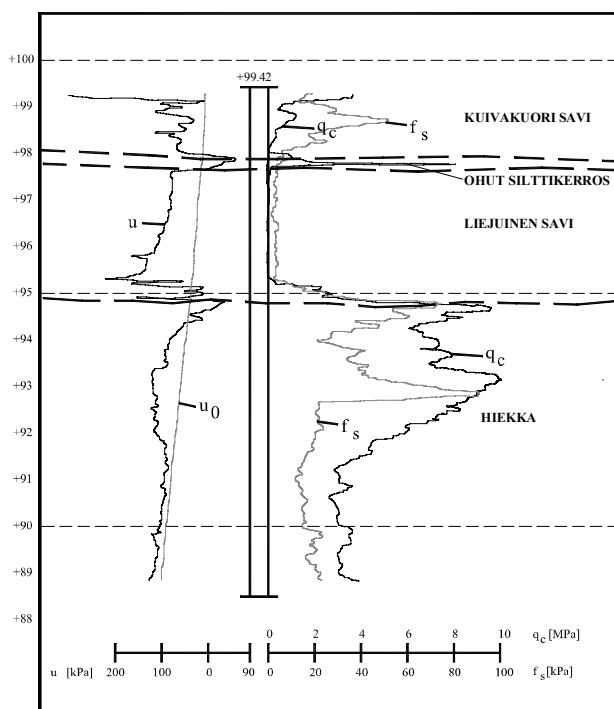


CPTU-KAIRAUS

- Vettä läpäisevien kerrosten tunnistaminen
- Maan kokoonpuristuvuusominaisuudet
- Vedenläpäisevyyden määrittäminen
- Pohjamaan moduulin määrittäminen



Jouko Törnqvist
Markku Juvankoski
Markku Tammirinne

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Alkusanat

Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelman (TPPT) lopputulosten tavoitteena on ennistä kestävämpien uusien ja perusparannettavien kestopäällystettyjen teiden rakentaminen siten, että myös rakenteiden vuosikustannukset alenevat. TPPT-ohjelmassa kehitettiin tierakenteiden mitoitus (TPPT-suunnittelujärjestelmä). Suunnittelujärjestelmään kuuluvissa mitoitusohjeissa ja menetelmäkuvauksissa esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. TPPT-suunnittelujärjestelmään sisältyy myös päällysrakenteen elinkaarikustannustarkastelu, jonka suorittamiseksi esitetään menettelytapa.

Suunnittelujärjestelmälle on ominaista, että tierakenteen mitoitus tapahtuu paikkakohtaisilla tiedoilla ja parametreilla (liikenne, ilmasto, pohjamaa, käytettävät rakennemateriaalit, vanhat rakenteet). Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokokeilla tai maastossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Myös muiden mitoituksessa tarpeellisten lähtötietojen hankinnassa ja ongelmakohtien tai muutoskohtien paikannuksessa käytetään maastossa ja tiellä tehtäviä havaintoja ja mittauksia.

Suunnittelujärjestelmään kuuluvat oleellisena osana sitä täydentävät suunnittelun ja mitoituksen lähtötietojen hankintaa käsittelevät ”menetelmäkuvaukset”. Esitettävät menetelmät ja menettelytavat on todettu käyttökelpoisiksi käytännön havaintojen ja kokeiden perusteella.

TPPT-ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä, mitoitusohjeiden laadinnassa hyväksikäytetyistä koerakenteista sekä yhteenveto tien rakennekerrosten materiaaleista ja niiden valintaan vaikuttavista tekijöistä.

Tämän ”CPTU-kairaus” menetelmäkuvauksen ovat laatineet Jouko Törnqvist, Markku Juvankoski ja Markku Tammirinne VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Menetelmäkuvauksen sisältö on käyty läpi yhdessä tielaitoksen asiantuntijoiden kanssa.

Joulukuussa 2001

Markku Tammirinne

Sisältö

1	JOHDANTO	5
2	PURISTINKAIRAUSMENETELMÄ.....	6
2.1	CPTU-kairan kärki	6
2.2	CPTU-parametrit	7
2.2.1	Kärkivastus q_c (vrt. q_T).....	7
2.2.2	Vaippakitka f_s	8
2.2.3	Huokospaine	8
2.2.4	Pinta-alakertoimet a ja b	8
2.2.5	Korjattu kärkivastus q_T	9
2.2.6	Nettokärkivastus.....	9
2.2.7	Korjattu vaippakitka f_T	9
2.2.8	Kitkasuhde R_f	9
3	CPTU-KAIRAUSKALUSTO.....	10
3.1	Kairauslaitteiston vaatimukset	10
3.1.1	Kairan kärjen geometria	10
3.1.2	Kartiokärki	11
3.1.3	Suodatin	12
3.1.4	Kitkahylsy	12
3.1.5	Jatkokappale tai patterikotelo.....	13
3.1.6	Raot ja tiivisteet	13
3.2	Kairaustulosten rekisteröinti	14
3.2.1	Rekisteröintilaitteisto	14
3.2.2	Kärkivastus-, vaippakitka, huokospaineanturit.....	14
3.2.3	Mittausvälin pituus.....	15
3.2.4	Kairaussyvyyden mittaaminen.....	15
3.2.5	Lämpötilariippuvuus	15
4	CPTU-KAIRAUKSEN SUORITTAMINEN.....	16
4.1	Kairauskaluston valinta.....	16
4.2	Suodatin.....	16
4.3	Suodattimen kyllästäminen ja nesteiden käsittely	16
4.4	Suodattimen ja kärjen asennus ja nestetäyttö.....	17
4.5	Lämpötilan tasaaminen	18
4.6	Nolla-arvojen mittaaminen.....	18
5	KAIRAUSTULOSEN ESITTÄMINEN.....	19
5.1	Laskentaparametrit.....	19
5.2	Kairaustietojen esikäsittely	19
5.2.1	Huokospaineiden korjaaminen.....	19
5.2.2	Parametrien muokkaus jatkokäsittelyä varten	20
5.3	Tietojen jatkokäsittely	20
5.4	Tulosten arviointi ja tarkastaminen.....	20
6	KAIRAUSTULOSEN TULKINTA.....	21
6.1	CPTU-kairauksen tulkittavuus	21
6.2	CPTU-kairauksessa mitattavat suureet.....	21
6.2.1	Kärkivastus.....	21
6.2.2	Vaippakitka.....	22
6.2.3	Huokospaine	22
6.3	Maalajitulkinat	22
6.3.1	Maalajitulkinat kairausdiagrammista	22
6.3.2	Alustava maalajimääritys.....	24
6.3.3	Koheesiomaalajien luokitus.....	26

6.3.4	Maalajin tiiviyn arvioiminen.....	26
6.4	Geoteknisten parametrien arvioiminen.....	27
6.4.1	Parametrien pätevyys ja luotettavuus.....	27
6.4.2	Suljetun leikkauslujuuden arviointi	27
6.4.3	Tehokkaat lujuusparametrit savessa	29
6.5	Konsolidaatiotila ja konsolidaatiojännitys.....	32
6.6	Kerrosten vedenläpäisevyyden mittaus painumalaskentaa varten.....	33
6.6.1	Mittaus ja mittaustulosten esikäsittely	33
6.6.2	Tulkintamallit	35
6.6.2.1	Torstenssonin malli.....	36
6.6.2.2	NTH malli	37
6.6.2.3	MIT malli	38
6.6.2.4	Oxford malli.....	39
6.7	Pohjamaan jäykkyys.....	40
6.7.1	Saven ja siltin kokoonpuristuvuusmoduuli M	40
6.7.2	Muodonmuutosmoduuli E	41
6.7.3	Pohjamaan jäykkyys tien päällysrakenteen suunnittelussa.....	43
7	KIRJALLISUUS	47

LIITE 1. CPTU-LAITTEISTON KALIBROINTI

LIITE 2. CPTU-KAIRAUSPÖYTÄKIRJA

MERKINNÄT

$a = A_N/A_T$	kärjen nettopinta-alasuhte
A_c	kärjen poikkipinta-ala (mm^2)
A_s	kitkahylsyn pinta-ala (mm^2)
$b = (A_L/A_U)A_S$	kitkahylsyn päiden pinta-alasuhte
$B_q = (q_T - \sigma_{v0})$	huokospaineparametri
d_{Jatko}	jatkokappaleen halkaisija (mm)
d_{Kitka}	kitkahylsyn halkaisija (mm)
$d_{\text{Kärki}}$	kärjen halkaisija (mm)
d_{Suodatin}	suodattimen halkaisija (mm)
D_r	suhteellinen tiiviys (%)
E	muodonmuutosmoduuli (MPa)
f_s	korjaamaton vaippakitka (MPa)
f_{si}	maksimi korjaamaton vaippakitka (MPa)
f_T	korjattu vaippakitka (MPa)
m	empiirinen moduulivakio
M	kokoonpuristuvuusmoduuli (MPa)
$R_f = (f_T/q_T) \cdot 100\%$	kitkasuhde
s_u	suljettu leikkauslujuus (kPa)
$s_{c'}$	suljettu leikkauslujuus (kPa)
$s_{v0'}$	tehokas pystysuora leikkauslujuus (kPa)
u	mitattu huokospaine (kPa)
u_0	vallitseva huokospaine (kPa)
Δu	huokospainelisäys (kPa)
q_c	korjaamaton kärkivastus. kokonaiskärkivastus (MPa)
q_n	nettokärkivastus (MPa)
q_T	korjattu kärkivastus (MPa)
Q_c	kärjestä mitattu aksiaalivoima (MPa)
Q_{mitattu}	tangon yläpäästä mitattu puristusvoima (kPa)
Q_s	vaippahylsystä mitattu voima (MPa)
Q_{si}	vaippahylsystä mitattu voima kerroksessa i (MPa)
Q_{tot}	tangon yläpäästä vaikuttava kokonaispuristusvoima (kPa)
w_L	juoksuraja (%)
z	syvyys (m)
α	maa- ja paalutyypistä sekä kärkivastuksesta riippuva korjauskerroin
φ'	tehokas kitkakulma
σ_{v0}	pystysuora jännityslisäys
σ'_{v0}	tehokas pystysuora jännityslisäys

1 JOHDANTO

Suomen geoteknillinen yhdistys ry:n toimesta on julkaistu Kairausopas VI: CPTU / Puristin-kairaus, Puristin-heijarikairaus /4/. Tässä menetelmäkuvauksessa on täydennetty Kairausopasta VI:ta niiden asioiden osalta, joita tarvitaan TPPT suunnittelujärjestelmässä erityisesti painumamitoituksen lähtötietoja hankittaessa ja joiden osalta Kairausopas VI:n sisältö on TPPT-sovellutuksia varten liian yleispiirteinen. CPTU-kairauksen kokonaiskuvan mahdollistamiseksi useita osia Kairausopas VI:n sisällöstä on siirretty sellaisenaan tähän menetelmäkuvaukseen. Runsaita suoria tekstilainauksia Kairausopas VI:sta ei tekstiin ole erikseen merkitty.

Suomessa käytetään sähköisesti vastussureita mittaavia CPTU-kairauslaitteistoja. Huokospainemittauksen suorittaminen (CPTU-kairaus) hienorakeisessa maassa mahdollistaa ilman huokosvedenpaineen mittausta tehtyyn CPT-kairaukseen verrattuna mm seuraavat asiat:

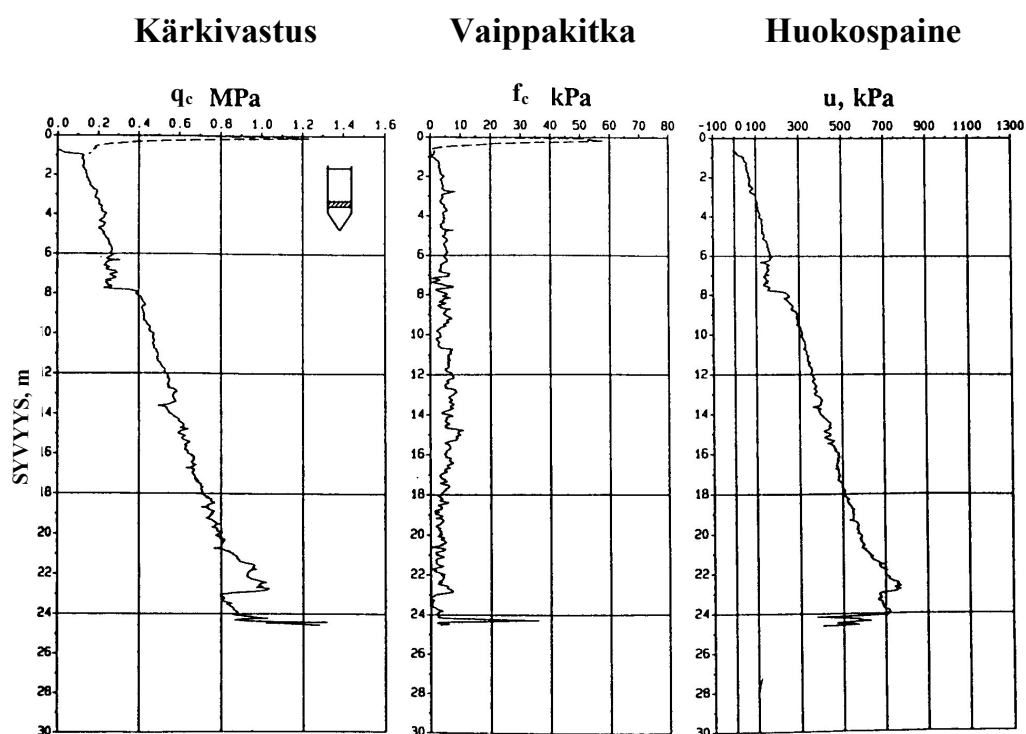
- kärkevaston ja vaippakitkan mittauservojen korjaamisen,
- maan kuivatusominaisuuksien (konsolidaatio) arvioimisen,
- huokospaineen in-situ mittaus
- maalajien luotettavamman arvioimisen sekä
- geoteknisten ominaisuuksien arvioimisen.

2 PURISTINKAIRAUSMENETELMÄ

Puristin- eli CPTU-kairauksessa maahan puristetaan vakionopeudella (20 mm/s) kärkikartiota, jonka poikkipinta-ala on 1000 mm^2 ja kärkikulma 60° . Kairauksen aikana mitataan

- kärkivastus
- vaippakitka
- huokospaine (CPTU-kairaus) sekä
- kairausvyvyys.

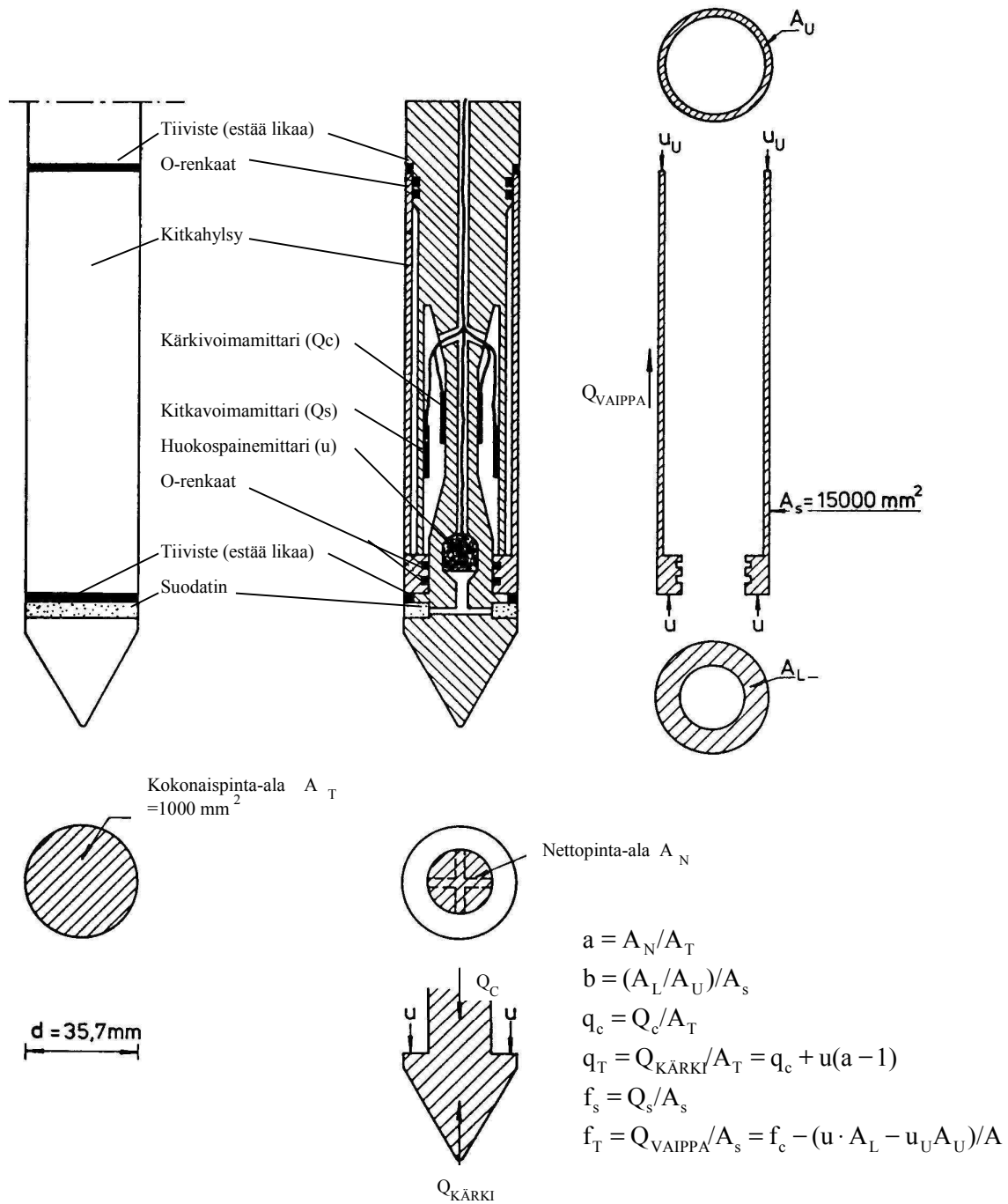
Mitattavat parametrit rekisteröityvät sähköisesti. Mittausväli on niin tiheä (n. 0,01...0,02 m), että tuloksena saavutetaan lähes jatkuvia mittauskäyriä (Kuva 1).



Kuva 1. CPTU-kairauksen mittaustuloksia.

2.1 CPTU-kairan kärki

CPTU-kairan kärki muodostuu *kärkikartiosta*, *suodattimesta*, *kitkahylsystä* sekä kairan (kärkikappaleen) sisässä olevista *mitta-antureista*. Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva CPTU-kairan kärkikappaleesta sekä eri osien sijainti.



Kuva 2. CPTU-kairan geometrinen muoto sekä osien nimet.

2.2 CPTU-parametrit

2.2.1 Kärkivastus q_c (vrt. q_T)

Kärkivastus (q_c) on kärjestä mitattu aksiaalivoima (Q_c) jaettuna kärjen poikkipinta-alalla ($A_c = 1000 \text{ mm}^2$) kaavan (1) mukaisesti.

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (1)$$

Kärkivastus ilmoitetaan joko MPa:na tai kPa:na. Erikoistapauksissa, silloin kun huokosvedenpaine $u \approx 0$, tai sitä ei ole mitattu, on $q_c \approx q_T$.

Kärkivastus q_c on ns. korjaamaton kairausvastus, koska kairattaessa kärkeen kohdistuu vedenpaine, joka aiheuttaa virhettä kärkivoiman (Q_c) mittauksessa. Mitattaessa huokospainetta (u) voidaan kärkivastus korjata kokonaiskärkivastukseksi (q_T) kohdan 2.4.5 mukaan.

2.2.2 Vaippakitka f_s

Vaippakitka (f_s) saadaan jakamalla mitattu vaippahylsyyden vaikuttava voima (Q_s) vaipan pinta-alalla ($A_s = 15000 \text{ mm}^2$), kaava (2).

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (2)$$

Vaippakitka ilmoitetaan kPa:na tai MPa:na. Parametri f_s on käyttökelpoinen ainoastaan kitkamaissa ja pienillä huokosveden paineilla.

Vaippakitka f_s on ns. korjaamaton kitkavastus, koska kairattaessa kärkeen kohdistuu vedenpaine, joka aiheuttaa virhettä vaippaan vaikuttavan voiman (Q_s) mittauksessa. Mitattaessa huokospainetta (u) kärkivastus voidaan korjata kokonaisvaippakitkaksi (f_T) kohdan 2.4.6 mukaan.

