



CPTu-kairausten parhaat käytännöt ja tulkintaohjelmisto CPeT-IT

Noora Senilä-Sila

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

SENILÄ-SILA, NOORA:

CPTu-kairausten parhaat käytännöt ja tulkintaohjelmisto CPeT-IT

Opinnäytetyö 134 sivua, joista liitteitä 32 sivua
Toukokuu 2022

Tämä opinnäytetyö tehtiin Ramboll Finland Oy:n toimeksiannosta. Taustalla on tietoisuus siitä, että CPTu-kairaukseen ja sen tulosten tulkintaan liittyvää osaamista on lisättävä. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää markkinoilla olevien CPTu-kairausten tulkintaohjelmistojen soveltuvuus tulkintojen tekemiseen. Tavoitteena oli löytää tulkintaohjelmisto, jonka avulla CPTu-kairausten tulkinnan tekeminen helpottuisi suunnittelijoille. Sopivan tulkintaohjelmiston löytämisen lisäksi oli tavoitteena myös lisätä tietoa itse kairauksen tekemisestä ja siihen liittyvistä käytännöistä.

Tutkimusmenetelmänä oli kattava kirjallisuuskatsaus CPTu-kairauksesta, kairauksen suorituksesta sekä kairaukseen liittyvistä käytännöistä. Lisäksi käsiteltiin laajasti kansainvälisiä teorioita, joihin tulkintaohjelmistot sekä CPTu-kairauksen tulkintojen tulokset perustuvat. Lopuksi testattiin CPeT-IT tulkintaohjelmiston sopeuvuutta geosuunnittelijoiden työkaluksi CPTu-kairausten tulkinnoissa.

Työn tuloksena on käytännön kokemus CPeT-IT-tulkintaohjelmiston käytöstä. Kairauksista saatu aineisto vietiin tulkintaohjelmistoon käyttämällä apuna taulukkolaskentaohjelmaa. Aineistolle annettiin projektikohtaiset parametrien tulkintaohjelmistossa. Tarkasteltiin tulkintaohjelmiston antamien tuloksien tarkkuutta ja luotettavuutta tulkinnan tekemiseen. Tulkintaohjelmistosta saatuja tuloksia vertailtiin Tampereen Yliopiston ja Väyläviraston FINCONE hankkeen yhteydessä saatuihin tuloksiin. Todettiin CPeT-IT-tulkintaohjelmiston soveltuvuus yrityksessä käytettäväksi CPTu-kairausten tulkinnassa. Lisäksi tarkennettiin tulkintaohjelmiston tulkinnan tekemistä pehmeän saven suljetun leikkauslujuuden ja ylikonsolidaatioasteen arvioita korrelaatioyhtälöiden avulla.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet saavutettiin ja tutkimukseen valikoitunut tulkintaohjelmisto päätettiin ottaa yrityksen käyttöön. Kehittämisehdotukset tulkintaohjelmistoon yhdistettävistä parannuksista liittyivät tulkintaohjelmistosta puuttuneeseen laadunvarmistukseen sekä korrelaatioyhtälöiden käyttöön tulosten tarkennuksessa.

Asiasanat: CPTu-kairaus, tulkintaohjelmisto, geotekniset parametrit

ABSTRACT

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

SENILÄ-SILA, NOORA:

Best Practices of CPTu Sounding and Interpretation Using CPeT-IT Software

Bachelor's thesis 134 pages, appendices 32 pages
May 2022

The CPTu sounding is an accurate soil surveying method used internationally. Even though the advantages of the method are identified the CPTu is not used as much as it perhaps should in Finnish soil investigation. The lack of designers with the knowledge of making CPTu sounding interpretations is recognized in the infrastructure construction industry.

The aim of this thesis was to increase the knowledge in practices of making CPTu soundings and to find a commercial CPTu interpretation software that meets the requirements set.

The theoretical section explores comprehensively the theories and formulas that are the base of the interpretation software. The empirical part consists of the practical use of the chosen interpretation software CPeT-IT and compares the results from the FINCONE project that was conducted by University of Tampere collaboration with Finnish Transport Infrastructure Agency.

In conclusion, all the research objectives were achieved. The chosen interpretation software CPeT-IT was found to be accurate and reliable. In addition, there were some correlation formulas used to improve the results of undrained shear strength and overconsolidation ratio.

Due to lack of quality assurance in the software, a proposal for further study has been made to take this shortcoming into account.

Key words: CPTu sounding, interpretation software, geotechnical parameters

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
2	CPTu-KAIRAUS.....	10
	2.1. Yleistä	10
	2.2. Menetelmäkuvaus	11
	2.3. CPTu-kairan kärjen rakenne ja geometriat.....	12
	2.4. CPTu-kairauksessa mitattavat parametrit	16
	2.4.1 Korjatut parametrit	19
	2.4.2 Lisäparametrit.....	21
3	CPTu-KAIRAUS.....	23
	3.1. Kairauskaluston valinta	23
	3.2. Käyttöluokat	23
	3.2.1 Esitarkistukset ja valmistelut.....	25
	3.3. CPTu-kairauksen työvaiheet	31
	3.3.1 Alkuvalmistelut.....	31
	3.3.2 Kairauksen suoritus	33
	3.3.3 Kairauksen lopetus	34
4	VIRHEET JA EPÄVARMUUDET	36
	4.1. CPTu -kairauksen onnistumisen edellytykset.....	36
	4.2. Mittausdatassa näkyvät epävarmuudet.....	38
5	CPTu-TULKINNAT.....	44
	5.1. Maalajitulkinta kairausdiagrammista	46
	5.2. Maaperän profilointi.....	47
	5.3. CPTu tulkinnan geotekniset parametrit	51
	5.3.1 Hienorakeisen maan geotekniset parametrit	53
	5.3.2 Karkearakeisten maalajien geotekniset parametrit.....	62
	5.4. Maan vedenläpäisevyys ja dissipaatiokoe	65
6	TULKINTAOHJELMISTO.....	71
	6.1. Ohjelmiston valinta.....	71
	6.2. CPeT-IT	72
	Yleistä	72
	6.3. Päävalikot	73
	6.3.1 Project-valikko	73
	6.3.2 CPT Data-valikko.....	74
	6.3.3 Calculation-valikko.....	76
	6.3.4 Reports.....	77
7	TULOKSET.....	78

7.1. Yleistä	78
7.2. Mitatut tulokset.....	79
7.3. SBTn-kuvaajat.....	83
7.4. Geoteknisten parametrien arviot	85
7.5. Tulosten tarkastelu	87
8 POHDINTA	98
LÄHTEET.....	101
LIITTEET	103
Liite 1. Masku.....	103
Liite 2. Lempäälä	109
Liite 3. Perniö.....	115
Liite 4. Sipoo	121
Liite 5. Paimio	127
Liite 6. Kokoonpuristuvuusmoduuli	133

LYHENTEET JA TERMIT

a	kärkikohtainen pinta-alakerroin
A_c	kärjen poikkipinta-ala, mm^2
A_n	kärjen nettopinta-ala, mm^2
A_s	vaipan poikkipinta-ala, mm^2
A_{sb}	kitkahylsyn seinämän poikkipinta-ala hylsyn alaosassa, mm^2
A_{st}	kitkahylsyn seinämän poikkipinta-ala hylsyn yläosassa, mm^2
A_t	kärjen kokonaispinta-ala, mm^2
b	kärkikohtainen pinta-alakerroin
B_q	huokospainesuhde
C_h	konsolidaatiokerroin, horisontaalinen
C_{inc}	kairan kärkiosan kaltevuuskulman vaikutuksen korjauskerroin
CPT	Cone Penetration Test, sähköinen puristinkairaus
CPT _u	Cone Penetration Test, sähköinen puristinkairaus samanaikaisella huokospaineen u mittauksella
D_r	suhteellinen tiiveys
E	muodonmuutosmoduuli
F_r	normalisoitu kitkasuhde, %
f_s	korjaamaton vaippakitka, kPa
f_t	kokonaisvaippakitka, kPa
G	leikkaus moduuli
G_0	pieni leikkaus muodonmuutosmoduuli
H	ohuen kerroksen paksuus, mm
I_c	indeksi (SBT)
k	vedenläpäisevyys, m/s
k	paikka- tai kerroskohtainen empiirinen kerroin
K_0	In-situ jännityssuhde
K_c	ohuen kerroksen korjauskerroin
l	tunkeutumispituus, m
M	kokoonpuristuvuus
m	on empiirinen materiaalikerroin
N_k tai N_{kt}	empiirinen kärkivastukseen perustuva kärkikerroin

N_{ke}	empiirinen tehokkaaseen kärkivastukseen perustuva kärkikerroin
$N_{\Delta u}$	empiirinen huokosylipaineeseen perustuva kärkikerroin
OCR	ylikonsolidaatioaste
p_a	ilmakehänpaine
PI	plastisuusindeksi
q_c	mitattu kärkivastus, MPa
q_{c^*}	korjauskertoimella K_c korjattu kärkivastus, MPa
q_{c1}	kärkivastus pehmeämmässä kärkeä ympäröivässä maassa
q_{c2}	kärkivastus jäykemmässä maassa
Q_c	puristusvoima, kN
Q_s	vaippaan vaikuttava voima, kN
Q_t	normalisoitu kärkivastus, MPa
R_f	kitkasuhde, %
S	on normalisoitu lujuussuhde
SBT	Soil Behavior Type, maaperän käyttäytymistyyppiluokitus
SBT _n	normalisoitu Soil Behavior Type, maaperän käyttäytymistyyppiluokitus
SHANSEP	malli, jota käytetään määrätyn tyyppisen saven suljetun leikkauslujuuden mallintamiseen
S_t	sensitiivisyys
S_u	suljettu leikkauslujuus, kN/m ²
$S_{u(rem)}$	häiritty suljettu leikkauslujuus
TE1	käyttöluokkien koetyyppi, CPT-kairaus
TE2	käyttöluokkien koetyyppi, CPTu-kairaus
u	mitattu huokospaine, kPa
Δu	huokospainelisäys, kPa
u_0	maassa vallitseva huokospaine, kPa
u_2	kitkahylsyn ja kärkikartion välistä mitattu huokospaine, kPa
u_3	kitkahylsyn yläpuolelta mitattu huokospaine, kPa
w_L	juoksuraja

z	kairausvyvyys, m
α	on paikka- tai kerroskohtainen empiirinen kerroin
γ	tilavuuspaino, kg/m ³
γ_w	veden tilavuuspaino, kg/m ³
σ	normaalijännitys
σ'	tehokas normaalijännitys
σ_{v0}	maassa vallitseva kokonaispystyjännitys
ρ	tiheys, kg/m ³
u	Poissonin suhde
φ	kitkakulma
ψ	state parameter, nykytilan huokosluvun e ja kriittisen tilan huokosluvun e_{cs} erotus

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Ramboll Finland Oy toimeksiannosta. Opinnäytetyön taustalla on tietoisuus siitä, että vaikka menetelmän edut tiedetään, on CPTu-kairaus edelleen liian vähän käytetty pohjatutkimusmenetelmä. Osittain tämä saattaa johtua siitä, ettei geosuunnittelija osaa tulkita CPTu-kairauksesta saatavia tuloksia. Toinen mahdollinen syy menetelmän käytön vähyyteen on, että tutkimusohjelmaan ohjelmoidaan CPTu-kairaus, joka on suoritettu epäluotettavasti eikä siitä saada luotettavia tuloksia.

CPTu-kairauksen tulkintaa pidetään myös vaikeana ja usein sitä tehdään omilla taulukkolaskentapohjaisilla työkaluilla. Niiden ongelmana usein on se, ettei niitä osaa lukea kuin se, joka on työkalun kehittänyt. Tämä ongelma tuo esiin sen, että ilman yhteistä työkalua ei CPTu kairauksen tulkinnan tekeminen voi kehittyäkään. Tästä tarpeesta kehittää CPTu-kairauksen tulkinnan tekemistä tulkintaohjelmiston avulla on lähtenyt ajatus tämän opinnäytetyön aiheeseen. Tavoitteena oli löytää luotettava, tarkka ja helppokäyttöinen tulkintaohjelmisto yrityksen käyttöön.

Oleellista tulkinnan kannalta on, että geosuunnittelija ymmärtää CPTu-kairauksen tekemisen. Kairauksen esivalmistelut ovat tärkein osa koko prosessia ja siksi on myös geosuunnittelijan näkökulmasta hyvä olla käsitys kairausmenetelmästä kokonaisuutena. Tästä syystä olen halunnut tuoda esiin myös enemmän tätä tekemisen osuutta opinnäytetyössäni.

CPTu-tulkinnan taustalla on lukuisia eri teorioita. Teoriat perustuvat usein empirisiin tutkimuksiin, joita on tehty erityyppisissä maaperäolosuhteissa kuin, mitä meillä täällä Suomessa on. Näitä teorioita on tarkasteltu laajasti teoriaosuudessa, mutta pääasiassa tarkasteltavana oli pehmeän saven tulkintaan käytetyt teoriat. Tulkintaohjelmiston tarkkuutta ja luotettavuutta tulkinnan tekemiseen tarkasteltiin vertailemalla tulkintaohjelmistolla saatuja tuloksia FINCONE hankkeesta saatuihin tuloksiin. FINCONE hankkeessa kehitettiin CPTu-kairausta sekä näytteenottoa Tampereen yliopiston ja Väyläviraston yhteistyönä.

2 CPTu-KAIRAUS

CPTu eli sähköinen puristinkairausmenetelmä (Cone Penetration Test), jossa mitataan myös huokospainetta kärkikartion ympärillä samaan aikaan. Toisen maailmansodan aikaan saksalaiset kehittivät ensimmäisen sähköiseen mittaukseen perustuvan kärkikartion puristinkairauksen (CPT). Huokospaineen mittaaminen kehitettiin osaksi kairausmenetelmää noin 40 vuotta sitten. Pohjoismaissa, erityisesti Ruotsissa ja Norjassa käyttö on lisääntynyt vuosittain. Norjassa CPTu-kairaus on syrjäyttänyt siipikairauksen käytön kenttäkokeissa saven suljetun leikkauslujuuden määrittämisessä.

2.1. Yleistä

CPTu -kairaus on tarkka maaperän tutkimusmenetelmä, jonka käyttökohteet ovat laajat. Sitä käytetään yleisesti maalajikerrosten tunnistamiseen ja maalajiluokituksen tekemiseen. Menetelmä soveltuu käytettäväksi monenlaisille maalajeille, soraisille hiekkamaille ja hienorakeisille maalajeille. CPTu -kairaus ei kuitenkaan sovi kivisille maalajeille tai jos maalajin sorapitoisuus kasvaa liian suureksi. CPTu -kairauksen tuloksia käytetään myös geoteknisten parametrien määrittämiseen. Useimmiten parametreista arvioidaan saven suljettua leikkauslujuutta ja hiekan suhteellisesta tiiveyttä. Lisäksi voidaan arvioida muodonmuutos- ja vedenjohtavuus parametreja. CPTu -kairauksen avulla voi myös ohjelmoida siipikairauksen oikealle syvyydelle.

Menetelmän etuja ovat kolmen kairan kärjestä mitattua parametriä, joiden avulla voidaan tehdä useita tulkintoja. CPTu -kairaus on nopea ja tarkka menetelmä, jonka toistettavuus on hyvä. Jatkuva mittausdata antaa tarkan kuvan maaperän olosuhteista ja virheelliset tulokset ovat helposti tunnistettavissa mittausdatasta. Lisämoduulien avulla voidaan tulkintaa tarkentaa, määrittyjen geoteknisten parametrien osalta. Hyvien puolien lisäksi kairausmenetelmällä on myös paljon haasteita ja rajoituksia. Haasteita ovat välinpitämättömyys tai ymmärtämättömyys kairauksen suorituksessa sekä kairaukseen liittyvissä esivalmisteluissa. Kairausmenetelmälle asetettuja vaatimuksia ei huomioida ja kairaukseen liittyviä

rajoituksia ei ymmärretä riittävästi. Haasteena on myös se, että tulosten tulkinta vaatii osaamista ja kokemusta. (Selänpää 2021, 4.)

Usein CPTu -kairaukseen ja tulkintaan liitetään virheet, korjaukset ja epävarmuudet. Kaikki nämä asiat koskevat myös muitakin tutkimusmenetelmiä, kuten siipikairausta, näytteenottoa, painokairausta ja puristin-heijarikairausta. Yhtä oikeaa tutkimusmenetelmää ei ole ja on järkevämpää tehdä tutkimuksia saman ominaisuuden tutkinnassa eri menetelmillä. Pohjatutkimusohjelmaan ohjelmoitaessa CPTu -kairauksia on oleellista, että tiedetään, mitä ollaan tutkimassa. Jos tutkitaan maakerrosrajoja hienojakoisesta maasta karkearakeisiin, on kairauksessa käytettävä suurkapasiteettista kärkeä. Tällä kärjellä on mahdollista arvioida karkearakeisen maan maaparametrejä kuten kitkakulmaa ja muodonmuutosparametrejä. Sensitiivinen kärki on oltava käytössä, kun tutkitaan hienojakoisen maan lujuutta ja halutaan arvioida maaparametrejä luotettavalla tarkkuudella. Maaparametrien arviointia varten on pehmeiden maakerrosten myös oltava tarpeeksi paksuja ja homogeenisiä, jotta arvioita voidaan pitää luotettavina. Aiempien tutkimusten perusteella voidaan arvioida sensitiivisen kärjen käytettävyyttä kohteessa ja jos aiempia tietoja ei ole on hyvä tehdä koekairaus esimerkiksi painokairalla, jotta saadaan tarkempaa tietoa alueen maaperästä. Tällä vältetään herkän kärjen rikkoutuminen, jos maaperä on liian soraista tai kivistä. (Selänpää 2021, 1.–20.)

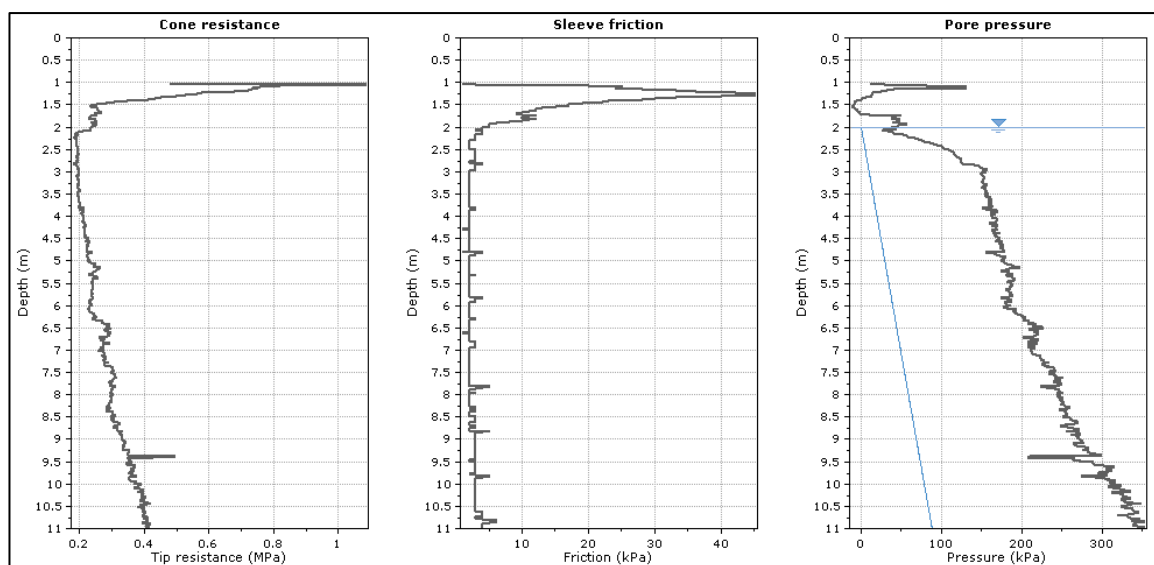
2.2. Menetelmäkuvaus

CPTu -kairaus on sähköinen puristinkairausmenetelmä, jossa samanaikaisesti mitataan myös huokospainetta. CPTu -kairauksessa puristetaan vakionopeudella ($20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$) maahan kärkikartiota, jonka kärkikulma on 60 astetta, poikkipinta-ala 1000 mm^2 ja kärkikartion halkaisija on 35,7 mm. Kairauksen aikana mitataan seuraavia muuttujia:

- kärkivastus [MPa]
- vaippakitka [kPa]
- huokospaine [kPa]
- tunkeutumissyvyys [m]
- inkliinaatio [°]. (Liikennevirasto 2015, 16.)

Mitattavien parametrien arvoja rekisteröidään sähköisesti mittausvälin ollessa niin tiheä (0,01...0,02 m), että käytännössä saadaan lähes jatkuvaa mittausdataa. Eurostandardin myötä kairauksen kaltevuuden mittaus oltava lähes kaikissa kairauksissa. Kaltevuuden mittausta ei vaadita, jos kairaus syvyys on alle 5 metriä ja tavoiteltu käyttöluokka 4. (Liikennevirasto 2015, 16.) Käyttöluokat ja niiden vaatimukset on selitetty tarkemmin kappaleessa 3.2. Käyttöluokat (taulukot 1 ja 2).

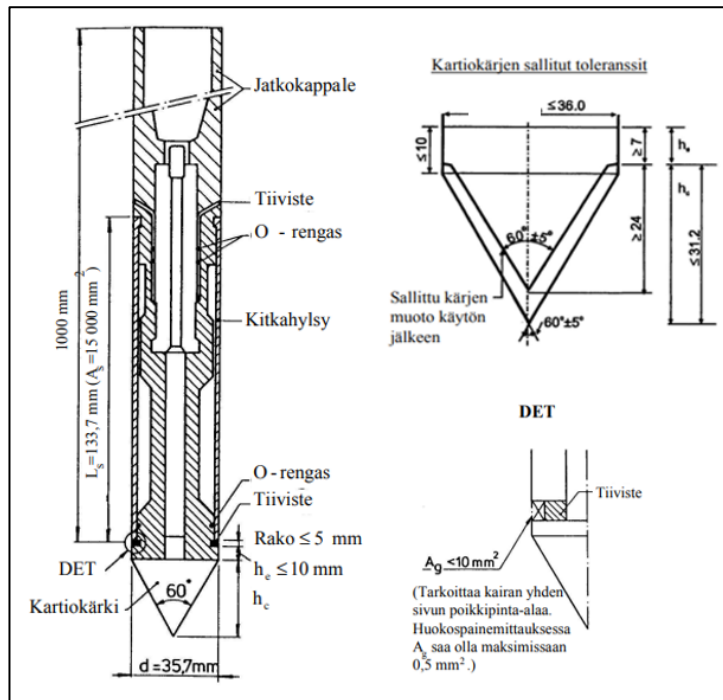
Kairauksesta saatava raakadata, joka tarkoittaa antureilla mitattuja käsittelemättömiä arvoja, esitetään jatkuvana mittauskäyränä syvyyden suhteen. Tulostuskäyrät CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta saaduille mitatuille parametreille, kärkivastukselle q_c , vaippavastukselle f_s ja huokospaineelle u on esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1. Mitattujen parametrien mittauskäyrät CPeT-IT tulkintaohjelmistosta

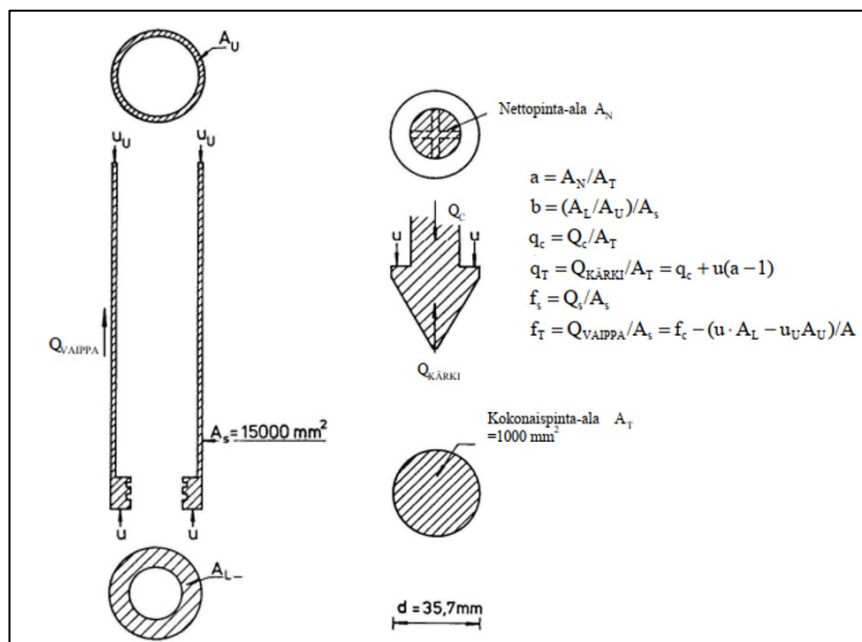
2.3. CPTu-kairan kärjen rakenne ja geometriat

CPTu-kairan kärjen osat ovat kärkikartio, suodatin ja kitkahylsy. Jännitys-venymäliuska-anturit sijaitsevat kairan kärkiosassa. Kuviossa 2 on esitetty CPTu-kairan kärkiosan rakennekuva mittoineen sekä kärkikartion mitat toleransseineen. (Kairausopas VI 2001, 9.)



KUVIO 2. Kärkiosan periaatekuva ja kärkikartion mitat toleransseineen (Kairausopas VI 2001, 11 ja 16)

CPTu-kairan kärkiosan geometriset muodot ja eri osien pinta-alat ovat olennaiset tekijät parametrien määrittämisessä. Pinta-alat ja niiden suhteet vaikuttavat usean parametrin laskennalliseen määrittämiseen. Kärjen geometriset muodot ja pinta-alojen määrittäykset on esitetty kuviossa 3. (Kairausopas VI 2001, 11)



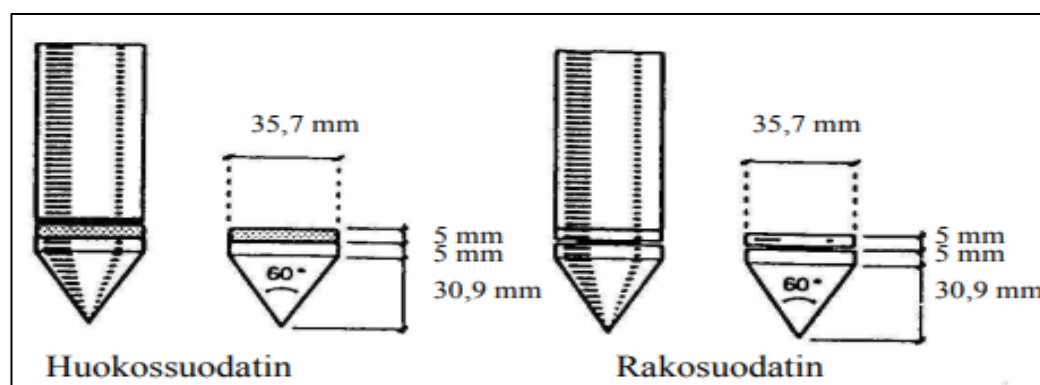
KUVIO 3. Kärjen geometriset muodot sekä eri osien pinta-alatiedot. (Kairausopas VI 2001, 11)

Kartiokärki

Kartiokärki koostuu kartio-osasta ja sylinterijatkoksesta. Kärkikulma on 60° ja kärjen poikkipinta-ala 1000 mm^2 , kun kärjen halkaisija on $35,7 \text{ mm}$. Jos käytetään muun kokoisia kärkikartioita, on se mainittava mittausraportissa, koska saadut tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Tässä opinnäytetyössä esitetyt kaavat ja vertailut koskevat ainoastaan edellä mainitun geometrian tyyppistä kärkikartiota. (Kairausopas VI 2001, 16.)

Suodatin, kitkahylsy, raot ja tiivisteet

Suodatin, joka voi olla joko rakosuodatin tai huokossuodatin sijaitsee heti kärkikartion sylinterijatkoksen takana. Suodattimien sijainnit ja etäisyydet ovat esitetty kuviossa 4. Useimmiten huokospaineen mittaus tapahtuu osoitetussa sijainnissa. Jos käytetyn kärjen huokospaineen mittaus tapahtuu eri sijainnista, on se mainittava mittausraportissa. Tiivisteet ja O-renkaat, jotka ovat kitkahylsyn molemmissa päissä on oltava ehjät ja puhtaat. Kitkahylsyn pinta-ala A_s on 15000 mm^2 . Kitkahylsyn halkaisija on oltava yhtä suuri kuin kärkikartion sylinteriosan halkaisija toleranssi kärkikartion suhteen on $0 \dots +0,35 \text{ mm}$. Standardissa SFS 22476-1 on esitetty kaikki CPTu-kairan kärkiosaa koskeva toleranssivaatimukset. (SFS 22476-1 2013, 18.)



KUVIO 4. Suodattimen sijainti ja etäisyys kärjestä (Kairausopas VI 2001, 16)

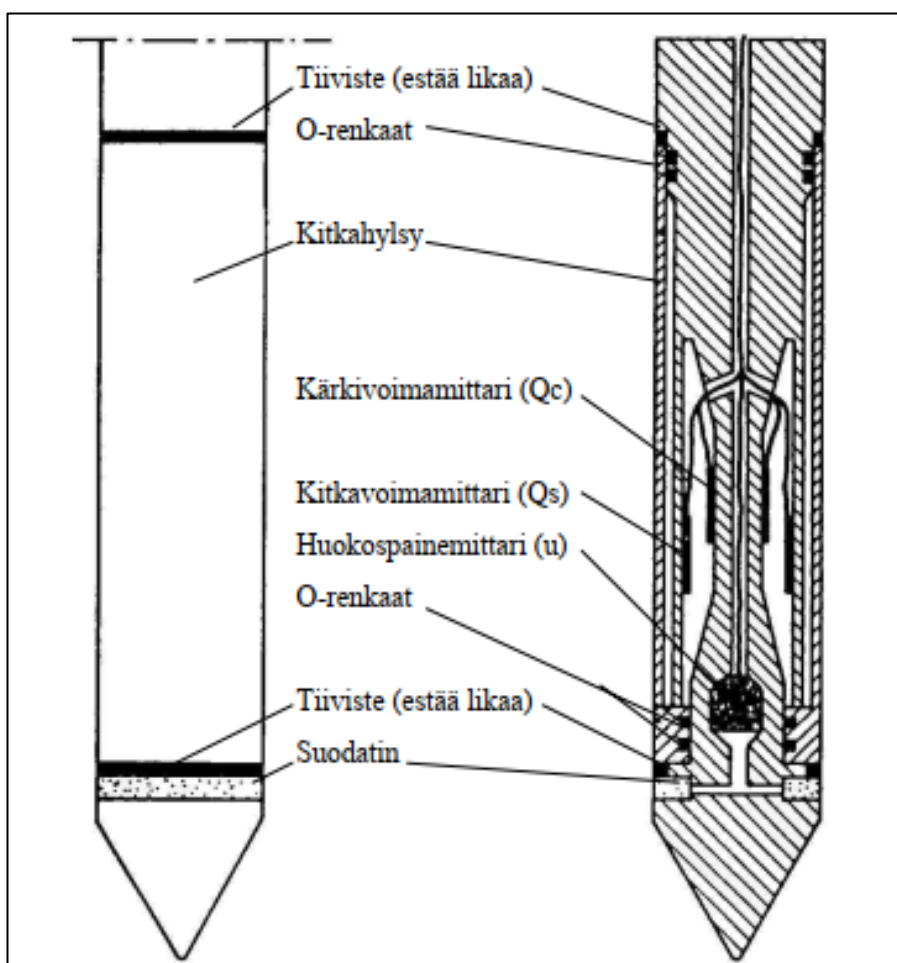
Pinta-alakertoimet a ja b

Jokaisella kärjellä on kärkikohtaiset pinta-alakertoimet a ja b, jotka saadaan kärjen valmistajalta. Näitä pinta-alakertoimia tarvitaan korjatun kärkivastuksen q_t laskemisessa sekä korjatun vaippakitkan f_t laskemisessa. Väärän pinta-alakertoimen käyttö aiheuttaa virhettä tuloksiin erityisesti hienorakeisissa maalajeissa. (Kairausopas VI 2001, 12.)

Kärkivastus-, vaippakitka-, huokospaineanturit

CPTu-kairan kärkiosaan kohdistuvaa kärkivastusta, vaippakitkaa ja huokospainetta mitataan jännitys-venymäliuska-antureilla, jotka sijaitsevat kairan kärki-osassa. Mitta-anturit sijaitsevat kärkiosan eri kohdissa, jolloin mittauksessa samalla tasolla vaikuttavat arvot rekisteröityvät eri aikaan. Mitta-antureiden sijainnit näkyvät kuviossa 5. Antureiden sijoittelussa on huomioitu tekijät, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin kuten kuorman epäkeskeisyys ja lämpötilamuutokset siten, että ne vaikuttaisivat mahdollisimman vähän mittaustuloksiin. Vakionopeudella kairattaessa ja suodattimen ollessa heti kärkikartion takana, rekisteröityvät mitattavat arvot seuraavasti:

- Kärkivastus
- Huokospaine noin 0,7 sekuntia myöhemmin
- Vaippakitka noin 3,4 sekuntia myöhemmin (Kairausopas VI 2001, 23.).



KUVIO 5. Kärkiosan rakennekuva sekä mitta-anturien sijoituspaikat (Kairausopas VI 2001, 11)

2.4. CPTu-kairauksessa mitattavat parametrit

CPTu-kairauksesta saatavat mitatut parametrit ovat kärkivastus q_c , vaippakitka f_s , huokospaine u sekä kaltevuus. Kärkivastukseen ja vaippakitkaan arvoon vaikuttaa maassa vallitseva huokospaine, joka otettava huomioon. Seuraavissa kappaleissa on kerrottu tarkemmin huokospaineen vaikutuksesta kärki- ja vaippavastukseen.

Kärkivastus q_c

Mitatun kärkivastus on korjaamaton kärkivastus. Kärkeen kohdistuu kairatessa huokospaine, joka aiheuttaa virhettä kärkivoiman Q_c mittauksessa. Kärkivastus q_c on kärjestä mitattu puristusvoima Q_c jaettuna kärjen poikkipinta-alalla A_c (1000 mm²) alla esitetyn kaavan 1 mukaisesti. (Kairausopas VI 2001, 10.)

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

missä	q_c	on mitattu kärkivastus [MPa]
	A_c	on kärjen poikkipinta-ala [mm ²]
	Q_c	on puristusvoima [kN]. (Kairausopas VI 2001, 10.)

Mitattaessa huokospainetta u , voidaan mitattu kärkivastus korjata kokonaiskärkivastukseksi q_t , joka on esitetty kappaleessa 2.5.1.

Vaippakitka f_s

Mitatun vaippakitka f_s on korjaamaton kitkavastus. Kairatessa kärkeen kohdistuva maassa vallitseva vedenpaine aiheuttaa virhettä mitattavaan puristusvoimaan Q_s . Kitkavastuksen käyttöä parametrien määrittelyssä rajoittaa käytettävän laitteen kitkamittauksen resoluutio. Kitkavastus f_s on käyttökelpoisin kitkamaissa ja silloin kun huokosvedenpaine on pieni. Käytettäessä tarkkuudeltaan parempia laitteita (Pagani), on kitkamittauksen resoluutio riittävä myös savimaille. Vaippakitka f_s on kaavan 2 mukaisesti vaippaan kohdistuva voima Q_s jaettuna vaipan poikkipinta-alalla $A_s = 15000$ mm². (Kairausopas VI 2001, 11.)

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

missä	f_s	on korjaamaton vaippakitka [kPa]
	Q_s	on vaippaan kohdistuva voima [kN]
	A_s	on vaipan poikkipinta-ala [mm ²]. (Kairausopas VI 2001, 11.)

Mitattaessa huokospainetta u voidaan vaippakitka korjata kokonaisvaippakitkaksi f_t kuten esitetään kohdassa 2.5.2. Korjattu vaippakitka f_t .

Huokospaine u

CPTu -kairauksessa mitattu huokospaine määritellään huokospaineen u_0 ja huokospainemuutoksen Δu avulla. Huokospaine u_0 on maassa vallitseva huokospaine ennen kairautta. Kun kairaus pysäytetään, huokosylipaine purkautuu ja palaa maassa vallitsevan huokospaineen tasolle, jolloin saadaan huokospaine u_0 selville tällä syvyydellä. Huokospainemuutos Δu on kärjen maahan painumisesta aiheutuva muutos huokospaineessa. Huokospaineen muutos $u - u_0$ voi olla positiivinen tai negatiivinen riippuen maan ominaisuuksista. Huokospaine u on CPTu-kairauksen aikana mitattu huokospaine. Huokospaine määritellään kaavan 3 mukaisesti. (Kairausopas VI 2001, 12.)

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

missä	u	on mitattu huokospaine
	u_0	on maassa vallitseva huokospaine
	Δu	on huokospaineen muutos. (Kairausopas VI 2001, 12.)

Kaltevuus

Nykyään CPTu-kairan kärjet sisältävät yksinkertaisen kaltevuuden mittausanturin, jolla voidaan tarkastella kairauksen pystysuoruutta. Mitä syvemmälle kairaataan, sitä suurempi on riski kärjen ohjautumisesta vinoon. Tämä vinous vaikuttaa kairauksen todelliseen syvyyteen sekä vääristää vastusten mittausarvoja. (Liikennevirasto 2015, 28.) Kaltevuuden mittausanturia ei vaadita, jos suunniteltu

kairausten tunkeutumisvyvyys on alle 5 m ja käyttöluokka 4. (SFS 22476-1 2013, 21.) Käyttöluokat ja niiden vaatimukset on esitelty myöhemmin taulukossa 1.

Jos CPTu-kairausta tehdään vaativimmissa käyttöluokissa 1 ja 2, puristinkairauskokeen syvyys on korjattava kaltevuuden suhteen kaavalla 4.

$$z = \int_0^l c_{inc} dl , \quad (4)$$

missä	z	on kairausvyvyys [m]
	l	on tunkeutumisvyvyys [m]
	C_{inc}	on kairan kärkiosan kaltevuuskulman vaikutuksen korjauskerroin. (SFS 22476-1 2013, 37.)

Korjauskertoimen C_{inc} laskemiseen käytettävät kaavat 5 ja 6, joilla otetaan huomioon kairan kärkiosan kaltevuuskulman suhteessa pystyakselin vaikutus kairausvyvyyteen. (SFS 22476-1 2013, 37.)

Käytettäessä suuntaamatonta kaltevuusmittaria, jossa kaltevuus määritellään vain yhdellä arvolla, käytetään kaavaa 5.

$$C_{inc} = \cos \alpha , \quad (5)$$

jossa	α on pystyakselin ja kairan kärkiosan akselin väliltä mitattu kokonaiskulma asteina. (SFS 22476-1 2013, 37.)
-------	---

Käytettäessä kaksiakselista kaltevuusmittaria, jossa kaltevuus määritellään kahdella arvolla, käytetään kaavaa 6.

$$C_{inc} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta_1 + \tan^2 \beta_2}} , \quad (6)$$

jossa	β_1 on pystyakselin ja pystytasolle kuvatun kairan kärkiosan akselin projektion välinen kulma asteina
-------	---

β_2 on pystyakselin ja kulman β_1 tasoa vastaan kohtisuoralle pystytasolle kuvatun kairan kärkiosan akselin projektion välinen kulma asteina. (SFS 22476-1 2013, 37.)

2.4.1 Korjatut parametrit

CPTu-kairauksessa mitattavat kärkivastus q_c ja vaippakitka f_s ovat korjaamattomia mittaussparametrejä. Jotta CPTu-kairauksista saaduista tuloksista saadaan vertailukelpoisia eri kärkien välillä, on korjattava molempiin parametreihin kohdistuva huokosvedenpaine. Myös geoteknisten parametrien määrittelyssä käytetään korjattuja arvoja. Erityisesti hyvin pehmeissä savimaissa on muodostunut huokosvedenpaine merkittävä. (Liikennevirasto 2015, 23.)

Korjattu kärkivastus q_t

Maassa oleva huokosvedenpaine vaikuttaa kärkeen pienentäen mitattua kärkivastuksen q_c arvoa. Korjattu kärkivastus q_t lasketaan kaavalla 7.

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a) = q_c + u_2 \cdot \left(1 - \frac{A_n}{A_t}\right), \quad (7)$$

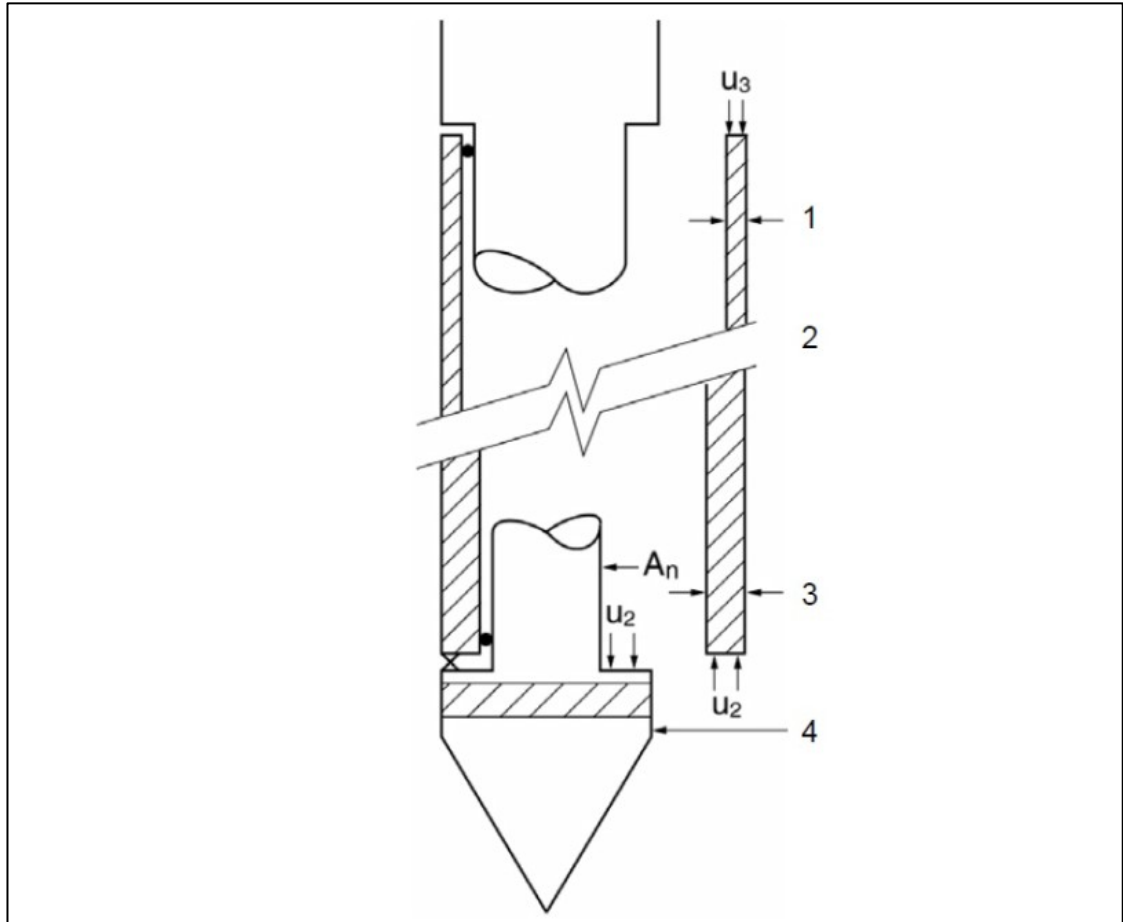
missä	q_c	on mitattu kärkivastus [MPa]
	a	on kärjen nettopinta-alasuhde (kärjen pinta-alakerroin)
	A_t	on kokonaispinta-ala 1000 mm ²
	A_n	on kärkikartioon kohdistuvia voimia välittävän varren poikkipinta-ala suotimen kohdalla [mm ²]. (Liikennevirasto 2015, 24.)

Korjattu vaippakitka f_t

Eurostandardi ohjeistaa vaippakitkan korjaukseen käytettäväksi kaavaa 10. Yleensä mittauksissa mitataan vain huokospaine u_2 kärkikartion ja vaippahylsyn välistä. Huokosvedenpaineen vaikutus mittauksessa on esitetty kuviossa 6. Tällöin huokospaine u_3 voidaan arvioida empiirisellä kaavalla 8.

$$u_3 \approx 0,7 \cdot (u_2 - u_0) + u_0 \approx 0,7 \cdot \Delta u_2 + u_0, \quad (8)$$

missä u_0 on maassa vallitseva huokospaine [MPa]
 u_2 on kittahylsyn ja kärkikartion välistä mitattu huokospaine [MPa]. (SGI 2015, 15.)



KUVIO 6. Huokospaineen vaikutuksen korjaus vaippa- ja kärkivastukseen 1) Vaippahylsyn yläpään poikkipinta-ala 2) Vaippahylsyn pinta-ala 3) Vaippahylsyn alapään poikkipinta-ala 4) Kärkikartion poikkipinta-ala (Liikennevirasto 2015, 24)

Korjattu vaippakitka f_t lasketaan kaavalla 9.

$$f_t = f_s - \frac{u_2 \cdot A_{sb} - u_3 \cdot A_{st}}{A_s}, \quad (9)$$

missä f_s on mitattu vaippakitka [MPa]
 A_s on kittahylsyn pinta-ala [mm²]

A_{sb}	on kitkahylsyn seinämän poikkipinta-ala hylsyn ala- osassa [mm ²]
A_{st}	on kitkahylsyn seinämän poikkipinta-ala hylsyn ylä- osassa [mm ²]
u_2	on kitkahylsyn ja kartion väliltä mitattu huokospaine [MPa]
u_3	on kitkahylsyn yläpuolelta mitattu huokospaine [MPa]. (SFS 22476-1 2013, 38.)

Korjatun vaippakitkan laskemiseen voidaan käyttää myös kaavaa 10, jossa arvoa korjataan pinta-alakertoimien ja huokospainemittauksesta saatujen parametrien avulla.

$$f_t \approx f_s - \left[u \cdot b + 0,3 \cdot \Delta u \cdot \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right], \quad (10)$$

missä	a	on kärkikohtainen pinta-alakerroin
	b	on kärkikohtainen pinta-alakerroin
	u	on mitattu huokospaine [MPa]
	Δu	on huokospainelisäys [MPa]. (Kairausopas VI 2001, 13.)

2.4.2 Lisäparametrit

Normalisoitu nettokärkivastus

Nettokärkivastus on korjatun kärkivastuksen q_t ja maassa vallitsevan pystyjännityksen σ_{vo} erotus. Kairautulosten tulkinnessa käytettävä normalisoitu nettokärkivastus saadaan kaavasta 11.

$$Q_t = \frac{q_n}{\sigma'_{vo}} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}, \quad (11)$$

missä	q_n	on nettokärkivastus [kPa]
	q_t	on korjattu kärkivastus [kPa]
	σ'_{vo}	on tehokas pystysuora jännityslisäys [kPa]. (Kairausopas VI 2001, 12.).

Kitkasuhde R_f

Kitkasuhde R_f määritellään prosentteina korjatun vaippakitkan f_t ja kärkivastuksen q_t väliseksi suhteeksi, samalta mittausvytydeltä mitattuna kaavan 12 mukaisesti.

$$R_f = \frac{f_t}{q_t} \cdot 100\% , \quad (12)$$

missä f_t on korjattu vaippakitka [MPa]
 q_t on korjattu kärkivastus [MPa]. (Kairausopas VI 2001, 13.)

Huokospainesuhde B_q

Huokospainesuhde B_q määritellään sen hetkiselä tasolla syntyvän huokospaineen ja korjatun nettokärkivastuksen väliseksi suhteeksi kaavan 13 mukaisesti.

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{vo}} , \quad (13)$$

missä Δu on huokospaineen muutos
 q_t on korjattu kärkivastus [kPa]
 σ_{vo} on maassa vallitseva pystyjännitys [kPa]. (Kairausopas VI 2001, 12.)

3 CPTu-KAIRAUS

Onnistuneen CPTu-kairauksen saavuttamiseksi, on huomioitava useita kairauksen tulokseen vaikuttavia tekijöitä. Huolellisesti tehdyt esivalmistelut, tarkistukset sekä vaadittavan tarkkuuden mukaan valittu menetelmä ja kairauslaitteisto ovat edellytykset laadultaan hyvän tuloksen saamiseksi.

3.1. Kairauskaluston valinta

Kairauskalustoa valittaessa on tiedettävä tarkasti, mitä kairauksella halutaan saada selville. Alueen maaperä on tutkittava toisia kairausmenetelmiä käyttäen, kuten esimerkiksi painokairauksilla tai puristin-heijarikairauksilla. Maaperäolosuhteet vaikuttavat oleellisesti kärjen kokoluokan valintaan. Kärjen kuormituskapasiteetin kasvaessa mittaustarkkuus heikentyy, jolloin on kiinnitettävä huomiota kärjen valintaan. Koheesiomaiden parametrien määrittämiseen on suositeltavaa käyttää niin sanottua sensitiivistä kärkeä eli niin sanottu ” tonnin kärkeä”, jonka kuormitusalue on 0...10 MPa. Kitkamaille on järkevämpää valita suuremman kuormituskapasiteetin omaava kärki, jolloin kuormituskapasiteetti ei ylitä tai kärki rikkoudu. Mittauskaluston valinnassa on syytä kiinnittää huomiota myös kärjen rakenteen ja kuormituskestävyyden vaikutuksiin mittaustuloksissa. Tästä kerrotaan enemmän kappaleessa 4.2. Mittausdatassa näkyvät epävarmuudet. (Selänpää 2021, 18.–24.)

Kairauskalustoa valittaessa on myös huomioitava, että käytettävällä kalustