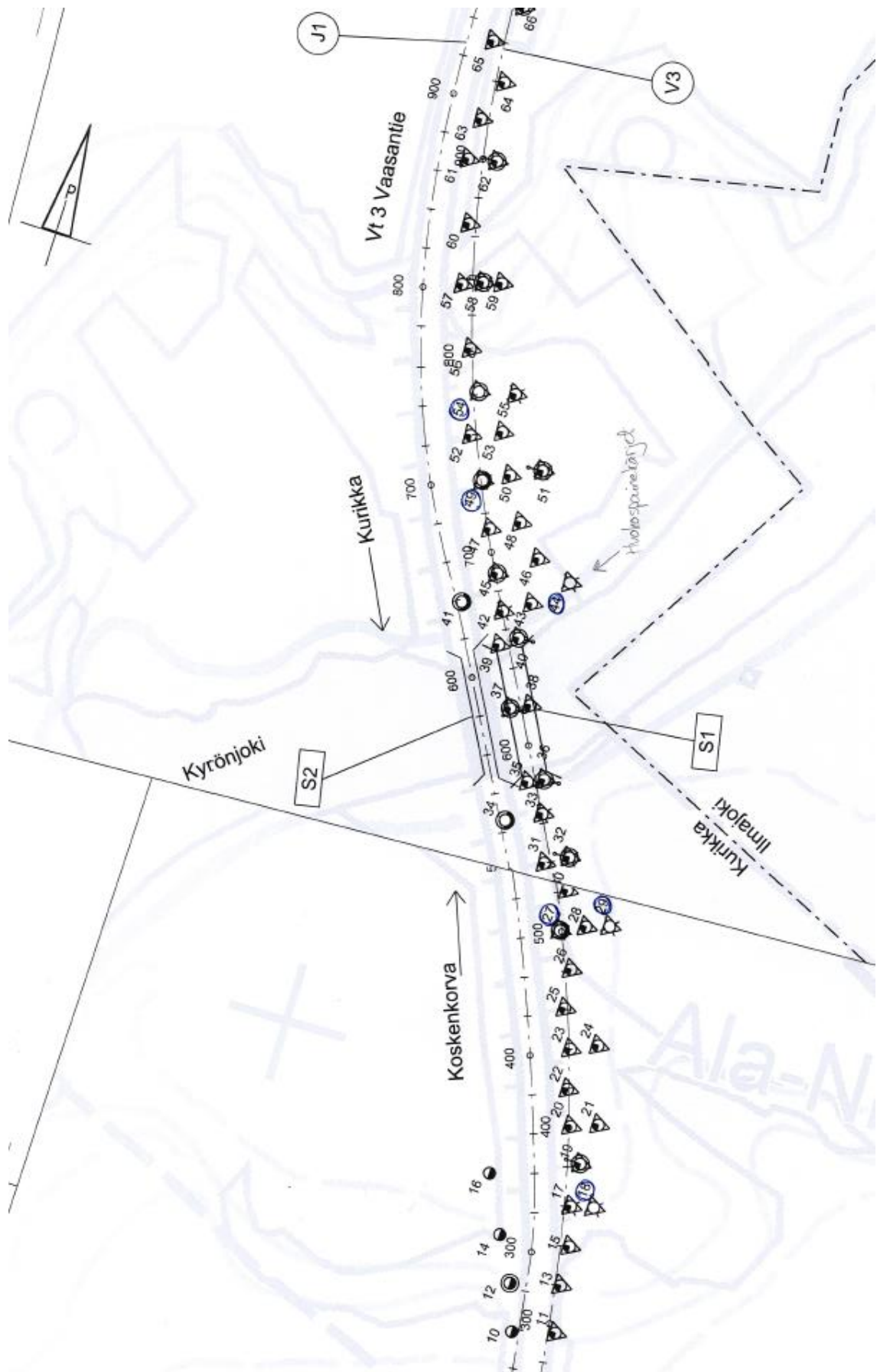
missä $\Delta\delta = \delta - \delta_c = 400 \text{ kPa} - 74 \text{ kPa} = 326 \text{ kPa}$

$h = 3,9 \text{ m}$

$\Delta h = 3,9 \text{ m} \cdot 0,125 = 0,488 \text{ m}$

$$M = \frac{326}{\frac{0,488}{3,9}} = 2605 \text{ kPa} \quad (26)$$

Liite 4. Ote kairausohjelmasta



Liite 5. Leikkauskuva 22.