2.2.3 Huokospaine

Huokospaine u_0 on maassa vallitseva tasapainohuokospaine. Kun kairaus keskeytyy hyvin pitkäksi aikaa, tasapainohuokospaine palautuu, kun huokosylipaineen täydellisen purkautumisen jälkeen kärjen maahan työntämisen aiheuttama huokospaineen arvo tasaantuu.

Huokospaine u on kairauksen aikana rekisteröity huokospaine (kaava 3).

$$u = u_0 + \Delta u \quad (3)$$

Merkintää u käytetään ainoastaan standardi CPTU-kairauksessa, jossa huokospaine mitataan suodattimella, joka sijaitsee heti kartiokärjen yläpuolelta.

Huokospainelisäys Δu on kärjen painamisen aiheuttama huokospainemuutos ($u - u_0$), joka muodostuu kairauksen aikana. Maan ominaisuuksista riippuen syntyvä huokospaine voi olla positiivinen tai negatiivinen.

Huokospainesuhde B_q määritellään mittaustasolla syntyvän huokospaineen ja korjatun kärkivastuksen väliseksi suhteeksi kaavan (4) mukaan.

$$B_q = \frac{\Delta u}{(q_T - \sigma_{vo})} \quad (4)$$

2.2.4 Pinta-alakertoimet a ja b

Pinta-alakertoimet a ja b saadaan kärkikappaleen valmistajalta ja arvot tarkistetaan kalibrointiohjeiden mukaan.

2.2.5 Korjattu kärkivastus q_T

CPTU-kairan kärkeen kohdistuvan vedenpaineen takia mitattua kärkivastusta (q_c) on korjattava kaavan (5) mukaan. Parametri a määritetään kohdan 2.4.4 mukaan.

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

Korjattu kärkivastus ilmoitetaan joko MPa:na tai kPa:na.

2.2.6 Nettokärkivastus

Nettokärkivastus on korjatun kärkivastuksen (q_T) ja maassa vallitsevan pystysuoran jännityksen (σ_{vo}) erotus. Kairaustulosten tulkinnassa käytettävä normalisoitu nettokärkivastus saadaan kaavasta (6).

$$\text{Normalisoitu nettokärkivastus} = \frac{(q_T - \sigma'_{vo})}{\sigma'_{vo}} \quad (6)$$

missä σ'_{vo} = tehokas pystysuora jännitys

2.2.7 Korjattu vaippakitka f_T

Mitattua vaippakitkan (f_s) arvoa on korjattava huokospainemittauksilla saatujen parametrien sekä kalibroinnilla (liite 1) määritettävien pinta-alakertoimien a ja b avulla kaavan (7) mukaan (kuva 2).

$$f_T \approx f_s - \left[u \cdot b + 0,3 \cdot \Delta u \cdot \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right] \quad (7)$$

2.2.8 Kitkasuhde R_f

Kitkasuhde (R_f) määritellään samalta tasolta mitattujen korjatun vaippakitkan (f_T) ja kärkivastuksen (q_T) väliseksi suhteeksi (%) kaavan (8) mukaan.

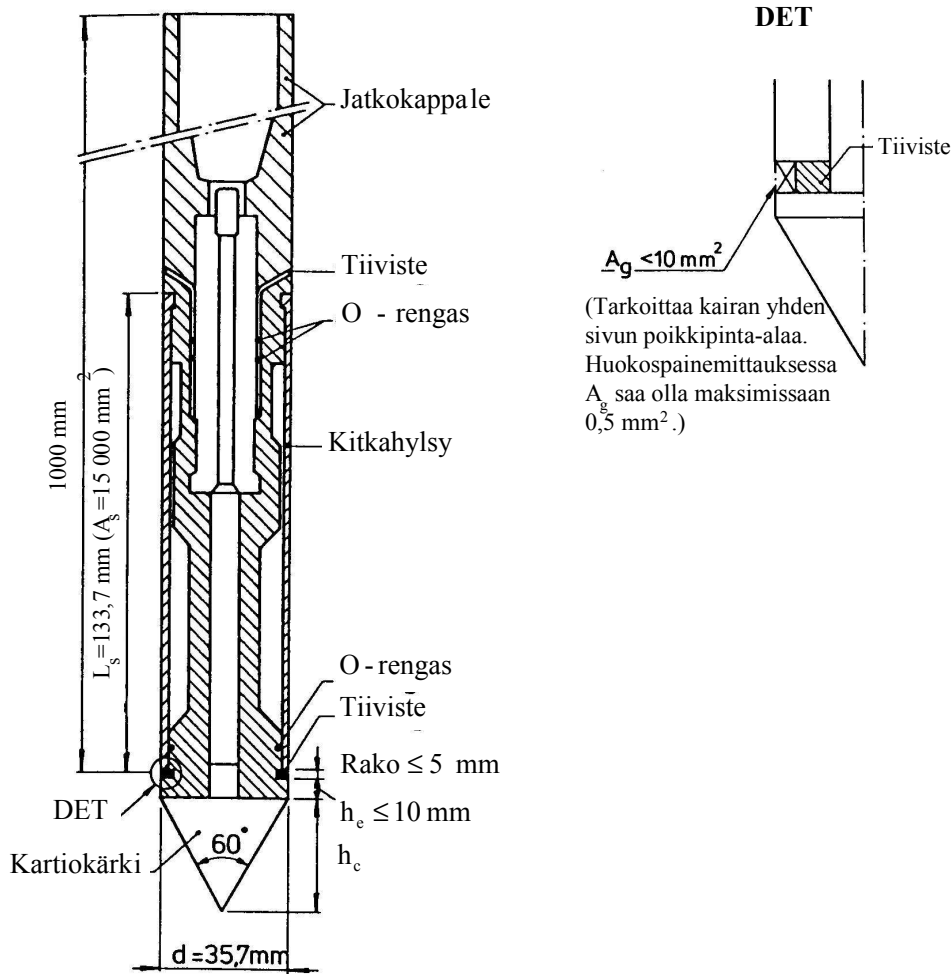
$$R_f = \frac{f_T}{q_T} \cdot 100 \% \quad (8)$$

3 CPTU-KAIRAUSKALUSTO

3.1 Kairauslaitteiston vaatimukset

3.1.1 Kairan kärjen geometria

Kairan kärkiosan ulkoiset osat ovat *kartiokärki*, *suodatin*, *kitkahylsy* sekä kärkiosan *jatkokappale* (Kuva 3). Kitkahylsyn ja jatkokappaleen yhteispituuden tulee olla vähintään 1000 mm. Kärkiosan halkaisijan tulee olla koko tällä pituudella vakio ja kaikkien osien yhdensuuntaisena kairan keskiliinjan suhteen.



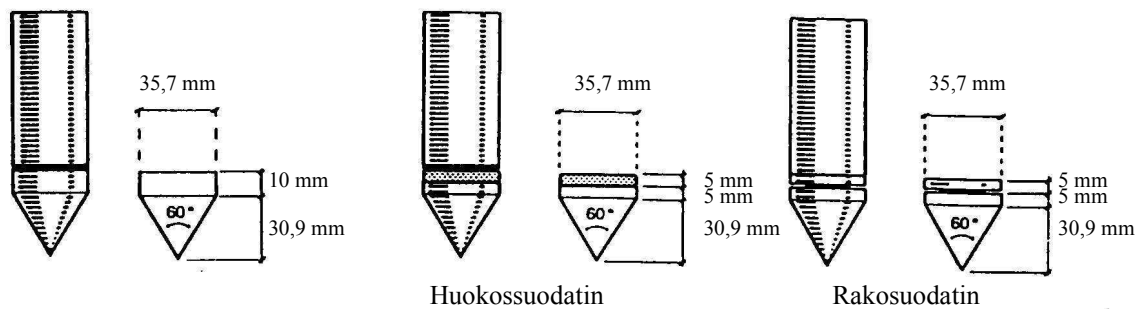
Kuva 3. CPTU-kairan mitat.

3.1.2 Kartiokärki

Kartiokärki muodostuu kartio-osasta ja sylinterijatkosta. Kärkikulman tulee olla 60° ja kärjen poikkipinta-alan 1000 mm^2 ($d = 35,7 \text{ mm}$) sylinterijatkon kohdalla. Sylinteriosan korkeuden, suodatin mukaan luettuna, tulee olla 10 mm vähennettynä kulumistoleranssilla.

Kitkamaassa kärki kuluu voimakkaasti, minkä vuoksi kärjen kulumiselle sallitaan melko laajat toleranssit (Kuva 4). Kulumiseen luetaan myös kartiokärjen hyväksyttävissä rajoissa olevat "kolhiintumat". Kärjen tulee kuitenkin aina olla symmetrinen. Selvästi loppuun kuluneet kärjet on poistettava käytöstä.

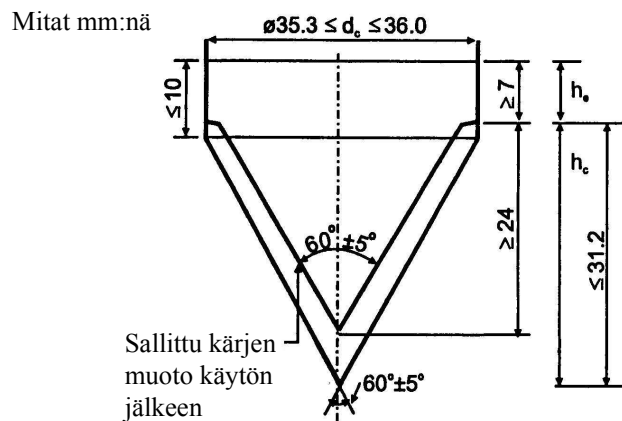
CPTU-kairoissa kärkikartio-osan sylinterimäisen osan tulee olla 5 mm ja suodatin pitää olla asennettuna heti sen yläpuolelle (Kuva 4). Kokemuksesta tiedetään syntyvien huokospaineiden riippuvan suodattimen sijainnista, joten CPTU-kairauksessa on käytettävä vain tämän ohjeen mukaisia kartiokärkiä ja suodattimia.



Kartiokärki ilman huokospainemittausta

Kartiokärki huokospainemittauksella

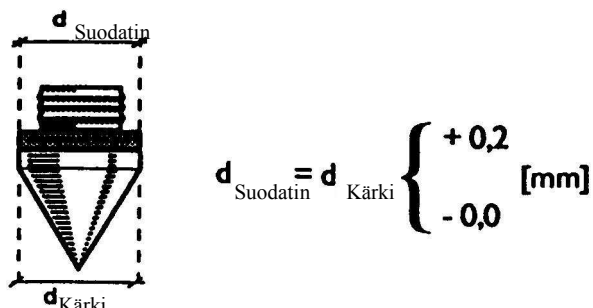
Kartiokärjen sallitut toleranssit



Kuva 4. Kartiokärjen muoto, mitat ja sallitut toleranssit.

3.1.3 Suodatin

Suodattimen halkaisijan on oltava vähintään yhtä suuri kuin kartiokärjen halkaisija. Suodatin voi olla hiukan suurempi, mutta **ei missään tapauksessa pienempi**. Sallitut poikkeamat on esitetty kuvassa 5. Suodattimen on täytettävä sille asetetut vaatimukset myös kairauksen jälkeen.



Kuva 5. Suodattimen halkaisijan sallitut toleranssit .

Suodatin pitää vaihtaa jokaisen kairauspisteen jälkeen. Suodattimen korkeuden on oltava 5 mm. Matalampaa suodatinta voidaan käyttää edellyttäen, että kärjen geometrinen vaatimusten täyttämiseksi käytetään erityistä välirengasta.

Suodattimen tulee olla hienohuokoinen ja kokoonpuristumaton sekä hyvin kulutusta kestävä. Tavallisesti suositellaan sintratusta ja ruostumattomasta teräksestä tai pronssista valmistettuja suodattimia, joiden huokoskoko on 2...20 µm. Myös keraamisia suodattimia ja huokoisesta muovista valmistettuja suodattimia voidaan käyttää.

CPTU-kairauksessa on nykyään huomattavasti yleistynyt ns. rakosuodattimen käyttö. Rakosuodattimessa perinteinen keraaminen suodatinosa on korvattu raolla, joka täytetään esimerkiksi vaseliinilla. Vertailututkimusten perusteella rakosuodattimella mitatun huokospaineen mittaustarkkuus saattaa joissakin tapauksissa olla heikompi kuin perinteisen menetelmän tarkkuus. Rakosuodattimen käyttö on menetelmänä yksinkertaisempi ja varsinkaan pakkasella vaseliini ei jäädy kuten vesi. Rakosuodattimen tulee sijaita normaalin suodattimen asettelurajojen sisällä, ts. 5...10 mm kärjen kartio-osan yläpuolella (Kuva 4).

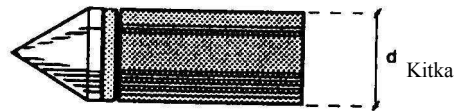
Kun CPTU- kairauksen huokosylipaineen purkautumisnopeudesta tulkitaan maan vedenläpäisevyyttä tässä menetelmäkuvausessa esitetyllä tavalla, tulee kairan kärjen olla varustettu suodattimella ja kärjen huokostiehyiden olla täytettynä vedellä.

3.1.4 Kitkahylsy

Kitkahylsyn vaippapinta-alan (A_s) tulee olla $15\,000\text{ mm}^2 \pm 2\%$, jolloin hylsyn pituus on n. 133,7 mm (Kuva 6). Kitkahylsy asennetaan heti kärjen (ja mahdollisen) suodattimen yläpuolelle. Suurin etäisyys kärkikappaleesta on rakojen ja tiivisteiden vuoksi 5 mm.

Kitkahylsyn halkaisijan (d_{Kitka}) on oltava yhtä suuri kuin kärkikartion halkaisija ($d_{\text{Kärki}}$). Kitkahylsyn halkaisijalle sallittu toleranssiväli kärkikartion halkaisijan suhteen on 0...+0,35 mm. Kun suodatin on normaalilla paikalla kärjen ja kitkahylsyn välissä, **kitkahylsyn halkaisija ei missään tapauksessa saa olla suodattimen halkaisijaa pienempi**, koska tämä voi vaikuttaa syntyvään huokospaineeseen. Tämän vuoksi tulee olla voimassa kuvassa 6 esitetyt kriteerit :

$$d_{\text{Kitka}} \geq d_{\text{Suodatin}} \geq d_{\text{Kärki}}$$



$$\text{Pinta-ala} = 15\,000 \text{ mm}^2 \pm 2\%$$

$$d_{\text{Kitka}} = d_{\text{Kärki}} \begin{cases} +0,35 \\ -0,0 \end{cases} \text{ [mm]}$$

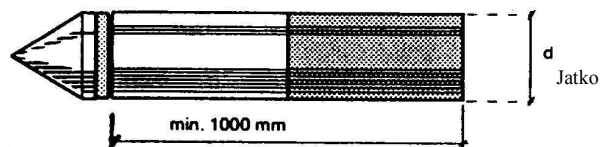
JA

$$d_{\text{Kitka}} \geq d_{\text{Suodatin}} \geq d_{\text{Kärki}}$$

Kuva 6. Kitkahylsyn mitat ja toleranssit.

3.1.5 Jatkokappale tai patterikotelo

Jatkokappaleen tai patterikotelon (malli-ENVI) halkaisijan tulee olla yhtä suuri kuin kitkahylsyn halkaisijan +0,0 mm / -0,3 mm toleranssilla. Jatkokappaleen tai patterikotelon ja kitkahylsyn yhteenlasketun pituuden tulee olla vähintään 1000 mm (Kuva 7).



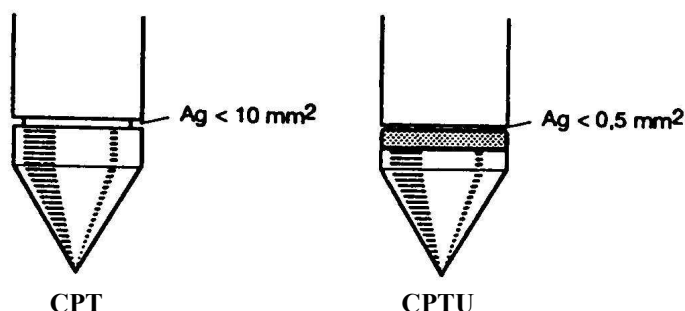
$$d_{\text{Jatko}} = d_{\text{Kitka}} \begin{cases} +0,0 \\ -0,3 \end{cases} \text{ [mm]}$$

Kuva 7. Jatkokappaleen mitat ja toleranssit.

3.1.6 Raot ja tiivisteet

Tiivisteet on muotoiltava siten, että ne estävät maa-aineksen tunkeutumisen kairan kärkikappaleen sisään. Tiivisteiden pitää olla kokoonpuristuvia suhteessa mittauselementteihin niin, ettei merkittäviä aksiaalisuuntaisia voimia siirry tiivisteiden välityksellä ja ettei raoista ja tiivisteistä aiheudu mittavirheitä.

Se osa yksittäisen raon poikkipinta-alasta, joka ei ole tiivisteiden peittämä, ei saa CPTU-kairauksessa ylittää $0,5 \text{ mm}^2$ (Kuva 8). CPTU-kairauksen vaatimus on huomattavasti tarkempi kuin CPT-kairauksen, koska mahdolliset aukot ja raot aiheuttavat huokospainemuutoksia, jotka vaikuttavat sekä mitattuihin että korjattuihin huokospaineisiin.



Kuva 8. Rakojen mitat ja toleranssit.

3.2 Kairaustulosten rekisteröinti

3.2.1 Rekisteröintilaitteisto

CPTU-kairauksessa voimat ja kuormitukset mitataan kalibroiduilla antureilla ja mittauslaitteilla. Mittaussignaalin siirto rekisteröintilaitteistoon voi käytännössä tapahtua kolmella eri tavalla:

1. Signaalin siirto kaapelilla mitta-antureista mittauslaitteeseen / rekisteröintiyksikköön maanpinnalle.
2. Akustinen (ei kaapelia) signaalin siirto onttoja / umpinaisia kairaustankoja pitkin mittauslaitteeseen / rekisteröintiyksikköön maanpinnalle.
3. Mittaussignaalien tallentuminen muistilaitteeseen, joka on sijoitettu kairan kärjen yläpuolelle ja joka puretaan rekisteröintiyksikköön kärjen ylösnoston jälkeen.

Menetelmät 1 ja 2 mahdollistavat mittausarvojen reaaliaikaisen seuraamisen kairauksen aikana. Tällöin voidaan kairauksen aikana seurata, että kaikki toimii normaalisti.

Kun CPTU- kairauksen huokosylipaineen purkautumisnopeudesta tulkitaan maan vedenläpäisevyyttä tässä menetelmäkuvauksessa esitetyllä tavalla, mittaustiedon siirto kairan kärjestä tulee olla toteutettu joko menetelmällä 1 tai menetelmällä 3.

3.2.2 Kärkivastus-, vaippakitka, huokospaineanturit

CPTU-kairan kärkiosaan kohdistuvaa kärkivastusta, vaippakitkaa ja huokospainetta mitataan jännitys-venymäliuska-antureilla. Anturit on sijoitettu kärkiosaan siten, että kuormituksen mahdollinen epäkeskeisyys tai mahdolliset lämpötilamuutokset vaikuttavat mahdollisimman vähän mittaustapahtumaan ja -tuloksiin. Eri parametrien vaadittu minimimittaustarkkuus riippuu valitusta tarkkuusluokasta, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 4.1 Kairauskaluston valinta. Anturit tulee kalibroida aina korjauksen jälkeen.

Mitta-anturit sijaitsevat kärkiosan eri kohdissa, jolloin samassa tasossa vaikuttavat arvot rekisteröityvät eri aikoina. Jatkuvassa kairauksessa vakiopuristusnopeudella ja silloin, kun suodatin on normaalisti asennettuna kärjen yläpuolelle, mittausarvot rekisteröityvät seuraavassa järjestyksessä :

1. Kärkivastuksen arvo
2. Huokospaine n. 0,8 s myöhemmin (17 mm tasoero kärjen puoliväliin nähden)
3. Vaippakitka n. 5,5 s myöhemmin (110 mm tasoero kärjen puoliväliin nähden)

Kärkivastus (q_c) korjataan ottamalla huomioon huokospaine, joka vallitsi samanaikaisesti kärkivastuksen rekisteröityessä. Vaippakitka korjataan huomioiden se huokospaine, joka valitsi myöhemmin tapahtuvan rekisteröinnin aikana.

Huokospainemittauksessa käytetään tarkkuusantureita, joiden muodonmuutoksen tulee olla mahdollisimman pieni. Raot, suodattimet ja kanavat on täytettävä kokoonpuristumattomalla ja ilmatommalla nesteellä tai rasvalla. Vakuunikäsittely glyseriini, keitetty vesi ja rakosuodatinmalleissa valkovaseliini soveltuvat parhaiten tähän tarkoitukseen. Pääsääntöisesti huokospainemittaus tapahtuu antureilla, joissa ilmanpaine vaikuttaa tuloksiin. Tällä on merkitystä yleensä ainoastaan pitkäkestoisissa kairauksissa, esim. huokospaineen tasaantumismittauksissa.

3.2.3 Mittausvälin pituus

CPTU-kairauksessa mitataan sähköisesti kärkivastusta, vaippakitkaa, huokospainetta sekä kairausvyöryä. CPTU-parametrien ja kairausvyöryn maksimi mittaväli (tallennusväli) vaihtelee tarkkuusluokasta riippuen välillä 20...100 mm (kohta 4.1). Vettä läpäisevien, ohuiden maakerrosten tunnistamisessa on suositeltavaa käyttää mahdollisimman tiheää mitausta/tiedon tallennusta: kaapelilla varustetuissa kairoissa 5 mm syvyysväliä ja ns. memocone -kärjissä 10 mm syvyysväliä.

3.2.4 Kairausvyöryn mittaus

Kairausvyöryn sähköisessä mittauksessa sallittu minimitarkkuus riippuu valitusta tarkkuusluokasta (kohta 4.1). Kairausvyöryn mittaus tarkistetaan aina kairauksen aikana tapahtuvien pysäytysten yhteydessä.

3.2.5 Lämpötilariippuvuus

Kaikkien mitta-antureiden ja muun elektroniikan tulee olla mittaustapahtuman koko ajan lämpötilamuutoksista riippumattomia eli lämpötilastabiileja. Kairaa on käsiteltävä siten, että sen lämpötila on mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa (normaalisti 7...8°C) ja lämpötilamuutokset ovat mahdollisimman vähäisiä. Lämpötilan vaihdellessa voimakkaasti mitta-anturit tulee varastoida 0...25°C lämpötilassa. Mikäli kärjen katsotaan olevan riittävän lämpötilastabiili, voidaan sen lämpötilan sallia poikkeavan ± 5 °C ohjearvosta (maan lämpötilasta) kairauksen alussa.

Antureiden nolla-arvot tulisi lukea niin lähellä maan todellista kairauksenaikaista lämpötilaa kuin mahdollista. Mittausstabiiletti nollapisteen liukuman suhteen 50 kN kairoissa on :

- | | |
|-----------------------|--|
| - 2,0 kPa / °C | kärkivastukselle |
| - 0,1 kPa / °C | vaippakitkalle |
| - 0,05...0,1 kPa / °C | huokospaineelle (riippuen anturin mittausalueesta 1...2 MPa) |

4 CPTU-KAIRAUKSEN SUORITTAMINEN

4.1 Kairauskaluston valinta

Tärkeimmät kairauskaluston valinnassa huomioon otettavat tekijät ovat :

- oikean tyyppisen kairakärjen valinta tarvittavien parametrien saamiseksi.
- riittävän tarkan kairaus- ja mittauslaitteiston valinta halutun mittaustarkkuuden suhteen.
- riittävän puristusvoiman omaava kalusto (maan jäykkyyden / lujuuden mukaan).

Kairauskalusto ja mittauslaitteet valitaan kohteen vaativuudesta riippuen taulukossa 1 esitetyn tarkkuusluokituksen mukaan. Tässä TPPT Menetelmäkuvauksessa esitettyihin sovelluksiin kairausluokan tulee olla 1 tai 2.

Taulukko 1. CPTU-kairan tarkkuusluokitus.

Kairausluokka	Mitattu parametri	Sallittu minimitarkkuus ^(1,2)	Mittavälin maksimi pituus
1	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairausvyvyys	50 kPa tai 3 % 10 kPa tai 10 % 5 kPa tai 2 % 0,1 m tai 1 %	20 mm
2	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairausvyvyys	100 kPa tai 3 % 25 kPa tai 15 % 25 kPa tai 3 % 0,2 m tai 2 %	20 mm
3	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairausvyvyys	400 kPa tai 5 % 50 kPa tai 15 % 50 kPa tai 5 % 0,2 m tai 2 %	50 mm
4	Kärkivastus Vaippakitka Kairausvyvyys	500 kPa tai 5 % 50 kPa tai 20 % 0,1 m tai 1 %	100 mm

¹⁾ Mitattujen parametrien sallittu minimitarkkuus on suurempi taulukossa 1 esitetyistä arvoista.

²⁾ Suhteellista tai prosentuaalista (%) mittaustarkkuutta tulee käyttää mieluiten.

Kairausluokissa 1 ja 2 ei kuluneita tiivisteitä sallita.

4.2 Suodatin

Suodattimelle tehtävät tarkistukset ja esivalmistelut ennen kairautta ovat :

1. Arvioidaan huokospainekairauten lukumäärä ja varataan mukaan ainakin yksi suodatin jokaista huokospainemittauspistettä kohden.
2. Varmistetaan suodattimen oikea ja helppo asennettavuus käytettävään kärkeen.
3. Tarkistetaan suodattimen oikea halkaisija käytettävään kärkeen.
4. Asennuksen jälkeen suodattimen tulee olla helposti sormin kierrettävissä - ei kuitenkaan liian löysästi.

4.3 Suodattimen kyllästäminen ja nesteiden käsittely

Suodatin kyllästetään esitarkistuksen jälkeen. Huokossuodattimen kyllästämisessä käytetään yleensä joko vettä tai glyseriiniä. Rakosuodatin täytetään vaseliinilla tai muulla vastaavalla aineella.

Kun kairataan maassa, jossa esiintyy negatiivista huokosvedenpainetta, suodatin kyllästetään glyseriinillä. Negatiivista huokospainetta syntyy, kun kairataan esimerkiksi tiiviissä hiek-

ka- tai silttikerroksessa, ylikonsolidoituneessa savessa, ei-kyllästyneessä maassa tai kairataan kuivakuorikerroksessa ilman alkukairausta. Muissa tapauksissa voidaan suodattimen kyllästysnesteeksi yleensä valita vesi.

Vedellä kyllästäessä suodattimia keitetään vähintään 15 minuuttia. Tämän jälkeen suodattimet ja vesi saavat jäähtyä ilmalukolla varustetussa astiassa. Suodattimia säilytetään ilmattomalla vedellä täytetyssä ilmatiiviissä astiassa. Maastoasennuksessa tarvitaan lisäksi 10...20 litraa ilmatonta vettä. Ilma voidaan poistaa vedestä esimerkiksi alipainepumpun avulla. Veden jäätyminen tulee estää, koska jäänyt vesi voi helposti rikkoa huokospaineanturin.

Glyseriiniä käytettäessä kuivat suodattimet asetetaan ensin glyseriiniin ja astiaan imetään suurehko alipaine parin tunnin ajaksi. Samassa yhteydessä käsitellään suurempi määrä glyseriiniä myöhempää maastokäyttöä varten. Suodattimet ja nesteet tulee säilyttää ilmatiiviissä säiliöissä.

Rakosuodattimissa käytetään yleensä glyseriinin sijasta vaseliinia. Vaseliinin etuna on se, ettei se jäädy ja näin ollen sen käyttö myös talvella on helppoa ja turvallista. Kärkikappaleen huokostiehyet täytetään vaseliinilla esimerkiksi suurikokoista injektioruiskua käyttäen. Kärkikappale ja rakosuodatin asennetaan toisiinsa siten, että vaseliini pursuaa rakosuodattimen reunojen alta. Tämän jälkeen kärkikappale ja suodatinosa painetaan vaseliiniin. Vaseliinista poistetaan ilma alipainetta käyttäen.

Rakosuodattimen käyttö saattaa joissakin tapauksissa aiheuttaa epätarkkuutta huokospainemittauksissa. Toisaalta menetelmä helpottaa asennusta ja nestetaso on mahdollista säilyttää suhteellisen hyvin tiiviissä ja vettä vähän sisältävässä maassa.

Glyseriini tai vaseliini tulee poistaa huolellisesti kairan pinnalta esimerkiksi asetonilla, jottei kärkikartion ja kitkahylsyn ylimääräinen liukkaus vaikuta mittaustuloksiin.

4.4 Suodattimen ja kärjen asennus ja nestetäyttö

Suodattimen ja kärjen asennus ja nestetäyttö ovat kriittisimmät vaiheet koko kairauksen onnistumisen kannalta, joten erityistä huomiota tulee kiinnittää :

- suodattimien ja nesteiden ilmaukseen,
- kuljetukseen ja varastointiin,
- suodattimen asentamiseen maastossa sekä
- ilmatomien nesteiden säilytysastioiden laatuun.

Vedellä kyllästetyt suodattimet

Mikäli kairassa ja suodattimessa käytetään nesteenä *vettä*, voidaan suodatin asentaa seuraavanlaisella SGI:n käyttämällä menetelmällä /1/:

1. Irrotetaan kärkikappale ja sijoitetaan se yhdessä suodattimen, tiivisteiden ja muiden irtosiemenien kanssa astiaan, jossa on ilmatonta vettä.
2. Täytetään osat huolellisesti nesteellä ja poistetaan ilmakuplat mäntäruiskun avulla.
3. Suljetaan suodattimien säilytysastiat ja vesisäilytysastiat viipymättä.
4. Käännetään kaira ylösalaisin.
5. Täytetään kairan tyhjät tilat ja kanavat nesteellä ja neste tiivistetään painamalla kumipallo kairan alaosaan vastaan.
6. Käännetään kärki ja viedään alaosa säiliöön vedenpinnan alle ja poistetaan kumipallo.
7. Kootaan kaira veden alla.

8. Pidetään kairan alaosa edelleen veden alla ja tarkistetaan suodattimen asettelu toteamalla, että sitä voidaan pyörittää sormenpäillä.
9. Täytetään muovipussi vedellä ja viedään se kairan alapään ympärille.
10. Viedään kärki esiporattuun vedellä täytettyyn kairausreikään kärjen ollessa edelleen vedellä täytetyssä muovipussissa
11. Vedetään muovipussi pois (ylös) kairan ollessa riittävästi veden alla, jolloin muovipussi rikkoutuu.

Täysin veden alla tapahtuva kokoaminen ja siirtely estää mahdollisen ilman tunkeutumisen järjestelmään. Menetelmää voidaan soveltaa myös käytettäessä glyseriiniä. Tällöin ei kokoamiseen tarvita muovipussia.

Glyseriinillä kyllästetyt suodattimet

Ks. Kairausopas VI /4/.

4.5 Lämpötilan tasaaminen

Lämpötilan tasaamisella kärjen lämpötila pyritään saattamaan mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa ennen nolla-arvojen lukemista. Maan lämpötila yli 2 m syvyydellä Etelä-Suomessa on keskimäärin n. 6...8°C ja Keski-Suomessa 4...6°C sekä Pohjois-Suomessa n. 2...4°C.

Kairan kärjen lämpötilan annetaan tasaantua ympäröivän maan lämpötilaan vedellä täytetyssä (alkukairaus)reiässä riittävä aika ennen kairauksen aloittamista. Kokemusperäisesti CPTU-kärki tarvitsee lämpötilan tasaantumiseen n. 10 minuuttia. Aika kuitenkin vaihtelee kärkityypistä riippuen. Mikäli kärjellä katsotaan olevan hyvä lämpötilavakavuus, sallitaan kärjen lämpötilan kairauksen alussa poiketa $\pm 5^{\circ}\text{C}$ maan lämpötilasta.

Mikäli kärki on varustettu lämpötila-anturilla, luetaan ensin lämpötilalukemat. Samalla varmistetaan lämpötilan vakaus sekä sen pysyminen sallittujen rajojen sisällä. Muussa tapauksessa kärjen annetaan sopeutua se aika, minkä kyseinen kärkityyppi vaatii tasaantuakseen lämpötilakalibroinnin aikana (valmistajan ohjearvot).

Mitta-antureiden vakautta tulee seurata. Mikäli kairaus aloitetaan maanpinnasta ja kairan kärki sopeutetaan lämpötilaan vedellä täytetyssä alkukairausreiässä, täytyy kairan alaosa suojata glyseriinillä täytetyillä muovipussilla tasaantumisen ajaksi.

4.6 Nolla-arvojen mittaus

Mitta-antureiden nolla-arvot luetaan ennen kairausta, kun kärjen lämpötilan tasaantuminen ja elektroniikan vaatima lämpeneminen on tapahtunut. Kärjen tulee riippua vapaasti. Mikäli nolla-arvot luetaan kärjen ollessa vedellä täytetyssä (alkukairaus)reiässä, kärjen syvyys maanpinnasta täytyy olla tiedossa nolla-arvoja luettaessa. Vastaavalla tavalla huomioidaan kärjen syvyys maanpinnasta, kun luetaan kairaussyvyys nolla-arvoa. Talvella kylmässä säässä ja kuumana kesäpäivänä nolla-arvot tulee lukea mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa.

5 KAIRAUSTULOSTEN ESITTÄMINEN

5.1 Laskentaparametrit

CPTU-kairauksessa mitataan seuraavat perusparametrit:

- kokonaiskärkivastus q_T
- kokonaisvaippavastus f_T
- kokonaishuokospaine u

Parametrien q_T ja f_T korjaamiseksi on huokospaine (u) mitattava kärjen kannan ja kitkahylsyn välistä (standardi-menetelmä). Ainoastaan standardi-menetelmällä mitatuista huokospaineiden arvoista käytetään merkintöjä u (ja Δu).

Kairaustulosten tulkitsemiseen tarvitaan lisäksi perusparametrejä :

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

Maassa vallitseva huokospaine arvioidaan kairauksen aikana havaitun pohjavedenpinnan perusteella sekä läpäisevissä kerroksissa mitattujen tasaantuneiden huokospaineiden perusteella. Mikäli jälkimmäisiä arvoja ei ole käytettävissä, on tehtävä täydentäviä huokospainemittauksia muutamilla tasoilla.

Vallitseva pystysuora jännitystila arvioidaan maan tiheyden avulla. Tällöin arviointi perustuu yleensä kairaustuloksiin ja niiden avulla määritettyihin maalaji- ja tiiviysarvioihin. Savessa ja orgaanisessa maassa luotettavampi kairaustulosten monipuolinen tulkinta edellyttää näytteenottoa sekä juoksurajan w_L määrittämistä. Maanäytteistä voidaan tällöin määrittää myös tiheys.

Kairaustulosten tulkitsemiseksi saadaan perusparametrien avulla johdettua seuraavia lisäparametrejä, joita käytetään alkuvaiheen tulkinnassa ja maalajimäärittämisessä :

- kehittynyt huokosylipaine $\Delta u = u - u_0$
- kitkasuhde $R_f = (f_T / q_T) \cdot 100 \%$
- huokospainesuhde $B_q = \Delta u / (q_T - \sigma'_{v0})$

5.2 Kairaustietojen esikäsittely

5.2.1 Huokospaineiden korjaaminen

CPTU-kairauksen aikana kaikki parametrit mitataan yhtä aikaa ja arvot tallentuvat tietyn yhden syvyyden kohdalle. Kärjen rakenteesta johtuen kärkivastus mitataan n. 17 mm vastavaa huokospainetta alempana ja vaippakitka n. 110 mm kärkivastusta ylempänä (luku 3.3.2). Tämän vuoksi mitatut kärkivastuksen ja vaippakitkan arvot eivät täysin vastaa oikeita arvoja, koska huokospaine ei ole rekisteröitynyt samalta tasolta. Kärkivastuksen ja vaippakitkan arvot korjataan laskemalla niiden arvot käyttämällä todellisia huokospaineen arvoja juuri oikealla tasolla. Käytännössä korjatut arvot saadaan siirtämällä vaippavastuksen arvoja n. 90

mm alaspäin ja kärkivastuksen 15 mm ylöspäin. Mikäli mittausten taltiointi tapahtuu 20 mm välein, käytetään vaipan osalta tason korjaamisen arvona 80 mm ja 20 mm kärjen osalta

5.2.2 Parametrien muokkaus jatkokäsittelyä varten

Huokospainearvot suhteessa kairausvyönteeseen esitetään mahdollisimman tarkasti eriteltynä. Kärkipaineen ja vaippakitkan mittausravot korjataan kalibrointitietojen sekä yhtäaikaan rekisteröityjen huokospaineiden mukaan.

Parametrien R_f ja B_q :n laskemiseksi käytetään kärkivastuksen, vaippakitkan ja huokospaineen keskiarvoja. Eri parametrien keskiarvojen laskemisessa sekä kairausvyönteiden suhteuttamisessa on otettava huomioon, että mittaukset tapahtuvat kairakärjen eri kohdissa, luku 3.2.2. Kärkivastuksen ja vaippakitkan korjauksen jälkeen kairausvyönteet lasketaan uudelleen liukumien huomioon ottaen.

5.3 Tietojen jatkokäsittely

Mittaustulosten jatkokäsittelyssä virheelliseksi tulkittua tietoa voidaan harkitusti karsia. Esimerkiksi suhteellisen pienet kärkivastus- ja huokospainelukemat sekä suuret vaippakitkan arvot voidaan harkintaa käyttäen jättää pois tuloksista, jos niiden voidaan todeta syntyneen kairauksen pysäytystasoilla (esim. kairatankojen jatkamisen tai kairauskaluston vaihdon takia). Muita "piikkejä" savessa kairattaessa aiheuttavat esim. karkeammat maa-ainekset. Näitä ei tule poistaa virheinä.

Ohuiden maakerrosten kohdalla, kun tuloksia käsitellään edelleen maaparametrien määrittämiseen, voidaan tarvittaessa tehdä manuaalinen arviointi, koska 'oikeiden', maakerrosta parametrisoinnissa kuvaavat kärkivastus-, vaippakitka- sekä huokospainearvot edustavat maakerroksen arvoja vasta, kun kerrospaksuus on 0,2...0,4 m. Kairausvastusarvoja, jotka on tällä tavoin manuaalisesti käsitelty, ei tule käyttää sellaisissa yhteyksissä, joissa pohjatutkimustuloksia esitetään pohjatutkimusleikkauksissa. Näissä esitetään suorat mittaustulokset, joista on poistettu vain selvästi havaitut virheet. Epäselvissä tapauksissa kairaus tulokset esitetään suorina mittaustuloksina virheineenkin, jolloin tulkitseijan vastuulle jätetään kairausmenetelmän virheiden tunnistaminen.

Ohuempia kerroksia voidaan havaita ja luokitella tutkimalla vallitsevan huokospaineen mitausarvoja, jolloin mahdolliset vaihtelut yhdistetään vastaavilla tasoilla mitattuihin kärkivastus- ja vaippakitka-arvoihin. Tuloksia voidaan verrata myös alueelta otettuihin maanäytteisiin sekä lähiympäristön kairauksissa mitattuihin vastaaviin huokospaineisiin. Ohuiden maakerrosten luokittelu on mahdollista tehdä ainoastaan manuaalisesti ja se tehdään ennen tulkin-taohjelman käyttöä.

Mittaustulosten käsittelyssä maa jaetaan geoteknisiin maakerroksiin ja parametrit määritetään ko. kerroksissa. Jokaiseen geotekniseen maakerrokseen luetaan korjatut parametrit ko. kerroksesta.

5.4 Tulosten arviointi ja tarkastaminen

CPTU-kairauksen päätarkoitus ei ole yksityiskohtaisen maalajimäärittelyn tekeminen, vaan tulosten avulla kartoitetaan maakerrosten jatkuvuus ja kerrosrajat painuman laskentaa varten (TPPT Menetelmäkuvaus 19 Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla). Samalla saadaan **yleispiirteinen käsitys maan ominaisuuksista**. Kairaus tulosten lopullinen käsittely painumalaskennan lähtötietojen tarpeisiin voidaan tehdä tulkitsevia tekijöiden ohjelmien avulla, mikä helpottaa sekä laskemista että piirtämistä.

Tulkintaohjelmat tekevät maalajimäärityksen 'sokeasti' myös niissä maakerroksissa, joissa alustavaakaan manuaalista maalajinmääritystä ei voida tehdä. Edellä esitettyjen vaikeuksien ja moniselitteisten tulkintamenetelmien vuoksi tulee tulkintaohjelmalla luotu maalajimääritys tarkastaa manuaalisesti. Saatua maalajimääritystä verrataan läheisten kairauspisteiden tietoihin ja tarvittaessa tulkintaa korjataan maanäytteiden sekä muiden maan ominaisuuksista asiantuntijalle kertovien seikkojen perusteella. Vastuu tehdyistä tulkinnoista on viimekädessä tulkitsijalla eikä tulkintaohjelmalla laatijalla. Tulkintaohjelmat on tarkoitettu helpottamaan ja nopeuttamaan manuaalista, päättelyyn perustuvaa tulkintaa - ei korvaamaan sitä.

6 KAIRAUSTULOSTEN TULKINTA

6.1 CPTU-kairauksen tulkittavuus

CPTU-kairauksessa rekisteröidään kärkivastus ja vaippakitka sekä yleensä myös huokospaine. Kairaustulokseen vaikuttavat monet eri tekijät eikä yksiselitteistä maaperäluokitusta voi tehdä pelkästään CPTU-parametrien perusteella. Luokitukseen tarvitaan lisäksi tietoja, joita saadaan mm:

- vallitsevan huokospaineen mittauksista,
- maanäytteistä,
- mitatuista lisäparametreista sekä
- rinnakkaisista muista kairauksista (esim. siipi- ja painokairaukset).

Yleensä CPTU-kairaustuloksia tulkitaan suoraan kairausdiagrammeista ja apuna käytetään kairajaan tekemiä muistiinpanoja. CPTU-kairausten tulkinta edellyttää kuitenkin käytännön kokemusta kairausmenetelmästä. Diagrammitulkinnat tulee varmistaa samasta paikasta otettujen maanäytteiden perusteella. Rinnakkaistutkimuksista puristinkairaus- ja painokairausdiagrammit korreloivat yleensä suhteellisen hyvin keskenään, mutta heijarikairaus ja puristinkairaus huonommin.

6.2 CPTU-kairauksessa mitattavat suureet

6.2.1 Kärkivastus

Kärkivastuksen suuruus kuvaa maan tiiviyyttä ja erilaisten kerrosten vaihteluita. Kärkivastuskäyrän säännöllisyyden perusteella voidaan arvioida maan rakeisuutta. CPTU-kairauksen erottelutarkkuus on suhteellisen hyvä hienorakeisesta maasta aina soraan asti, edellyttäen kuitenkin sopivaa kärkeä. Suomessa soraa karkeammilla maalajeilla kärkivastuskäyrät ovat niin epäsäännöllisiä, että niiden tulkitseminen yksikäsitteisesti ei onnistu.

Erittäin kerroksellisessa maaperässä eri maakerrosten tiiviiden määrittäminen on vaikeaa. Kärkivastuksen arvoon vaikuttaa niin ylä- kuin alapuolinenkin maa etäisyydeltä, joka vastaa n. 5...10 kertaa kärjen halkaisijaa. Löyhemmän maan ympäröimä tiivis maakerros tulee olla 0,2...0,4 m paksu, jotta sen ominaisuudet rekisteröityisivät kunnolla. Vastaavasti löyhän maakerroksen tiiviiden kerrosten välissä tulee olla 0,2...0,4 m paksu, jotta se erottuu kairauksissa kunnolla.

Maan ominaisuudet vaikuttavat kärkivastukseen siten, että kärkivastus on sitä suurempi,

- mitä karkeampi maa-aines on kyseessä,
- mitä suurempi maassa vallitseva pystyjännitys (σ_{vo}) on,
- mitä suurempi vaakapaine maassa vallitsee,
- mitä suurempi on maan tiiviysaste ja
- mitä suurempi on maan ylikonsolidaatioaste.

6.2.2 Vaippakitka

Vaippakitka mittaa mm. kairauksen aikana syntyviä vaakasuuntaisia paineita, jolloin sen arvo riippuu maalajista sekä sen ylikonsolidoitumisasteesta. Maalajien vaihtelua voidaan arvioida karkivastuksen ja vaippakitkan muutoksen (kitkasuhde $R_f = f_T/q_T$) perusteella.

Maan ominaisuudet vaikuttavan vaippakitkan arvoon siten, että vaippakitka on sitä

- pienempi mitä karkeampi maa-aines on kyseessä,
- pienempi mitä tiiviimpää kitkamaa on,
- pienempi mitä suurempi on maan sensitiivisyys ja
- suurempi mitä suurempi on koheesiomaan ylikonsolidaatioaste.

6.2.3 Huokospaine

Automaattisen huokospainemittauksen ansiosta hyvinkin ohuet maakerrokset saadaan rekisteröityä. Maalajeja voidaan arvioida esimerkiksi huokospainesuhteen (B_q) avulla. Huokospaineen suuruus kuvaa myös saven suljettua leikkauslujuuutta. Tulosten tulkintaa vaikeuttaa mm. maan ylikonsolidoitumisasteen vaikutus huokospaineeseen. Huokospainemittausten tarkkuutta rajoittaa lähinnä mittausarvojen lukutiheys sekä huokospaineen mittausjärjestelmän reagointinopeus.

Kairaustulosten tulkinta vaikeutuu, mikäli kairattu maa ei ole täysin vedellä kyllästynyt tai maan lämpötila vaihtelee runsaasti sekä yleensä ylikonsolidoituneessa maassa. Vaikeasti tulkittavissa maakerroksissa voidaan lyhyillä pysähdyksillä ja huokospaineen tasaantumisen seurannalla parantaa tulosten tulkittavuutta.

Erityisesti ohuen maakerroksen tulkinnessa (esimerkiksi kitkamaakerros savessa) on syytä tutkia lähellä sijaitsevien kairauspisteiden tulokset, jotta varmistutaan tulkitun kerroksen oikeellisuudesta ja laajuudesta. Paksutkin kerrokset voivat joskus olla paikallisia "linssejä" tai laajuudeltaan hyvinkin vaihtelevia.

Maan ominaisuudet vaikuttavat huokospaineeseen siten, että huokospaine on

- sitä korkeampi, mitä hienorakeisempi maa-aines on kyseessä,
- sitä suurempi, mitä suurempi on koheesiomaan suljettu leikkauslujuus,
- sitä pienempi, mitä suurempi on kitkamaan tiiviysaste,
- sitä pienempi, mitä suurempi on maan ylikonsolidaatioaste ja
- sitä suurempi, mitä suurempi on maalajin sensitiivisyys.

Lisäksi huokospainemittauksen tuloksia käsiteltäessä on huomattava, että

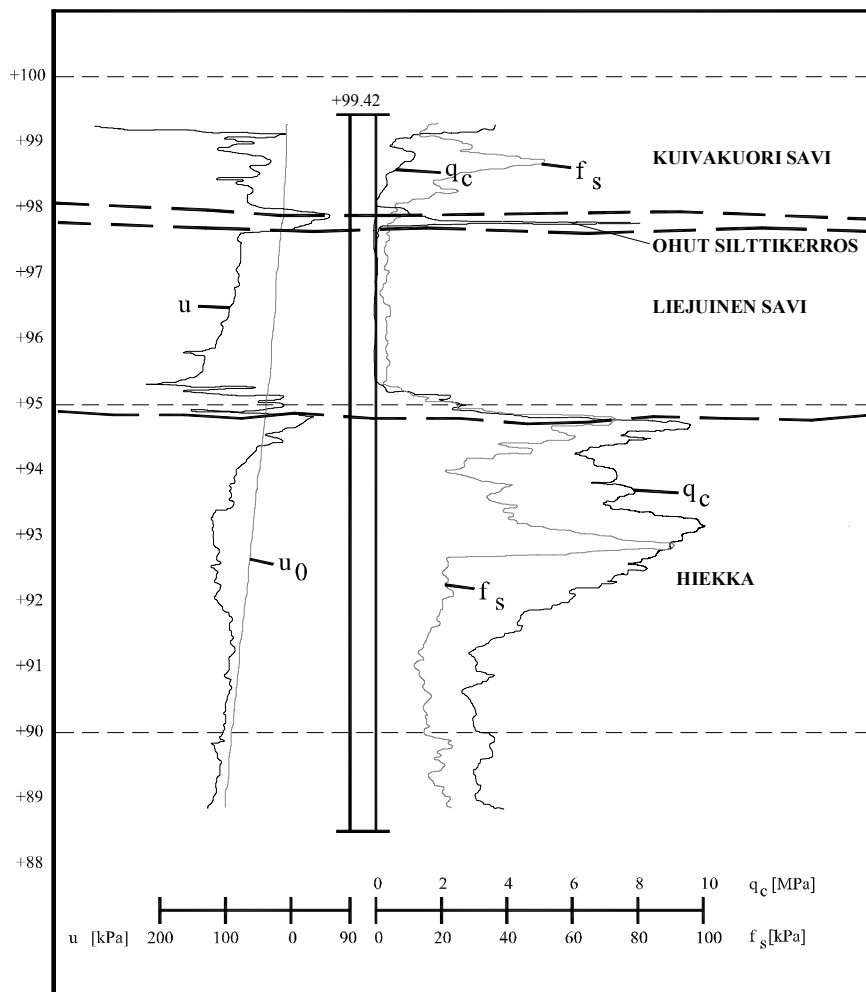
- mitä suurempi maan ylikonsolidaatioaste on, sitä suurempi ero on kärjen kartio-osan ja yläpuolisten osien huokospainearvoissa.
- mitä hienompi maa-aines on kyseessä, sitä pidempi aika vaaditaan huokospaineen tasaantumiseen.

6.3 Maalajitulkinnat

6.3.1 Maalajitulkinta kairausdiagrammista

CPTU-kairaustulokset tulkitaan yleisesti kairausdiagrammin ja kairaajan muistiinpanojen perusteella. Kairaajan tekemät muistiinpanot kairauksen aikana ovat tärkeitä. Lisäksi on olemassa kokeellisiin tutkimuksiin perustuvia luokitusdiagrammeja, joissa kuvataan karkivastuksen ja vaippakitkan suhteen vaihtelua eri maalajeissa. Tasarakeisessa hiekkamaassa ja "puhtaassa" savessa luokitusdiagrammeilla saadaan suhteellisen tarkkoja maalajitulkintoja. Mikäli määrittelyt ovat ristiriidassa esimerkiksi rinnakkaistutkimusten tulkintojen kanssa, maalajimäärittely on tehtävä useampia arviointimenetelmiä käyttäen (esim. näytteenotto).

Kuvassa 9 on esimerkki CPTU-kairausdiagrammista. Oikealla puolella olevat käyrät kuvaavat kärkivastuksen (q_c) ja vaippakitkan (f_s) muutoksia. Vasemmalle puolelle on tulostettu huokospainetta kuvaavat käyrät eli maassa vallitseva huokospaine (u_0) sekä kairauksen aikana rekisteröityvä huokospaine (u). Kaikki käyrät tulostuvat kairaus­syvyyden mukaan.



Kuva 9. Esimerkki CPTU-kairausdiagrammin tulkinnasta.

Kuvan 9 diagrammia voidaan tulkita seuraavasti :

- Kuivakuorikerros tai tiivis täytekerros lävistetään yleensä alkukairauksella, jotta huokospaineen mittaustilan nestettä poistuisi.
- Savelle on tyypillistä tasainen tai lievästi syvyyden mukana kasvava kairausvastus ja vaippakitka. Savinen lieju erottuu savesta normaalisti pienempänä kärkivastuksena. Liejua ei voida erottaa savesta pelkästään kärkivastuksen absoluuttisen suuruuden perusteella. Liejulle tyypillistä on se, ettei kärkivastus kasva syvyyden mukana. Näytteenotolla on syytä varmistua, että kyseessä on lieju.
- Ohuet silttikerrokset tulevat ilmi piikkeinä sekä myös juuri kerroksen kohdalla selvänä huokosvedenpaineen laskuna alle maassa vallitsevan huokospaineen. Paksummissa silttikerroksissa kärkivastus vaihtelee teräväpiirteisesti ja vaippakitka on suurempi kuin savessa. Vaippakitkassa on usein myös jatkuvaa pientä vaihtelua.

- Hiekassa kärkivastuksen muutokset ovat paljon loivempia kuin silteissä. Kivettömässä tasarakeisessa hiekassa vaippakitka voi olla hyvin saven kaltainen, mutta yleensä kuitenkin merkittävästi suurempi kuin savessa. Kivisessä maaperässä ovat suuretkin vaippakitkan vaihtelut mahdollisia. Siltin ja hiekan kärkivastuksen muodon ero johtuu rakekoosta ja huokospaineen vaihtelusta.

6.3.2 Alustava maalajimäärittäminen

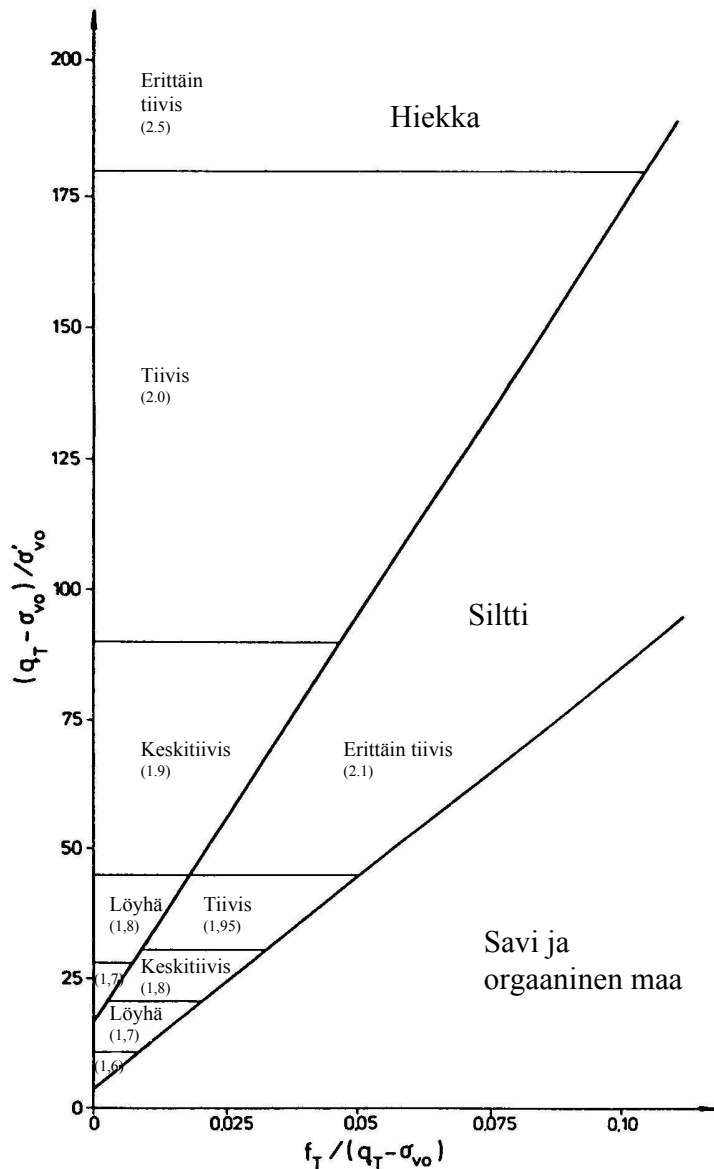
Alustavassa maalajimäärittämisessä CPTU-kairausten perusteella edetään seuraavasti :

1. Lasketaan eri kerroksissa vallitseva pystysuora jännitys ($\Delta\sigma_{v0}$) tunnetuilla tiiviysarvoilla.
2. Lasketaan mitattujen huokospaine- ja vaippapaine-avojen avulla maassa vaikuttava 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 tiiviydet joko määritetään tulosten perusteella tai niiden puuttuessa käytetään lähintä tulosten perusteella määritettyä yläpuolisen maan tiiviysarvoa.
4. Lasketaan normalisoitu nettokärkivastus $(q_T - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$ ja parametri $f_T/(q_T - \sigma_{v0})$ eri tasoissa.
5. Arvioidaan maalaji luokitusdiagrammin perusteella (*Kuva 10*).

Eräiden kokemusten mukaan kuvan 10 luokitusdiagrammin saven ja orgaanisen maan erotuslinja pitää suhteellisen hyvin paikkansa, mutta hiekka- ja siltti- ryhmien rajoja on pidettävä suuntaa antavina. Mikäli nettokärkivastus on $\geq 1,5$ MPa, luokitellaan maa hiekaksi. Jos nettokärkivastus on ≥ 500 kPa, luokitellaan maa siltiksi.

Rajanveto eri maalajien välille on vaikeaa ja luokitusdiagrammit pätevät vain suhteellisen tasarakeisissa maissa. Maa-ainekset, jotka sijoittuvat lähelle hiekan ja siltin rajaa, voivat muodostua siltistä, hiekkaisesta siltistä, siltisestä hiekasta tai hiekasta. Vastaavasti luokitusdiagrammin perusteella siltialueelle lähelle koheesiomaata sijoittuva maa-aines voi olla myös savinen siltti. Maamateriaalit, kuten hiekkainen savi ja hienorakeinen moreeni, asettuvat maan savipitoisuudesta riippuen siltti- tai savirajojen sisään.

Yksinkertaista kärkivastukseen ja vaippakitkaan perustuvaa maalajitulkintaa ei pidä käyttää yksinään. Maalajimäärittämisessä tulee aina tehdä vertailevia tarkasteluita mitattuihin vallitseviin huokosylipaineiden arvoihin. Eri tekijöiden vaikutus mitattuihin parametreihin on monimutkainen. Tällöin on olemassa riski, että suhteellisen suuria huokosylipaineita muodostavat kerrokset luokitellaan puhtaaksi hiekaksi vain maan tiiviyyden ja alhaisen vaippakitkan perusteella.



Kuva 10. Hiekan ja siltin luokitusdiagrammi sekä koheesiomaan erotuslinja. Suluissa arvioitu kiintotiheys (t/m^3) täysin kyllästyneessä tilassa /1/.

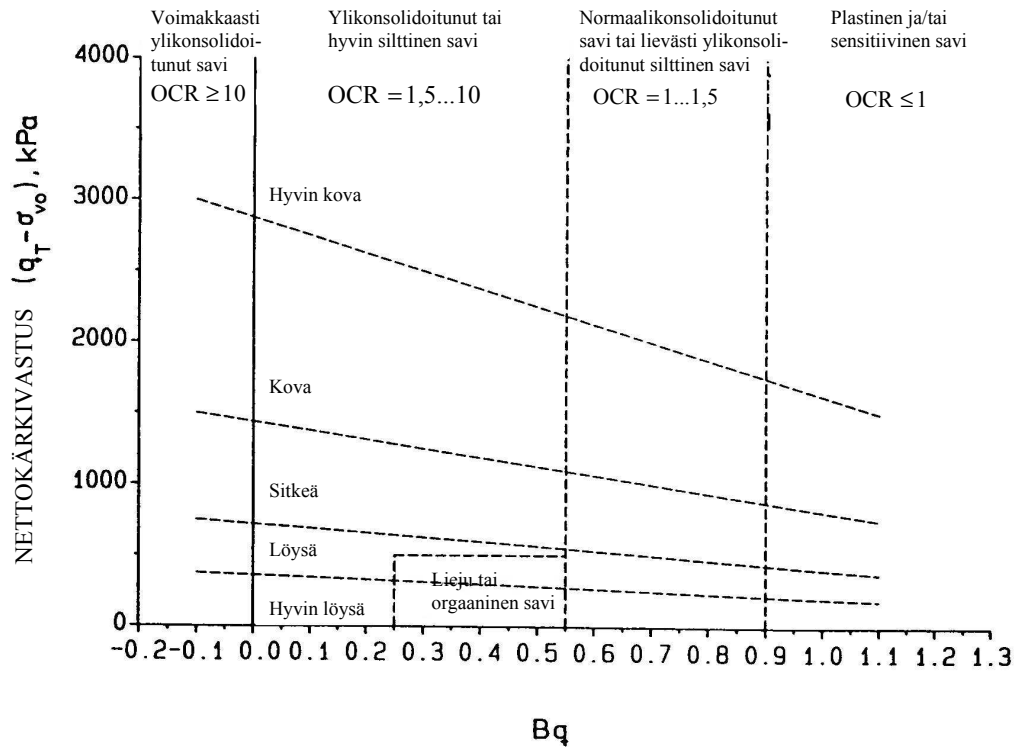
Tulkintaan vaikuttavat virhelähteet

Löyhässä savessa mitattu vaippakitka on hyvin pieni. Tällöin kuvan 10 luokitusdiagrammin antama tulos on epävarma, koska pieni vaippakitkan arvo antaa kitkasuhteeksi pienen arvon, joka viittaa kitkamaahan.

Kuvan 10 luokitusdiagrammin antama tulos voi olla virheellinen sensitiivisissä ja/tai silttisissä savissa, joissa vaippakitka voi olla hyvin pieni, mutta toisaalta maa vallitsevan pystyjännityksen perusteella sijoittuisi siltti-ryhmään. Tällaisissa savissa kairattaessa syntyy usein korkeita huokospaineita. Luokiteltaessa maa siltiksi tai saveksi on tarkastettava, onko B_q :n arvo suurempi vai pienempi kuin 0,6. Tällöin pystytään arvioimaan, voidaanko sitä käyttää maala-jimäärittelyyn. Pintakerroksissa voi normalisoidun nettokärkivastuksen käyttö aiheuttaa virhettä, koska pystyjännitykset ovat usein pieniä.

6.3.3 Koheesiomaalajien luokitus

Mikäli maakerros on alustavassa maalajimäärityksessä tulkittu kuvan 10 diagrammin perusteella tai tarkistuksen jälkeen ”*saveksi tai orgaaniseksi maaksi*”, tarkennetaan näiden maalajien tulkintaa erikoisdiagrammeilla (kuva 11). Diagrammi perustuu nettokärvivastukseen ($q_T - \sigma_{vo}$) sekä huokospainesuhteeseen $B_q = \Delta u / (q_T - \sigma_{vo})$.



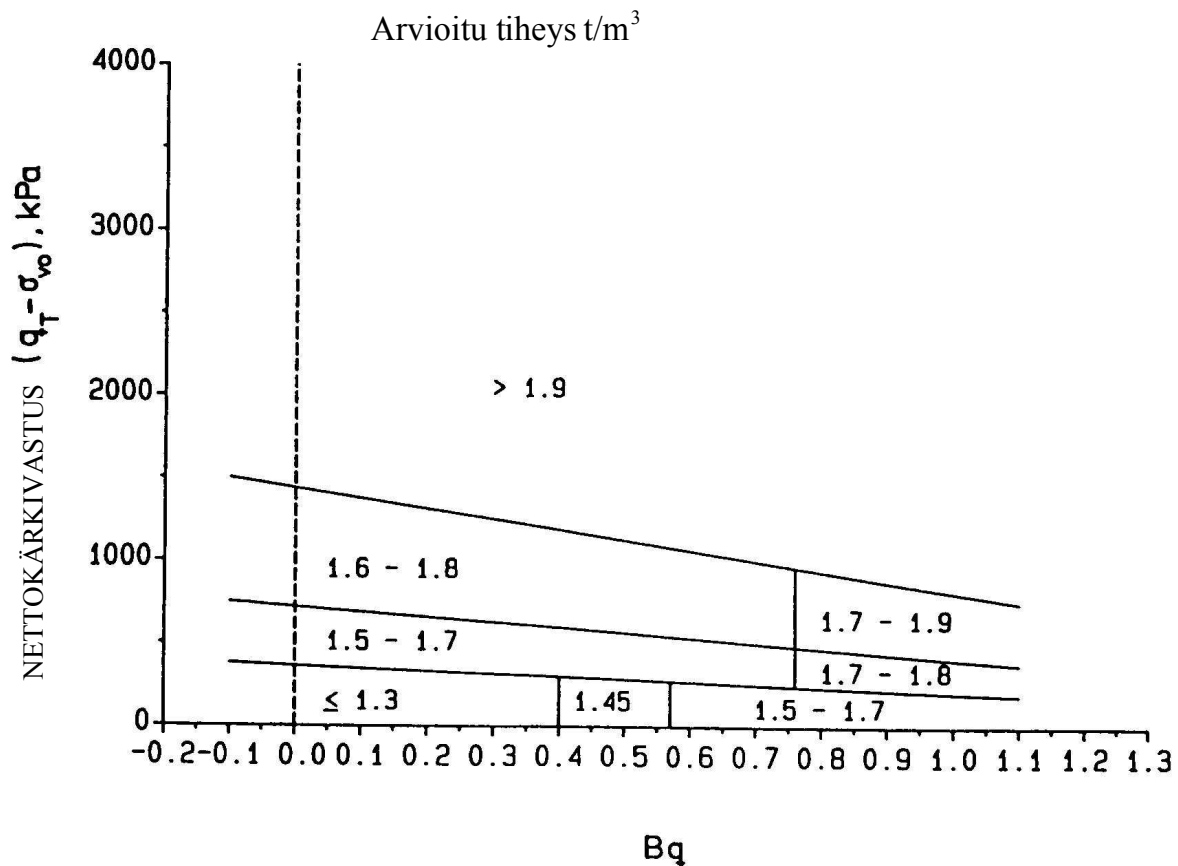
Kuva 11. Saven ja orgaanisen maan luokitusdiagrammi /1/.

6.3.4 Maalajin tiiviyyden arvioiminen

Koheesiomaan tiiviys (tiheys) voidaan suuntaa-antavasti määrittää kuvan 12 mukaan. Nettokärvivastuksen (q_T) perusteella tiiviysluokka voidaan esittää taulukkomuodossa 2 seuraavasti:

Taulukko 2. Maakerroksen tiiviysluokan arviointi CPTU-nettokärvivastuksen perusteella /1/

Tiiviysluokka	Nettokärvivastus	
	Hiekka	Siltti
Hyvin tiivis	> 20 MPa	> 10 MPa
Tiivis	> 10 MPa	> 5 MPa
Keskitiivis	> 5 MPa	> 2,5 MPa
Löyhä	> 2,5 MPa	> 1,0 MPa
Hyvin löyhä	< 2,5 MPa	< 1,0 MPa



Kuva 12. Koheesiomaan tiheyden arvioiminen CPTU-kairaustulosten perusteella [1/].

6.4 Geoteknisten parametrien arvioiminen

6.4.1 Parametrien pätevyys ja luotettavuus

Tässä TPPT menetelmäkuvauksessa esitettyjä kaavoja ja käyrästöjä on pidettävä suuntaa-antavina. Yksinomaan CPTU-kairauksen perusteella arvioituja geoteknisiä parametrejä ei tule käyttää mitoitusparametreinä painuma- tai muissakaan laskelmissa. Käytännössä ai-noastaan **maan leikkauslujuutta ja kitkakulmaa pystytään toistaiseksi varovaisesti arvioimaan** CPTU-kairaustulosten perusteella.

CPTU-kairauksen perusteella määritettävien geoteknisten parametrien luotettavuutta tulee parantaa ottamalla vähintään yksi häiriintymätön/häiritty maanäyte jokaisesta tulkittavasta maakerroksesta. Lisäksi CPTU-kairaustulosten vertailupohjan parantamiseksi maastossa tulee tehdä muita rinnakkaisia tutkimuksia, esimerkiksi siipikairauksia.

Maanäytteistä tutkitaan laboratoriossa standardikokein ainakin seuraavat geotekniset ominaisuudet:

- rakeisuus (seulonta ja areometrikoe),
- vesipitoisuus,
- humuspitoisuus ja
- juoksuraja (koputuskoe)

6.4.2 Suljetun leikkauslujuuden arviointi

Hienorakeisen maan suljettua leikkauslujuutta (s_u) voidaan arvioida nettokärkivastuksen ($q_T - \sigma_{v0}$) ja maan juoksurajan (w_L) avulla kaavalla (9).

$$s_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{13,4 + 6,65 \cdot w_L} \quad (9)$$

Kaavalla (9) laskettu leikkauslujuus vastaa melko hyvin korjattua siipikairalujuutta ja suoran leikkauskokeen arvoja. Kaavaa (9) käytettäessä on kuitenkin huomioitava seuraavat asiat :

- Leikkauslujuuden ja nettokärvivastuksen välinen suhde on herkkä maan juoksurajalle.
- Saatu leikkauslujuus on määritettävissä ainoastaan homogeeniselle maalle.
- Murtuneessa/epähomogeenisessa maassa leikkauslujuus saatetaan yliarvioida kärjen pienen vaikutusalueen vuoksi.

Hyvin murtuneessa ja epähomogeenisessa maassa laskelmissa huomioidaan ainoastaan puolet kaavan (9) antamasta leikkauslujuuden arvosta.

Mikäli maan juoksurajan arvoa ei tiedetä, leikkauslujuutta voidaan arvioida SGI:n mukaan /1/ kaavoilla (10) ja (11).

$$s_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{16,3} \quad \text{savi} \quad (10)$$

ja

$$s_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{24} \quad \text{lieju} \quad (11)$$

Leikkauslujuuden määrittystarkkuus riippuu lähinnä kairastarkkuudesta (kairausluokka). Mikäli halutaan hyvin tarkka määrittäminen, tulokset on kalibroitava siipikairastulosten ja mielellään myös suorien leikkauskokeiden tulosten perusteella. Kaavat (10) ja (11) vastaavat lyhytkaista leikkauslujuutta. Maapohjan virumisen vaikutus leikkauslujuuteen tulee tarvittaessa huomioida erikseen, kuten siipikairallakin leikkauslujuutta määritettäessä tulee menetellä.

Edellä esitetyt arvot johtavat useimmiten "varmalla puolella olevaan" ratkaisuun. Korjaamattomaan kärkivastukseen perustuvien suljetun leikkauslujuuden määrittämenetelmien, esimerkkinä kaava (12), antamat tulokset voivat kokemuksen mukaan poiketa toisistaan huomattavasti.

$$s_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_c} \quad (12)$$

Kertoimelle N_c taulukossa 3 esitetyt arvot ovat kokemukspäisiä. Näitä arvoja sovellettaessa on muistettava, että niiden suuruuteen vaikuttavat sekä itse kairauksen suoritustapa että myös maan ominaisuudet.

Taulukko 3. Kantavuuskertoimen N_c arvoja savessa /2/

Maalaji	N_c
"hauras", hyvin sensitiivinen savi	5...6
normaalisti sensitiivinen savi	7...8
vähän sensitiivinen, plastinen savi	8...10

6.4.3 Tehokkaat lujuusparametrit savessa

Senneset & Janbu /3/ ovat esittäneet kantavuuskaavaan perustuvan tehokkaiden lujuusparametrien määrittämismenetelmän CPTU-kairauksen perusteella, kaava (13)

$$q_T - \sigma_{vo} = (N_q - 1)(\sigma'_{vo} + a) - N_u \Delta u \quad (13)$$

a = attraktio

N_q = kantavuuskerroin, $N_q = \tan^2(45 + \phi/2)e^{(\pi-2\beta)\tan\phi}$,

ϕ = kitkakulma

β = plastisoitumiskulma

Δu = huokosvedenpaineen lisäys välittömästi kärjen yläpuolella

N_u = kantavuuskerroin, $N_u = 6 \tan \phi (1 - \tan \phi)$

Kaava (13) voidaan muuntaa muotoon (14)

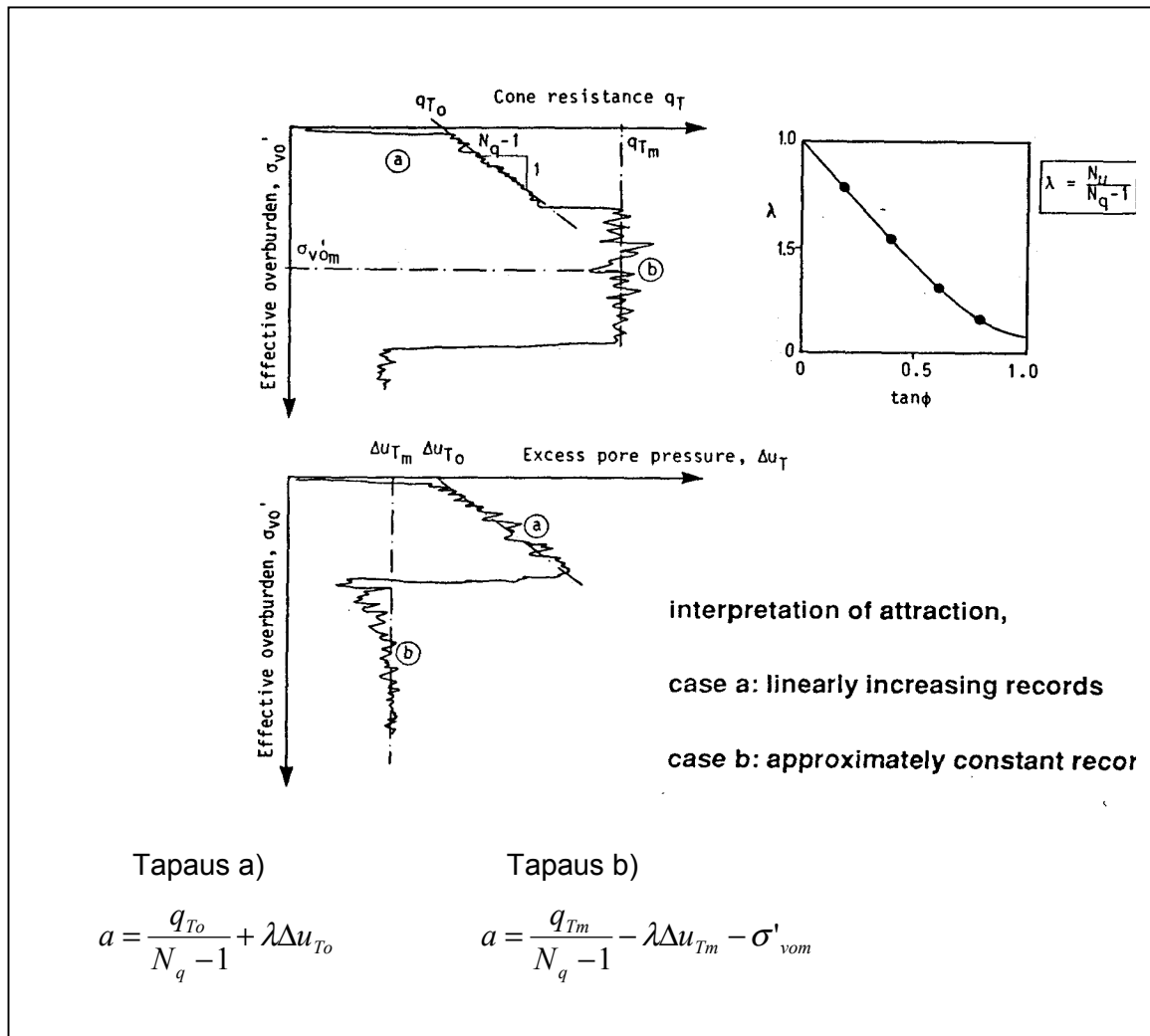
$$q_T - \sigma_{vo} = N_m (\sigma'_{vo} + a) \quad (14)$$

Kaavoissa (13 ja 14) esiintyvä attraktion a arvo voidaan puristinkairauksen tuloksista määrittää q_T :n ja σ_{vo} :n vuorosuhteen avulla (kuva 13), mikä kuitenkin edellyttää aluksi arvausta kitkakulman arvolla ja tuloksen hakemista iteroimalla.

Plastisoitumiskulman valinnalla on erittäin suuri merkitys saatavan kitkakulman suuruuteen, mikä käy ilmi esim. kuvasta 14 /4/. Suositeltavat β :n arvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Plastisoitumiskulman arvot eri maalajeissa /4/

Maalaji	Suosittelava β :n arvo
Tiivis hiekka, ylikonsolidoitunut siltti, hyvin plastinen savi, kova ylikonsolidoitunut savi	- 20° - -10°
Keskitiivis hiekka ja siltti, sensitiivinen savi, runsaasti kokoonpuristuva savi	- 5° - + 5°
Pehmeä siltti, savinen siltti	+ 10° - + 20°



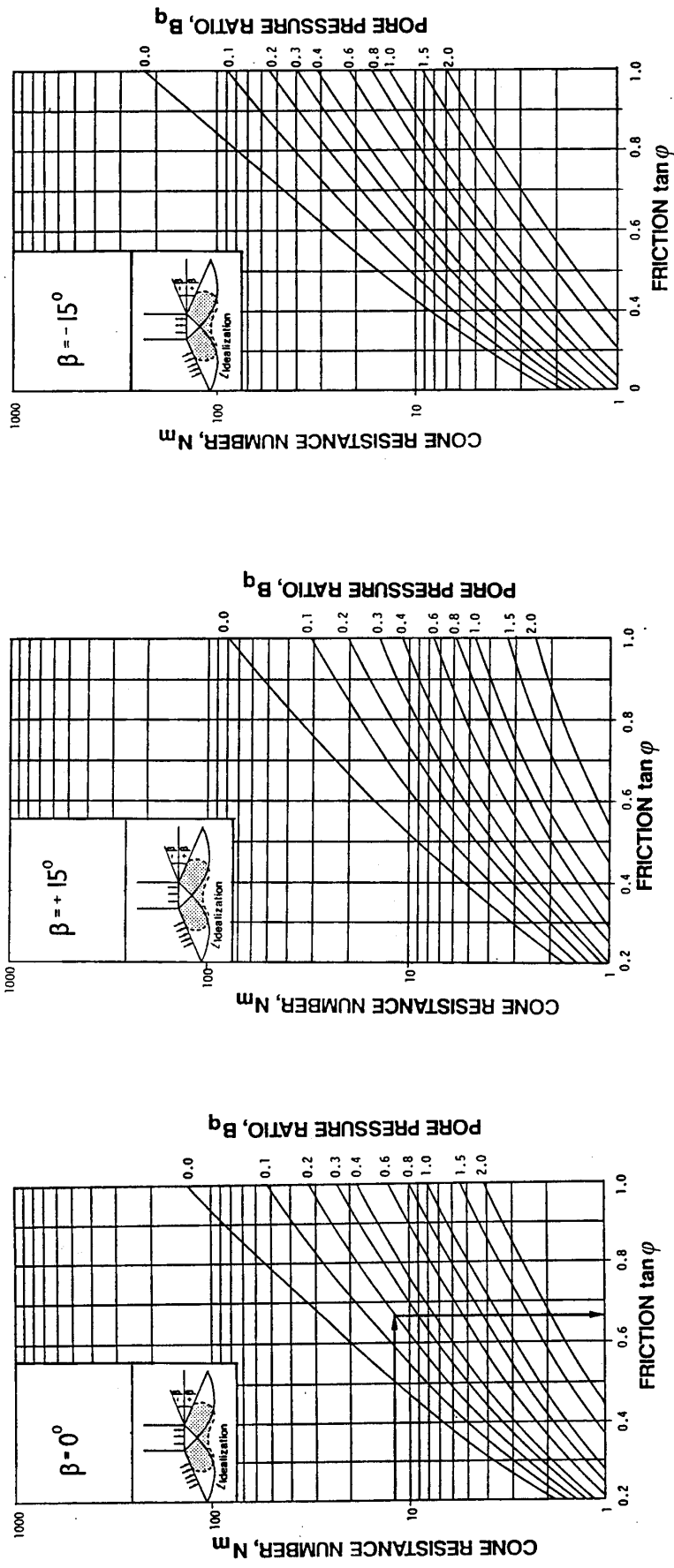
Kuva 13. In situ attraktio -arvon määrittäminen CPTU-kairauksesta /3/

Kuvan 14 avulla voidaan määrittää maan saven tehokas kitkakulma, kun huokospainesuhde B_q määritetään kaavalla (15), N_m määritetään kaavalla (16) ja β :n arvo valitaan esim. taulukosta 4.

$$B_q = \Delta u / (q_T - \sigma_{vo}) \quad (15)$$

$$N_m = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}' + a} \quad (16)$$

Jos attraktiota ei voida määrittää kairauksista eikä sen suuruutta ole määritetty myöskään laboratoriokokein (kolmiakselikokeet), sen arvo voidaan maalajiin perustuen likimääräistarkasteluja varten valita taulukosta 5 /6/.



Kuva 14. Kitkakulman määrittäminen CPTU-kairauksen tulosten perusteella /6/

Taulukko 5. Tyypillisiä attraktion a ja kitkakulman ϕ' arvoja /5/

Maalaji	Leikkauslujuusparametrit				
	a kPa	$\tan \phi'$	ϕ'	N_m	B_q
Pehmeä savi	5-10	0.35-0.45	19-24	1-3	0.8-1.0
Keskiluja savi	10-20	0.40-0.55	19-29	3-5	0.6-0.8
Luja savi	20-50	0.50-0.60	27-31	5-8	0.3-0.6
Pehmeä siltti	0-5	0.50-0.60	27-31	5-30	0-0.4
Keskiluja siltti	5-15	0.55-0.65	29-33	5-30	0-0.4
Luja siltti	15-30	0.60-0.70	31-35	5-30	0-0.4
Löyhä hiekka	0	0.55-0.65	29-33	30-100	< 0.1
Keskitiivis hiekka	0-20	0.60-0.75	31-37	30-100	< 0.1
Tiivis hiekka	20-50	0.70-0.90	35-42	30-100	< 0.1
Ylik. & sement.maat	> 50	0.8-1	38-45	100	< 0

6.5 Konsolidaatiotila ja konsolidaatiojännitys

Konsolidaatiotila (OCR) voidaan määrittää kaavalla (17) /1/.

$$\log OCR = 0.32 \frac{q_T - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo} (1.13 + 5.76 w_L)} - 0.22 \quad (17)$$

Vuorosuhde on hyvin herkkä maalajin juoksurajan arvolle, mutta sitä voidaan kuitenkin käyttää kaikissa koheesiomaalajeissa ja riippumatta konsolidaatiotilan arvosta. Runsaasti halkeilleessa kuivakuorisavessa kaava antaa kuitenkin selvästi todellista pienempiä konsolidaatiotilan arvoja.

Jos huokospaineenmittaus (CPTU-kairaus) on suoritettu, konsolidaatiotila voidaan määrittää kaavalla (18) /1/.

$$\log OCR = 0.167 \frac{q_T - u}{\sigma'_{vo} (5.0 w_L - 0.6)} - 0.05 \quad (18)$$

Tällä vuorosuhteella on samat edut ja rajoitukset kuin kaavan (17) vuorosuhteellakin. Normaalistikonsolidoituneessa ja lievästi ylikonsolidoituneessa savessa ja silttisessä savessa kaavan (18) tulosten hajonta on kuitenkin suurempi kuin kaavan (17) hajonta.

Konsolidaatiojännitys σ'_c voidaan yleisesti määrittää kaavalla (19) /28/.

$$\sigma'_c = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{3.43} \quad (19)$$

Normaalistikonsolidoituneessa ja lievästi ylikonsolidoituneessa savessa ($OCR < 2$) konsolidaatiojännityksen ja juoksurajan välillä on kaavan (20) mukainen vuorosuhde

$$\left| \frac{q_T - \sigma_{vo}}{\sigma'_c} \right|_{NC} = 1.21 + 4.4 w_L \quad (20)$$

Likimäärin konsolidaatiojännitys yleensä savissa voidaan määrittää kaavalla (21), mikä edellyttää kuitenkin iterointia /1/. Tämä vuorosuhde on kuitenkin herkkä maan plastisuudelle ja konsolidaatiotilan vaihtelulle.

$$\sigma'_c = \left[\frac{q_T - \sigma_{vo}}{1.21 + 4.4w_L} \right] / (1.07 - 0.54 \log OCR) \quad (21)$$

6.6 Kerrosten vedenläpäisevyyden mittaus painumalaskentaa varten

6.6.1 Mittaus ja mittaustulosten esikäsittely

Huokospaineen purkautumisen mittaus on yksi CPTU -kairauksen mukanaan tuoma apu, kun tutkitaan maakerroksen vedenläpäisevyyssominaisuuksia ja määritetään maalajeja painumalaskentaa varten. Pysäytys kairauksen aikana voidaan nykyään tehdä kaikilla puristin-kairauslaitteistoilla. Ns. akustisessa kärjessä tiedonsiirrossa syntyvä kärjen värähtely kuitenkin häiritsee mittauksia siinä määrin, ettei näitä kärkiä suositella käytettäväksi vedenläpäisevyyden määrittämiseen.

Huokospaineen purkautumiskokeen (dissipation test) onnistumisen edellytys on kuitenkin se, että koko koe tehdään erityisen huolellisesti. Varsinkin huokospaineanturin ja kärjen suodatimien ja nesteiden ilmanpoisto on tehtävä huolellisesti. Pysäytyskoe tehdään standardikärjellä, jossa huokoskivi ja huokospaineanturien tiehyet on täytetty ilmattomalla vedellä.

Pysäytyksen kestoajan tulee olla riittävän pitkä. Riittäväksi voidaan katsoa pysäytysaika, jonka aikana 50% kairauksen synnyttämästä huokosylipaineesta purkautuu. Purkautumiskokeen tekeminen saattaakin olla varsin paljon aikaa vievää, koska luotettavan purkautumiskäyrän saaminen kestää joskus useita tunteja. Tuloksen tulkinnassa tarvitaan lisäksi luotettava tieto pysäytystasolla vallitsevan, staattisen vedenpaineen arvosta.

Purkautumiskoe tehdään siten, että CPTU –kärki (kairan painaminen) pysäytetään tutkittavassa maakerroksessa. Yleensä pysäytystasot määritetään aikaisemmin tehtyjen puristinkairauksen perusteella. Käytettäessä monitoimikairaa kairauksen tekemisessä, tulee staattinen ja dynaaminen kuormitus kairatangoston päältä pysäytyksen jälkeen välittömästi poistaa ja kairatangoston liike suhteessa maahan pysäyttää. Tämä tehdään irrottamalla monitoimikairan painamislaitteisto kairatangoston yläpäästä. Ellei tämä ole mahdollista, puristavan voiman aikaansaava tunkisto lukitaan suhteessa kairan keiliin. Mikäli kairatangosto irrotetaan keilistä, kairatangosto tuetaan maan pinnalle esimerkiksi lukkopihtejä ja sopivia tukia käyttäen siten, että tangoston painosta johtuva kärjen edelleenpainuminen estetään. Monitoimikairan moottori sekä mahdolliset muut tärinää kairatangostoon aiheuttavat laitteet pysäytetään mittauksen ajaksi. Tangostoa ei saa myöskään nostaa pysäyttämisen yhteydessä.

Konsolidaatiokertoimen tulkinta purkautumiskokeen tulosten perusteella tehdään laskennallisesti joko "cavity expansion"- teoriaan tai "strain path" –menetelmään perustuen. Suositellavimmat menetelmät ovat nk. Torstenssonin malli, NTH malli, MIT malli sekä Oxford- malli (luku 6.6.2). Yleensä eri menetelmät antavat jossakin määrin toisistaan poikkeavia tuloksia. Suositeltavaa onkin, että konsolidaatiokerroin määritetään vähintään kahdella eri menetelmällä. Teoreettiset menetelmät antavat lähes systemaattisesti suurempia konsolidaatiokertoimen arvoja kuin laboratorioissa portaittaisella ödometrikokeella saadut arvot. Yleinen näkemys /20/ on se, että maakerrokselle laboratorioissa määritelty konsolidaatiokerroin on 10...20% siitä, mitä se on kenttähavaintoihin verrattuna.

CPTU -pysäytysmenettelyssä mitataan kairauksen aiheuttaman huokosylipaineen purkautuminen havaintoajan funktiona. Konsolidaatiokerroin lasketaan tietokoneohjelmalla kaikilla em. neljällä mallilla. Ohjelma tarvitsee tällöin lähtötietonaan purkautumiskäyrälle tehdyn so-

vitusfunktion parametrit sekä kysyy suljetun tilan kimmomoduulia tai, ellei sitä tiedetä, suljetua leikkauslujuutta. Näitä tarvitaan "strain path"-menetelmään pohjautuvissa MIT- ja Oxford-malleissa.

Sovitusfunktio on muotoa (22).

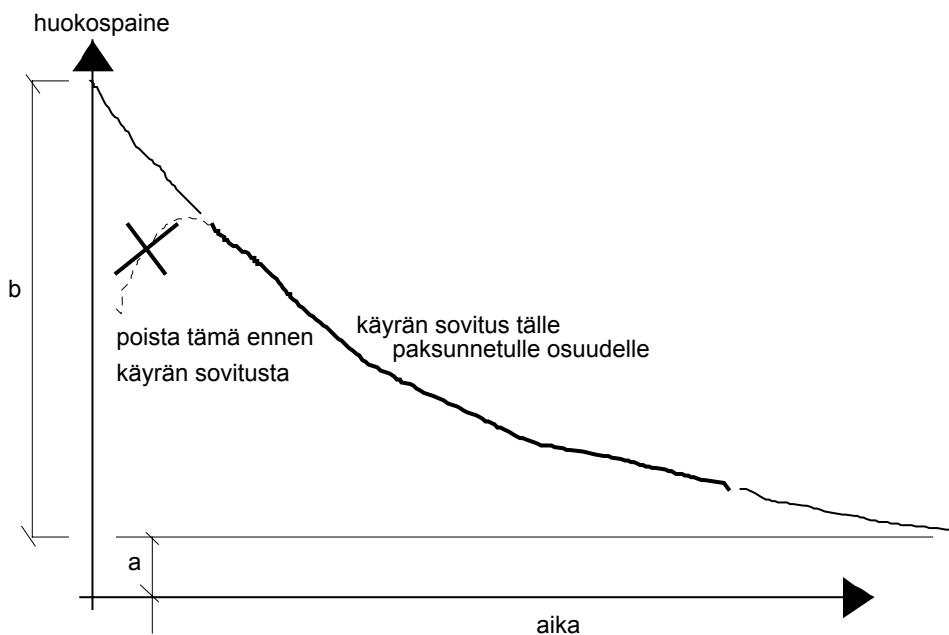
$$u = a + b \cdot (c + 1)^{d \cdot t} \quad (22)$$

missä

u = on mitattu huokospaine [kPa] ajanhetkellä t [s]

a , b , c ja d = ovat käyrän sovitusparametreja

Kaavassa (22) a ja b vastaavat kuvassa 15 esitettyjä huokospainearvoja. Vastaavasti c ja d ovat laskennallisia, käyrän muotoa kuvaavia parametreja. Parametrit ovat laskettavissa mm. erilaisilla käyränsovitusohjelmilla. Käyrän sovitusta varten on mittaustiedostosta ensin poistettava mahdollinen nouseva osuus, ks. kuva 15. Nouseva osuus purkautumisen alkuvaiheessa ei sinällään ole merkki mittauksen käyttökelvottomuudesta, jos purkautuminen käynnistyy viimeistään 2...5 minuutin kuluttua kairan pysäytyksestä. Nousun syynä lienee saven ylikonsolidaatio sekä kärjen maahan aikaansaaman raepaineen relaksaatio, mutta mahdollisesti myös kairan huokosvesitieheisiin jäänyt ilma.



Kuva 15. Parametrien a ja b merkitys. Paksunnettu osuus kuvaa tulkintaan valittua mittaustulososuutta.

Sovitusfunktion (22) muoto on valittu siten, että parametri a vastaa maapohjassa pitkän ajan kuluttua vallitsevaa, staattista huokosvedenpaineen vakioarvoa. Mikäli näin ei ole, laskettuihin konsolidaatiokertoimen arvioihin tulee suhtautua varauksella.

6.6.2 Tulkintamallit

Sandvenin /2/ mukaan seuraavat mallit soveltuvat käytettäväksi, kun huokosvedenpaine mitataan CPTU-kairan kärkikartion yläpuolelta.

a) Laajenemisteoriaan (*cavity expansion theory*) pohjautuvat mallit

Torstenssonin malli /7/

Malli pohjautuu elastoplastiseen laajenemisteoriaan. Sovellukset on laadittu sekä sylinterin- että pallonmuotoisen tilan laajenemiselle. Konsolidaation otaksutaan olevan yksiulotteinen ja jännityksistä riippumaton.

NTH malli /13/, /5/.

Malli pohjautuu sylinteritilan laajenemiseen. Aikatekijän asemesta mallin avulla tulkitaan huokospaineen alenemisnopeutta. Konsolidaation oletetaan olevan yksiulotteinen ja jännityksistä riippumaton.

b) Siirtymäpolkumenetelmään (*strain path method*) pohjautuvat mallit

MIT malli /14/.

Huokospaineen käyttäytyminen ennustetaan siirtymäpolkumenetelmällä. Konsolidaatio on jännityksiin kiinnitetty (coupled) tai kiinnittämätön (un-coupled), lineaarinen tai epälineaarinen. Malli on kehitetty Boston Blue Clay- savelle, jonka jäykkyysindeksin I_r on todettu olevan 500.

Oxford malli /8/

Mallissa lasketaan jäykkyysindeksin I_r avulla modifioitu aikatekijän T^* . Konsolidaatio otaksutaan olevan kaksidimensiainen, jännityksistä riippumaton.

Mallien tärkeimmät ominaisuudet on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Yhteenveto konsolidaationopeuden tulkintamallien perusteista /4/

Malli	Laajenemis-/virtausmalli	Materiaalimalli	Sisäinen huokospaine	Konsolidaatio
Torstensson	Sylinteri	Elastoplastinen	$\Delta u = s_u \bullet \left(\ln I_r - 2 \ln \frac{r}{r_o} \right)$	Lineaarinen, kiinnitetty, finiittidifferenssilaskentamenetelmä, yksiulotteinen
NTH	Sylinteri	Elastoplastinen	Kuten Torstensson malli	Lineaarinen, kiinnittämätön, finiittidifferenssilaskentamenetelmä, yksiulotteinen aikatekijän sijasta alenemisnopeus
MIT	Yhdistetty radiaalinen ja vertikaalinen virtaus	Boston Blue Clay $I_r = 500$	Siirtymäpolkumenetelmään perustuvat FEM-laskelmiin	Kiinnitetty tai kiinnittämätön, lineaarinen, kaksikulotteinen FEM-analyysi
Oxford	Yhdistetty radiaalinen ja vertikaalinen virtaus	Elastoplastinen epälineaarinen I_r vaihtelee	Siirtymäpolkumenetelmään perustuvat FEM-laskelmiin $\Delta u = \Delta \sigma_{oct} + \alpha \Delta \tau_{oct}$	Kiinnittämätön, finiittidifferenssilaskenta, kaksikulotteinen

6.6.2.1 Torstenssonin malli

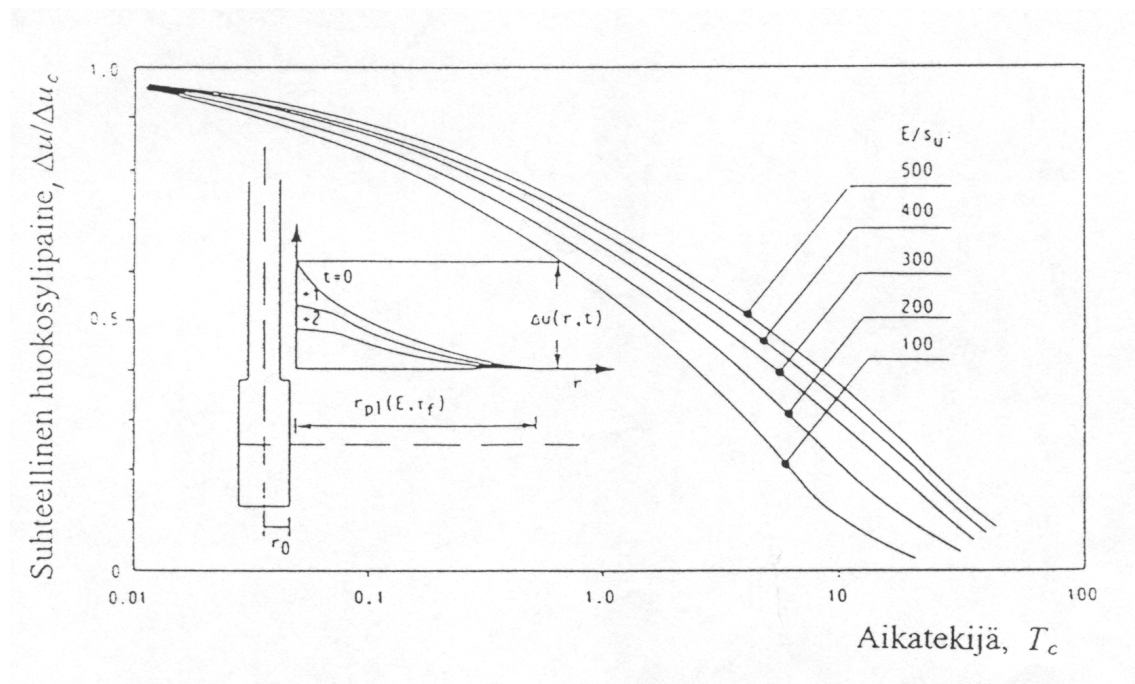
Torstensson /15,7/ on kehittänyt perusteellisen, laajenemisteorioihin pohjautuvan tulkinta-menetelmän ja laatinut mallin sekä pallon- että sylinterinmuotoisen tilan laajenemiselle. Tässä menetelmäkuvauksessa käsitellään vain sylinterinmuotoisen tilan laajenemismallia, koska se sopii paremmin käytettäväksi silloin, kun huokospaineen mittaushuokko on tämän menetelmäkuvauksen suosituksen mukainen. Torstensson esittää konsolidaatiokertoimen sylinterimäisen tilan laajenemiselle kaavan (23).

$$c_r = \frac{T_{c_{50}}}{t_{50}} \cdot r_0^2 \quad (23)$$

missä

- $T_{c_{50}}$ = aikatekijä (-) huokospaineen alentuessa 50 %
 t_{50} = tasaantumisaika (s) huokospaineen alentuessa 50 %
 r_0 = kairan sylinteriosan säde (m)

Kuvassa 16 on esitetty aikatekijän T_c riippuvuus suhteellisesta huokosylipaineesta $\Delta u / \Delta u_c$ sekä suljetun tilan muodonmuutosmoduulin E_u ja suljetun leikkauslujuuden s_u suhteesta. Suhde E_u / s_u on jäykkyysluku. Jäykkyysluku arvioidaan maatyypin mukaan kairaustulosten avulla tutkituista E_d ja s_u -arvoista. Jäykkyysluvun arviointi avointa tilaa varten tulkittu muodonmuutosmoduulin perusteella ei aiheuta kovin suurta virhettä tulkittavaan konsolidaatiokertoimeen. Aikatekijä on kehitetty lähinnä 50 % alentumaa vastaavalle konsolidaatioker-toimelle.



Kuva 16. Aikatekijä Torstenssonin mallin mukaan, sylinterisovellus, säteittäisvirtaus /4/.

6.6.2.2 NTH malli

NTH malli pohjautuu seuraaviin teoreettisiin lähtökohtiin:

1. Sisäisen huokospaineen jakautuma on estimoitu sylinterimäisen tilan laajenemisteorian avulla.
2. Maa on isotrooppinen ja homogeeninen ja siinä on isotrooppinen alkujännitys jakauma.
3. Elastoplastinen materiaalmalli.
4. Lineaarinen, yksidimensiainen, jännityksiin kiinnittämätön konsolidaatioanalyysi.
5. Tulkinta tehdään säteittäiselle, vaakasuuntaiselle konsolidaatiokertoimelle.

Mallissa huokosylipaineen, $\Delta u = f(r, t)$, aikaderivaatan kaavaksi on saatu (24)

$$[\Delta u] = \left[\frac{\partial \Delta u}{\partial t} \right] \cdot \Delta u_T \cdot \left[\frac{\delta \mu}{\delta T} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} \right] = \Delta u_T \cdot \frac{c_r}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\delta \mu}{\delta T} \right] \quad (24)$$

Säteen arvolle, $r = r_o$, sylinterin pinnalla, saadaan kaava (25):

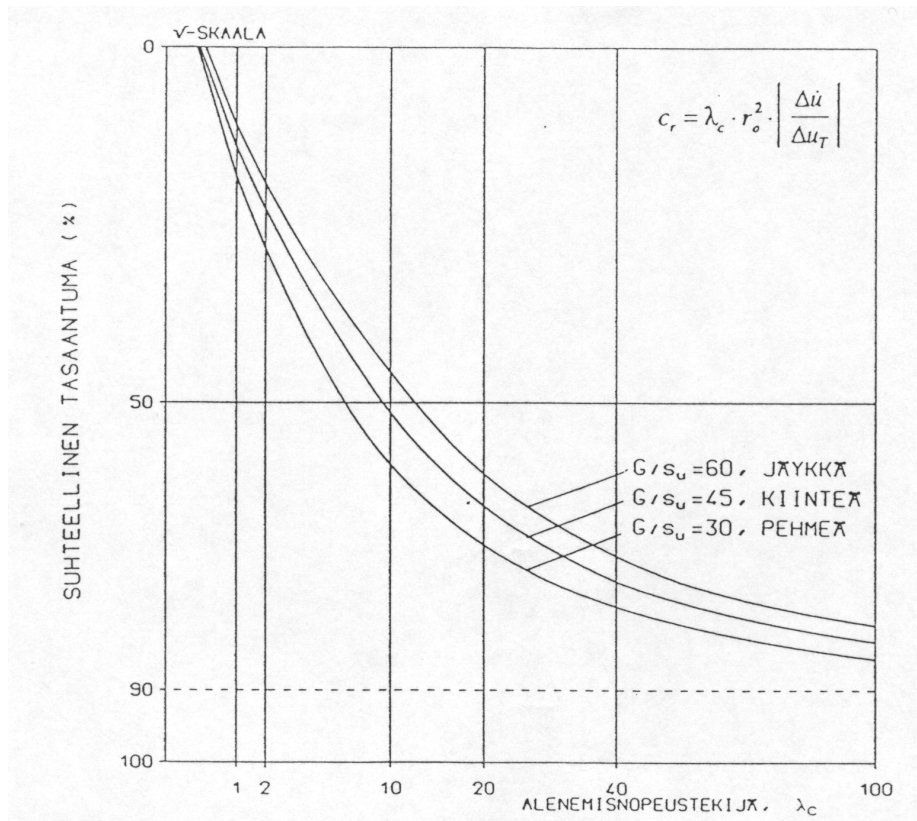
$$c_r = \lambda_c \cdot r_o^2 \cdot \left| \frac{\Delta \dot{u}}{\Delta u_T} \right| \quad (25)$$

$$\lambda_c = [\partial T / \partial u]$$

Kaavoissa (24) ja (25)

- λ_c = alenemisnopeustekijä (-)
 Δu_T = huokospaine (kPa) kun $t = 0$, $r = r_o$
 Δu = huokospaineen palautumisnopeus hetkellä t (kPa/s)
 (hetkellä t : $\Delta u_t = (\Delta u_{t+1} - \Delta u_{t-1}) / \Delta t$)

Alenemisnopeustekijä λ_c , esitetään kuvassa 17 jäykkyysindeksin $I_r = G/s_u$ avulla huokospaineen suhteellisen palautuman funktiona. Jäykkyysindeksiksi voidaan valita pehmeässä maassa $I_r = 30$, keskijäykässä (semirigid) maassa $I_r = 45$ ja jäykässä maassa $I_r = 60$. Plastisoituneeksi oletetaan alue, jonka säde on $5.8 \times r_o$. Konsolidaatiokerroin on kehitetty 50 %:n huokospaineen purkautumaan perustuen, purkautumisen aste saa olla myös tätä suurempi tai jopa pienempi.



Kuva 17. Alenemisnopeustekijä λ_c NTH mallin mukaan huokospaineen suhteellisen tasaantumun ja jäykkyyksindeksin $I_r = G/s_u$ funktiona [4].

6.6.2.3 MIT malli

MIT malli on esitetty julkaisuissa Baligh ja Levadoux [16], Baligh [9] sekä Levadoux ja Baligh [14]. Yksinkertaisimmassa versiossa malli perustuu Boston Blue Clay-savella tehtyihin konsolidaatioanalyyseihin, jotka on tehty lineaarista, jännityksiin kiinnittämätöntä konsolidaatioanalyyysiä käyttäen. Sisäisen huokospaineen jakautuminen on ennakoitu siirtymäpolkumenetelmällä. MIT-mallissa huokospaineen jakautuminen konsolidaatioanalyyysiä varten on johdettu siirtymäpolkumenetelmällä seuraavasti:

- Maan virtausnopeudet ja jännitysarvot on ennustettu potentiaalteoriolla.
- Kartion geometria on simuloitu yritys- erehdys- kombinaatiolla.
- Jännitystasa-arvokäyrät jännityspolkujen määrittämiseksi maaelementeissä on integroitu kartion ohittavia virtausviivoja pitkin.
- Deviatoriset ja leikkausten aiheuttamat huokospaineet on saatu normaalisti konsolidoituneen, uudelleen sedimentoituneen Boston Blue Clay- maamallin kokonaisjännityksistä.
- Huokosylipainejakautuma on määritetty etsimällä tasapainotila radiaalisuunnassa.

Radiaalinen konsolidaatiokerroin riippuu aikatekijästä, ekvivalenttisäteestä ja havaintoajasta kullakin palautumatasolla kaavan (26) mukaisesti

$$c_r = \frac{r_0^2}{t} \cdot T \quad (26)$$

missä

- T = aikatekijä (-)
- t = suhteellista palautumaa vastaava aika (s)
- r_0 = ekvivalentti kärjen säde (m)

Sovellus käy savelle, jonka $I_r = 500$ ja $1 < OCR < 3$

Standardikärjelle, jossa suodattimen sijoitus on tämän menetelmäkuvauksen suosituksen mukainen, määritelty aikatekijä on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. 60° kärkikulman ja suodattimen sijoituksen mukaisille välineille määritetyn aikatekijän arvoja huokospaineen tasaantumasta riippuen MIT-mallissa /14/.

Suhteellinen tasaantuma	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Aikatekijä	7,3	22,0	33,0	47,0	114,0

6.6.2.4 Oxford malli

Oxford malli, kuten MIT mallikin, pohjautuu kokonaisjännitysten selvittämisessä siirtymäpolkumenetelmään. Kokonaisjännitysjakautuma kärjen ympäristössä on estimoitu huokospaineista riippuvalla puolikokeellisella kaavalla (27).

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} + \alpha \cdot \Delta \tau_{oct} \quad (27)$$

jossa

α = huokospaineparametri (-)

Näitä huokospaineita käytetään konsolidaatioanalyysissä sisäisenä jakaantumana. Konsolidaatio analysoidaan käyttämällä jännityksistä riippumatonta, lineaarista Terzaghi-Redulic-teoriaa ja soveltamalla ADI-finiittidifferenssimenetelmää.

Oxford mallissa konsolidaatiokerroin johdetaan modifioidulla kaavalla (28):

$$c_r = \frac{T^*}{t} \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{I_r} \quad (28)$$

jossa

T^* = modifioitu aikatekijä (-)

I_r = jäykkyysindeksi = G/s_u

Modifiointi johtuu siitä, että kairauksen vaikutus ulottuu jäykkyysindeksistä riippuvalle alueelle $R = f(\sqrt{I_r})$. Tällöin aikatekijään saadaan plastisoituneen alueen avulla portaaton riippuvuus. Jäykkyysindeksin arvoksi annetaan hiekalla 70 – 150, savella 10 – 300 ja löyhällä siltillä 10 – 30 /17/. Modifioitu aikatekijä suhteellisen tasaantumana perusteella on esitetty taulukossa 8. Arvot on annettu vain tämän menetelmäkuvauksen suosituksen mukaista suodattimen sijaintia koskevana.

Taulukko 8. Modifioitu aikatekijä T^ Oxford mallin mukaan /8/.*

Suhteellinen tasaantuma	Aikatekijä
20 %	0,038
30 %	0,078
40 %	0,142
50 %	0,245
60 %	0,439
70 %	0,804
80 %	1,60

6.7 Pohjamaan jäykkyys

Moduulien ja muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseen CPTU -kairaustuloksista tulee suhtautua yleensä suurin varauksin /2/. Maahan tunkeutuvan CPTU -kairan kärki aiheuttaa ympäröivään maahan suuria muodonmuutoksia. Jännitys- ja huokospainejakautuma kärjen ympärillä on lisäksi monimutkainen ja vaikeasti ennustettava. Maanvaraisissa rakenteissa muodonmuutos- ja jännitystasot ovat sitävastoin yleensä pieniä ja tehokkaisten jännitysten muutokset tunnetaan suhteellisen hyvin.

CPTU- kärjellä ei maan muodonmuutosominaisuuksia voida mitata suoraan. Ainoa maan kokoonpuristuvuusominaisuuksiin korreloiva mitattava suure on (netto-)kärkivastus. Kärkivastus mitataan suurten siirtymien alueella, jolloin maa on jatkuvassa murtotilassa. Tästä syystä ei ole olemassa mitään kunnolla perusteltua teoriaa tai ratkaisua, jotka yhdistäisivät toisiinsa kärkivastuksen ja maan muodonmuutosmoduulit edes maan yksiulotteista painu- malaskentaa varten.

Maa vaikuttaa kärkivastuksen arvoon kärjen kohdalla, plastisoituneen murtovyöhykkeen ulkopuolella, sille ominaisten jäykkyys- ja muodonmuutosominaisuuksien mukaisesti. Nämä ominaisuudet riippuvat vallitsevasta jännitys- ja muodonmuutostilasta. Täten muodonmuutosominaisuuksien ja kärkivastuksen välillä tulisi vallita (ainakin rajoitetusti) fysikaalinen riippuvaisuus /2/.

Edellä esitetyistä syistä ja tiedossa olevista epävarmuuksista huolimatta erilaisten moduulien määrittystä varten on kehitetty useita kokemusperäisiä yhteyksiä. Kaikkia seuraavassa esitettyjä vuorosuhteita käytettäessä on huomattava, että niiden kertoimet ovat kokemusperäisiä, josta syystä kaavojen käyttö niiden taustalla olevista olosuhteista (maakerrosten laatu, syntygeologia, yms.) poikkeavissa olosuhteissa saattaa antaa hyvin likimääräisiä moduulin arvoja. Myös vuorosuhteiden laadinnassa käytetty kairausmenetelmä (ennenkaikkea kärjen malli ja muoto) vaikuttaa vuorosuhteen kertoimiin. Kertoimet tulisi aina määrittää (kalibroida) aluekohtaisesti / paikallisesti. Seuraavassa esitettyjen vuorosuhteiden avulla voidaan kuitenkin arvioida moduulien suuruusluokkaa.

6.7.1 Saven ja siltin kokoonpuristuvuusmoduuli M

Kokoonpuristuvuusmoduulille (ödometrimoduuli) (M) on esitetty kaava (29), esim. Mitchell & Gardner /12/. Kaava on tarkoitettu hienorakeisille maalajeille yleisesti ja se perustuu puristin- kairan korjaamattomaan kärkivastukseen. Kaavalla saatu moduuli on hyvin likimääräinen suuruusluokka-arvo.

$$M = \alpha * q_c \quad (29)$$

Kerroin α saadaan taulukosta 9 /18/, joka on alkuaan Sanglerat'in / 25/ esittämä Ranskassa tehtyjen kokeiden (CPT- Delft Mantle Cone) perusteella. Kerroin α tulisi aina määrittää paikallisesti.

Taulukko 9. Kertoimen α (kaava 29) riippuvuus CPT-kärkivastuksesta hienorakeisissa maalajeissa /18/.

Kärkivastus, kPa	Kerroin α	Huomattava	Maalaji
$q_c < 700$	$3 < \alpha < 8$		vähän plastinen savi
$700 < q_c < 2000$	$2 < \alpha < 5$		
$q_c > 2000$	$1 < \alpha < 2.5$		
$q_c < 2000$	$1 < \alpha < 3$		vähän plastinen siltti
$q_c > 2000$	$3 < \alpha < 6$		
$q_c < 2000$	$2 < \alpha < 6$		hyvin plastinen savi ja siltti
$q_c > 2000$	$1 < \alpha < 2$		
$q_c < 1200$	$2 < \alpha < 8$		orgaaninen siltti (ljSi)
$q_c < 700$	$1.5 < \alpha < 4$ $1 < \alpha < 1.5$ $\alpha < 0.4$	$50\% < w < 100\%$ $100\% < w < 200\%$ $w > 300\%$	turve ja orgaaniset savet (ljSa)

Saven kokoonpuristuvuusmoduuli (M) voidaan määrittää kaavan (30) mukaan, esim /26/.

$$M = m \cdot q_n \quad (30)$$

missä

m = empiirinen moduuliluku
q = kärkivastus

Janbu /26/ on esittänyt, että savissa

ylikonsolidoituneella alueella $m = 10 \pm 3$ (10 ± 5 /2/) (jolloin q = nettokärkivastus)

ylikonsolidoituneella alueella $m = 5 \dots 15 \pm 5$ (jolloin q = tehokas kärkivastus)

normaalistikonsolidoituneella alueella $m = 4 \pm 1$ (3 ± 2 /2/) (jolloin q = nettokärkivastus)

Vastaavasti siltissä kokoonpuristuvuusmoduuli (M) voidaan määrittää kaavalla (31) /26/

$$M = m (q_n \cdot p_a)^{1/2} \quad (31)$$

missä

m = 40 ± 10
p_a = 100 kPa
q_n = nettokärkivastus

Sandven /2/ on esittänyt kaavan (31) parametrille m ylikonsolidoituneissa savissa taulukossa 10 annettuja konsolidoitumistilasta riippuvia arvoja.

Taulukko 10. Kaavan (30) parametrin m arvot /2/.

m	B _q	$\sigma_{c'}/\sigma_{vo'}$	q _n
2...15	< 0,2	> 4	1000...2000
8...12	0,2...0,6	2...4	800...1000
5...8	0,6...0,9	< 2	500...800

6.7.2 Muodonmuutosmoduuli E

Bergdahl & al /19/ on esittänyt, että karkeille maalajeille, esim. hiekalle, muodonmuutosmoduuli E (drained, long time modulus) voidaan määrittää taulukon 11 avulla / myös 18/

Taulukko 11. Muodonmuutosmoduulin E interpolointi q_c :n funktiona (kvartsi- ja maasälpähiekka).

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

Sandven /2/ on esittänyt kimmomoduulille E on empiirisen kaavan (32)

$$E = \alpha_1 * q_c \quad (32)$$

jossa

- α_1 = empiirinen kerroin, joka saadaan taulukosta 12 /12/.
 q_c = mitattu kärkivastus

Taulukko 12. Muodonmuutosmoduulin kaavan (32) α_1 –kerroin eri maalajeissa

Maalaji	Kerroin α_1
Savi, vähän plastinen	3-8
Savi, plastinen	2-6
Siltti, vähän plastinen	1-6
Siltti, plastinen	2-6
Hiekat	3-8

Kvartsi- ja määsälphiekalle on esitetty taulukon 13 mukainen kimmomoduulin ja kairausvastuksen välinen riippuvuus /19/

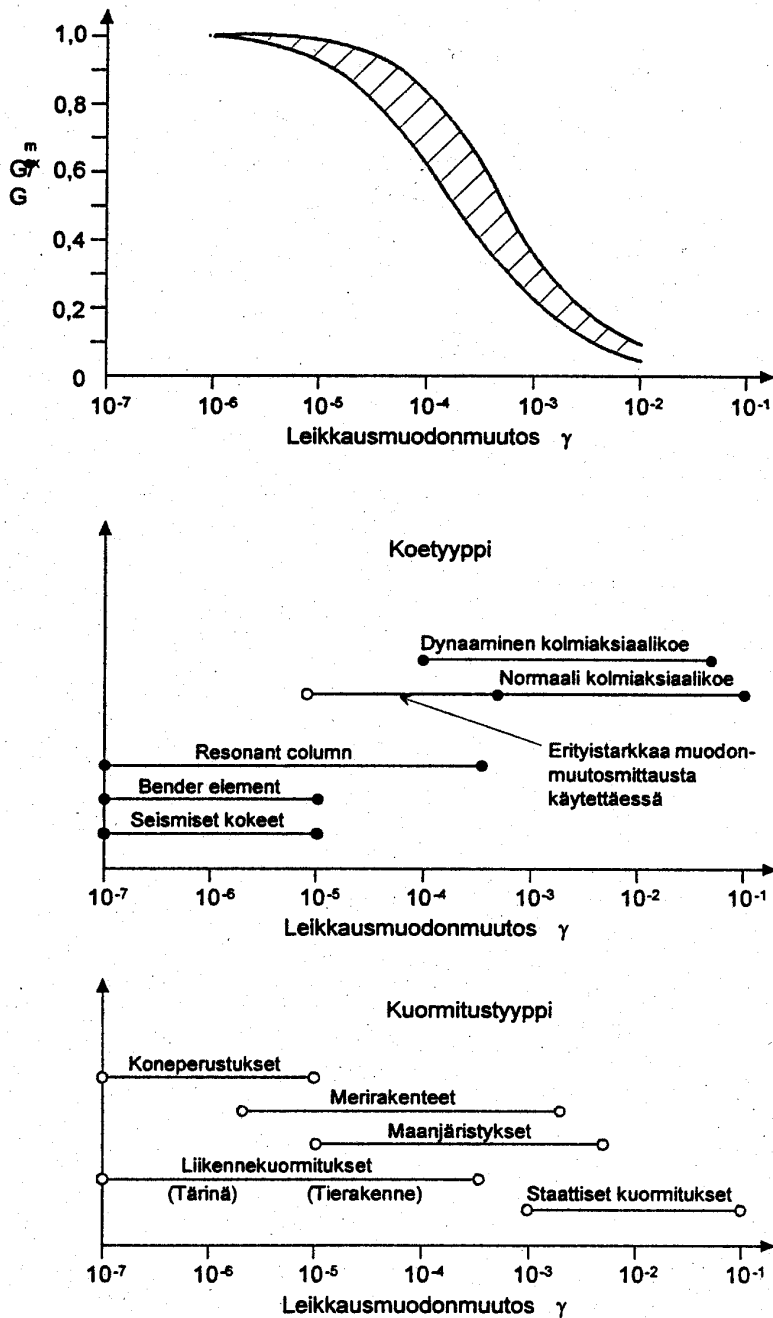
Taulukko 13. Kimmomoduulin E ja CPT:n kärkivastuksen riippuvuus hiekassa.

Kärkivastus CPT q_c (MPa)	Tiiviysluokka	Kimmomoduuli 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°			

Eri tyyppisten sovitusfunktioiden sijoittuminen VT 6:lla cross-hole -mittauksilla ja puristinkairauksilla saatuun havaintoaineistoon on esitetty TPPT tutkimusraportissa 44 "Pohjamaan moduuli ja sen määrittäminen CPTU-kairauksella" /27/.

3. Suoritetaan leikkausmoduuliin G_0 muodonmuutostasosta johtuva korjaus

Koska cross hole -menetelmällä määritetyn leikkausmoduuli vastaa hyvin pientä leikkausmuodonmuutoksen tasoa, on leikkausmoduulia korjattava liikenteen rasittamissa rakenteissa toteutuvaa muodonmuutostasoa vastaavaksi. Käytettävä korjaustaso valitaan leikkausmoduulin ja liukuman välistä vuorosuhdetta esittävästä kuvasta 18.



Kuva 18. Leikkausmoduulin periaatteellinen vaihtelu muodonmuutostason funktiona sekä eri kuormitustilanteisiin ja muodonmuutosominaisuuksien määrittäminen menetelmiin liittyviä tyypillisiä muodonmuutostasojia /24/.

4. Määritetään E-moduuli leikkausmoduulin avulla (kaava 36 tai 37)

$$E' = 2 \cdot G' \cdot (1 + \nu') \quad (36)$$

$$E = 3 \cdot G \quad (37)$$

5. Suoritetaan tarvittaessa E-moduulin kevätkestävyyskorjaus (taulukko 15)

Taulukko 9. Tien sitomattomien rakennekerrosten ja alusrakenteen materiaalien jäännösmoduulien vuodenaikaisvaihtelukertoimien arvoja /21/.

Materiaalityyppi	kesä n. 3-4 kk 15.5. -15.9. kesäkerroin	syksy 2-3 kk 1.9. -30.11. syksykerroin vaihtelu, "normaaliarvo"	talvi 5-7 kk 1.10. -30.4. talvikerroin	kevät 0.7-1.5 kk 1.4. -31.5. kevätkerroin vaihtelu "normaaliarvo"
Murske Sora	1.00	0.85-1.00 0.90	5-10	0.55-0.90 0.80
Hk, routimaton SrMr, routimaton HkMr, routimaton	1.00	0.75-0.95 0.85	5-15	0.45-0.80 0.70
Hk, routiva SrMr, routiva HkMr, routiva	1.00	0.65-0.85 0.75	5-20	0.35-0.70 0.50
Si SiMr Savi	1.00	0.60-0.80 0.70	5-25	0.30-0.65 0.40

6. Korjataan tarvittaessa E-moduulia jännitystilän muutos huomioiden (kaava 38) ja tarkistetaan saadun moduulin suuruusluokka.

$$E = k_3 \theta_0 \left(\frac{q}{\theta_0} \right)^{k_4} \quad (38)$$

missä,

- E = kimmomoduli, kPa
- q = deviatorinen jännitys, kPa ($=\sigma_1 - \sigma_3$)
- θ_0 = vertailujännitys, 100 kPa
- k_3 = materiaali parametri ('moduuliluku')
- k_4 = materiaali parametri ('jännityseksponentti')

Edellä kuvatulla menettelyllä saatua moduulia on syytä verrata taulukkoarvoihin ja tarvittaessa tarkistaa. Taulukossa 16 on esitetty koheesiomaalajien dynaamisiin kuormituskokeisiin perustuvia jäykkyysmoduuleja. Tulokset kuvaavat sitä tilannetta, jossa deviatorinen jännitys alusrakenteen yläpinnassa on 10...30 kPa. Tämä vastaa tavanomaisilla tierakenteilla alusrakenteessa vallitsevaa jännitystilaa /22/.

Taulukossa 17 esitetyt moduuli arvot perustuvat ns. havaintoteillä tehtyihin pudotuspainolaitemittauksiin. Arvoissa on otettu huomioon alusrakenteessa vallitseva jännitystila. Koska esitetyt arvot on tarkoitettu tierakenteen mitoittamiseen, on moduulien arvoissa huomioitu myös hajonta vähentämällä keskiarvosta keskihajonta /22/.

Taulukko 16. Koheesiomaalajien jäykkyyssmoduuleja tavanomaisilla tierakenteilla dynaamisten kolmiaksaalikokeiden perusteella. Jäykkyyssmoduulien yläraja vastaa lähinnä 10 kPa deviatorista jännitystä /22/.

Maalaji	Kosteus	Jäykkyyssmoduuli, MPa
savi	kuivakuori	30-60
savi	normaali	20-30
savi	märkä	5-10
savinen siltti	kuivakuori	60-80
savinen siltti	normaali	30-40
savinen siltti	märkä	5-20
hiekkainen siltti	kuiva	80
hiekkainen siltti	normaali	40
hiekkainen siltti	märkä	20
silttinen hiekka	kuiva	100
silttinen hiekka	normaali	50
silttinen hiekka	märkä	40

Taulukko 17. Pudotuspainolaitteella määritettyjä alusrakenteen jäykkyyssmoduuleja /22/.

Maalaji	Jäykkyyssmoduuli, MPa					Päällysrakenteen paksuus, m	σ_d / θ , kPa
	kevät	kevät pv*	kesä ja syksy	kesä ja syksy pv*	penkereessä h > 1 m		
Sa (ei pehmeä)	35	50	45	50	50	1.0	σ_d 14-16
siSa, Si, saSi	20	25	25	35	50	1.0	σ_d 12-16
siHk, saHk	35	50	45	50	60	0.6	45-61
hk, srHk (routimaton)	50	50	50	50	50	0.6	48
hkSr, Sr (routimaton)	75	75	75	75	75	0.6	54
SiMr, saSiMr	45	60	60	60	70	0.6	47-53
siHkMr, hkSiMr	70	80	80	80	80	0.6	53-55
srHkMr (routimaton)	125	125	125	125	125	0.6	
Louhe					150		

* arvot pohjaveden etäisyyden ollessa yli metrin syvyydellä alusrakenteen pinnasta

7 KIRJALLISUUS

- /1/ CPT-sondering, utrustning - utförande - utvärdering. Statens geotekniska institut. Information 15. Linköping, 1993. 80 s. ISSN 0281-7578.
- /2/ Sandven, R. 1990. Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests. NTH Institut for Geoteknikk.
- /3/ Senneset, K. & Janbu, N. (1985). Shear strength parameters obtained from static cone penetration test. ASTM STP 883. 1985. pp.41-54.
- /4/ Kairausopas VI. CPT / Puristinkairaus. Puristin-heijarikairaus. Versio 1.00. Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. 2001
- /5/ Senneset, K., Janbu, N. & Svanö, G. (1982). Strength and deformation parameters from piezocone tests. Proc. of the 2nd European Sym. on Penetr. Testing. Amsterdam 1982. Vol. 2, pp. 863-870
- /6/ Senneset, K., Sandven, R. & Janbu, N. (1989) The evaluation of soil parameters from piezocone tests. TRB Transportation Research Report 1235. Myös: Institutt for Geoteknikk, Norges Tekniske Høgskole 1989.
- /7/ Torstensson, B.A., (1977) The pore pressure probe, NGM-77, pp.34.1-34.15.
- /8/ Houlsby, G. & Teh, C.I. (1988). Analysis of the piezocone in clay. ISOPT I, Orlando. Proceedings, Vol.2. pp. 777-783)(Baligh, M.M. 1985. The strain path method. ASCE, JGED, Vol. 11, No 9, pp. 1108-1136
- /9/ Baligh, M.M., (1975) Theory of deep site static cone penetration resistance. MIT Dept. of Civil Rngng. Report no R.75-76, Cambridge, Mass.
- /10/ Robertson, P.K., Campanella, R.G., (1984) Guidelines for Use and Interpretation of the Electronic Cone Penetration Test. Soil Mechanics Series, No. 69. Univ. of British Columbia, Canada.
- /11/ Johannesson, L-E. (1990) CPT-sondering i finjord. LNTH, Avdelningen för Geoteknik, Lund.
- /12/ Mitchell J.K. ja Gardner W.S. (1975) In situ measurements of volume change characteristics. SOA Report. Conf. on In Situ Measurements of Soil Properties. Raleigh. Proc. vol. 2 pp. 279-345
- /13/ Svanö, G. (1980) Tolkning av konsolideringskoeffisienten c_h fra dissipasjonsforsok. NTH Geotechnical Division, report no O.81.19
- /14/ Levandoux, J.N. & Baligh, M.M. (1986) Consolidation after undrained piezocone penetration 1) Prediction. ASCE JGED, vol 112, no 7, pp. 707-727
- /15/ Torstensson, B.A. (1975) Pore pressure sounding instrument. ASCE Specialty Conference, Raleigh. Proc. vol 1. pp. 48-54
- /16/ Baligh, M.M. & Levandoux J.N. (1980) Pore pressure dissipation after cone penetration. MIT. Dept. of Civil Engineering, report R.80-11. Cambridge
- /17/ Vesic, A.S. (1972) Expansion of cavities in infinite soil mass. ASCE, JGED, vol. 98. SM3. pp. 265-290

- /18/ PrENV 1997-3 "Geotechnical design – Part 3: Design assisted by field testing. CEN/TC 250/SC7 Geotechnical design. Document N 303. (1999)
- /19/ Bergdahl U., Ottoson E., Malmberg B.S. (1993) Plattgrundläggning. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm 282 s.
- /20/ Lunne, T. & Keaveny, J., Technical Report on Solution of Practical Problems Using CPT. International Symposium on Cone Penetration Testing. Proceedings CPT'95, vol. 3. pp. 119 - 138. Swedish Geotechnical Society. Linköping, 1995.
- /21/ Ehrola, E., Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet, Rakennustieto Oy, Helsinki 1996. 357 s.
- /22/ Belt, J., Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformaatio. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 15/1997. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki 1997. TIEL 4000173. 55 s. + liitt. 11 s.
- /23/ Hegazy, Y., & Mayne, P., Statistical correlations between V_s and cone penetration data for different soil types, Proceeding of International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'95, vol 2, Linköping 4-5.10.1995. Swedish Geotechnical Society, Report 3:95 pp. 173-177.
- /24/ Tielaitos, Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, luonnos 20.6.2000.
- /25/ Sanglerat, G. The penetrometer and soil exploration. Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 1, Elsevier 1972.
- /26/ Janbu, N. Discussions. Penetration in clay at undrained conditions. - Relationship between tangent modulus and cone resistance. - Scatter in measured point resistance in sands. ESOPT 1974. Proc. Vol.2.2. Stockholm.
- /27/ Pohjamaan moduuli ja sen määrittäminen CPTU-kairauksella. TPPT-tutkimusraportti 44. 2001.
- /28/ Larsson, R. & Mulabdic, M. Piezocone tests in clay. Swedish Geotechnical Institute. Report No 42. Linköping 1991.

Liite 1. CPTU-LAITTEISTON KALIBROINTI

1 TARKOITUS

Tässä menetelmäkuvauksessa on esitetty menetelmä, jolla määritetään tai tarkistetaan CPTU -kärjen kalibrointikertoimet ja epätarkkuudet.

2 MÄÄRITELMÄT

- *Kärkivastus* (paine) on kairan kärkeen vaikuttava voima jaettuna kärjen poikkipinta-alalla (10 cm^2).
- *Vaippakitka* (leikkausjännitys) on CPTU -kairan vaippaan vaikuttava leikkausvoima jaettuna vaipan pinta-alalla (150 cm^2).
- *Huokospaine* (paine) on välittömästi kärjen yläpuolella maan huokostilassa vaikuttava veden paine.
- *Ylikuluminen* tarkoittaa CPTU-kairassa esim. kärkivastuksen muutoksen aiheuttamaa vaikutusta vaippakitkan arvossa.

3 LAITTEET JA TARVIKKEET

- CPTU -kalibrointiselli
- Voima- ja paineanturi(t)
- Lämpökaappi, kryomaatti
- Tiedonkeruujärjestelmä

4 KALIBROINTIMENETTELY

4.1 KALIBROITAVAT SUUREET

Kalibroitavat suureet ovat:

- Kärkivastus
- Huokospaine
- Vaippakitka

Em. suureiden kalibrointi tai tarkastus kuuluvat peruskalibrointiin. Kaikki jäljempänä esitettävät tarkastukset tehdään vain erikseen sovittaessa.

4.2 MUITA SELVITETTÄVIÄ / KALIBROITAVIA ASIOITA

Muita tekijöitä, jotka voidaan kalibroida/selvittää ovat :

- Huokospaineen vaikutus kärki- ja vaippavastuksen arvoon
- Huokospaineanturin vaste pulssiluonteisessa kuormituksessa
- Kärki- ja vaippavastuksen sekä huokospaineen lämpötilariippuvaisuus

4.3 KALIBROINNIN YLEISET VAATIMUKSET

Seuraavassa listassa on lueteltu kalibrointimenettelyn yleiset vaatimukset :

- Kärkivastus kalibroidaan kahdella alueella:
0..nimellisvastus
0..0,1× nimellisvastus
huokospaine ja kärkivastus vain yhdellä alueella: 0...nimellisarvo.
- Kalibrointi käsittää ainakin kolme kuorman/paineen nosto- ja laskusykliä.
- Kussakin syklissä on vähintään 5 (max. 10) porrasta nousu- ja laskuvaiheessa - samat sekä nosto- että laskuvaiheessa.
- Kuormien on oltava samat niin nosto- kuin laskuvaiheessakin eikä kuormituksen suuntaa saa muuttaa kuormituksen aikana.
- Kalibroinnin yhteydessä rekisteröidään lämpötila ja ilman paine.
- Myös käytetyt vertailuanturit (tyypit ja sarjanumero) sekä suorittaja ja aika tallennetaan.
- Kalibroinnissa käytettävät vertailuanturit kalibroitutetaan säännöllisesti

5 KALIBROINTI

5.1 KÄRKIVASTUKSEN KALIBROINTI

Kärvivastus kalibroidaan kuormituskehässä kärki alaspäin ja vertailuanturi kehän yläpalkkiin kiinnitettynä. Alapäässä käytetään kartionmuotoista sovituskappaletta. Kiinnityksestä johtuvia epäkeskisyyksiä ja momenteja on vältettävä.

Vertailuanturi valitaan kalibroittavan kärjen nimellisvoiman mukaan. Vertailuanturin mittausalue saa olla korkeintaan kaksi kertaa tarvittavan voiman suuruinen.

Eri alueiden antureita on verrattava keskenään. Isomman vertailuanturin kalibrointi on suoritettava hyväksytyssä laitoksessa tai sitä on verrattava tarkistettuun anturiin. Kalibrointi ei saa olla vuotta vanhempi.

Kalibrointi sisältää vähintään kolme kuorman nosto- ja laskuvaihetta ja kussakin tulee olla vähintään viisi porrasta. Vertailuanturin ja kalibroittavan anturin nollaus on suoritettava kuormitusten välillä.

Kalibroinnin aikana talletetaan paperille vertailuanturin ja tutkittavan anturin kärjen, huokospaineen ja vaipan lukemat kaikista etukäteen määrätyistä kuormitusportaista.

5.2 VAIPPAKITKAN KALIBROINTI

Vaippakitkan kalibrointi suoritetaan samassa kuormituskehässä kuin kärkivastuksen kalibrointi. Kärjen kärkikartio poistetaan ja kuorma välitetään vaipalle tarkoitukseen valmistetun kappaleen avulla. Kalibroinnin aikana talletetaan paperille vertailuanturin ja tutkittavan anturin kärjen, huokospaineen ja vaipan lukemat kaikista etukäteen määrätyistä kuormitusportaista.

5.3 HUOKOSPAINEEN KALIBROINTI

Kalibrointi suoritetaan CPTU-kalibrointisellissä. Huokospaineen kalibroinnin yhteydessä voidaan selvittää huokospaineen muutoksen vaikutukset kärki- ja vaippavastuksien arvoihin.

Vertailupaineanturin mittausalue saa olla enintään kaksi kertaa tutkittavan anturin mittausalueen suuruinen. Vertailuanturin kalibrointi tulee suorittaa kansallisessa mittauspaikassa tai asianmukaisella "dead weight" kalibraattorilla. Kalibrointi ei saa olla vuotta vanhempi.

Kalibroinnissa sellipaine voidaan säätää ilmanpainesäätimellä, jolla on riittävä herkkyys eli n. 0,5 kPa. Anturit on nollattava kuormitus syklien välillä. Kuormitus syklien aikana on ehdottomasti taltioitava huokospaineen, kärki- ja vaippavastuksen arvot kussakin etukäteen määrätyssä kuormitusportaassa.

6 KALIBROINTITULOSTEN MÄÄRITYS

Kalibroinnin tuloksena määritetään kullekin suurelle kerroin, jota käytetään joko jännitearvon muuttamiseen vastuksen tai paineen arvoksi tai korjaamaan tarvittaessa esim. Memocone- kärjestä Geo-printterin kautta tulostuvia arvoja.

Tulosten käsittely sisältää :

- Vertailuanturin vertailuarvojen laskennan
- Kalibroittavan anturin tulosten laskennan ja purkamisen (memocone)
- Kalibrointikuvan piirron
- Taulukoiduista numeroarvoista määritetään (lineaarinen) :
kalibrointikerroin ja
kalibrointivakio

Edellä mainittujen lisäksi määritetään seuraavat suureet (kuva 1) :

- Kalibrointivirhe (calibration error)
- Epälineaarisuus (non-linearity)
- Hystereesi (hysteresis)
- Toistettavuus (repeatability)
- Nollapistevirhe (zero-point error)

Nämä virheet määritetään ns. parhaan havaintoaineistoon sopivan suoran suhteen. Parhaan suoran lyhyt määritelmä on :

Nolla-pisteestä vasteen huippupisteeseen piirretty suora viiva, joka kuvaa havaintopisteitä mahdollisimman hyvin. Mikäli suora ei lähde nolla-pisteestä, on havainnoista vähennettävä ko. erotus.

7 MUUT SELVITETTÄVÄT ASIAT

7.1 HUOKOSPAINEN VAIKUTUS KÄRKI- JA VAIPPAVASTUKSEN ARVOIHIN

CPTU -sellissä suoritettun huokospainekalibroinnin sivutuloksena saadaan kärki- ja vaippavastuksen riippuvuus huokospaineen muutoksista. Havaintoaineistosta lasketaan sen pinta-alan suuruus (kärjessä ja vaipassa), johon paine vaikuttaa. Alan suuruus on määritettävä myös mittaamalla poikkipinta-alat. Kärkivastuksen riippuvuus esitetään kuvamuodossa ja tulostetaan pinta-alakerroin **a**. Vastaavasti voidaan määrittää myös vaippavastuksen pinta-alakerroin **b**. Huokospaine vaikuttaa kärkivastuksen arvoon kaikilla kärkityypeillä. Kärjen pinta-alasuhdetta tarvitaan laskettaessa kokonaiskärkivastusta q_T .

7.2 HUOKOSPAINENTURIN TARKASTUS TRANSIENTI/PULSSIKUORMALLA

Huokospainenturin toiminta voidaan tarkastaa myös pulssimuotoisella kuormalla. Tavoitteena on selvittää anturin/mittausmenetelmän kyky reagoida nopeaan kuormitukseen. Menettely soveltuu lähinnä kiinteästi mittauslaitteistoon kiinnitetyille huokospainentureille.

7.3 CPTU -KÄRJEN LÄMPÖTILARIIPPUVAISUUS

Lämpötilariippuvaisuuden kalibrointi voidaan suorittaa CPTU-sellissä, missä nesteen lämpötilaa säädetään kryomaatilla tai sääkaapissa. CPTU-sellin hankaluutena on pienehkö kitka, jota esiintyy sellin ja kärjen läpivientireiässä.

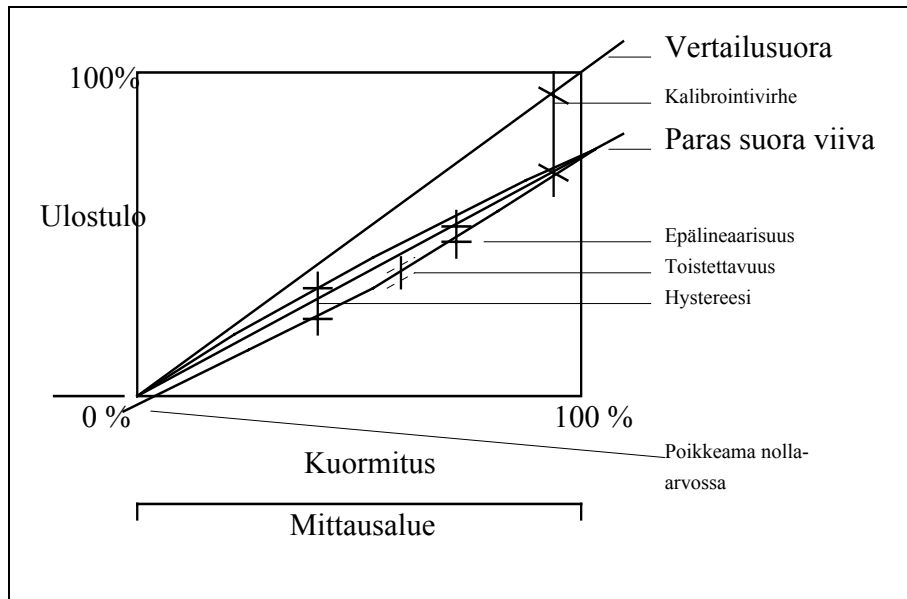
Kalibroinnin avulla pyritään selvittämään eri suureiden (kärkivastus, vaippavastus ja huokospaine) :

- Nolla-arvon ryömintä (zero point shift / °C)
- Herkkyyden muutos (sensitivity shift / °C)

Lämpötilan mittaustarkkuuden on kalibroinnissa oltava n. 0,5°C -astetta. Lämpötilan muutoksille on varattava riittävästi aikaa esim. 30 minuuttia kutakin lämpötilaa kohden.

8 RAPORTOINTI

CPTU -kärjen kalibroitiraportti sisältää eri kalibroitien tulokset kuvina ja taulukkoina (taulukkoina vain pyydettyäessä tai erittäin epälineaaristen antureiden osalta). Eri suureiden (kärkivastus, vaippavastus ja huokospaine) lineaariset kalibroitikertoimet sekä kunkin suureen eri virhetermit tulostetaan taulukkomuodossa. Raporttiin merkitään myös kalibroinnin voimassaoloaika. Muiden tarkastusten tulokset raportoidaan vastaavasti.



Kuva 1. Venymäliuska-anturin epätarkkuustyypit. Periaatekuva.

Liite 2. CPTU-KAIRAUSPÖYTÄKIRJA

Tiedostonimi :

Tutkimuspaikka :
 Kairaja :
 Pvm. :
 Tunnus :
 Sijainti/Taso :
 Vertailutaso :

Pohjavedenpinta :
 Esiporauksen ja alkukairauksen syvyys :
 Aloitussyvyys :
 Päättymissyvyys :
 Esireiän maalaji :
 Kalusto :
 Kairauksen aikaiset pysähdykset :

Havainnot :

Geometria :
 Huokospainemittaus :
 Huokospaine nollassa luettaessa :
 Huokosjärjestelmän nestelaatu :

Huokospainehavainnot :

Kärjen kalibrointiarvot Kalibroitu
 Pinta-alatekijä a: b:
 Sisäinen kitka O_f : O_c :
 Ylikuuluminen c_1 : c_2 :

Mittakaavakertoimet ja mittausalue (Mpa)					
Huokospaine		Kitka		Kärkivastus	
Mittausalue	skaalaus	mittausalue	skaalaus	mittausalue	skaalaus

Nolla-arvojen lukeminen	Kairausta ennen	Kairauksen jälkeen	Erotus Kärjen irrotuksen jälkeen
-------------------------	-----------------	--------------------	----------------------------------

Huokospaine
 Vaippakitka
 Kärkivastus

Syvyyskorjaus : Ei

Näytteenotto: 1 kerros

Mistä	Mihin	Tiiviys	Virtausraja	Nimitys
-------	-------	---------	-------------	---------

Kerrosrajat :

Epävarmat mittausarvot :

Havainnot ja huomautukset :

Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus

TPPT Menetelmäkuvaukset

TPPT *Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus*

Nro

- 17 Kuormituskestävyysmitoitus. Päällysrakenteen väsyminen
- 18 Tierakenteen routamitoitus
- 19 Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla
- 20 Päällysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi
- 21 Mitoituksen lähtötietojen hankkiminen

TPPT *Menetelmäkuvaukset*

Nro

- 1 Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)
- 2 Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta
- 3 Liikennesuunnittelun laskeminen
- 4 Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen
- 5 Routaus syvyyden määrittäminen
- 6 Routauskoe. Routamittauksen (SP) kokeellinen määrittäminen
- 7 Routamittauksen määrittäminen
- 8 Lämmönjohtavuuden määrittäminen
- 9 Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa
- 10 Radiometrinen reikämittaus
- 11 CPTU - kairaus
- 12 Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin
- 13 Tien rakennekerrostutkimukset
- 14 Routausun ja painuman mittaus
- 15 Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus
- 16 Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa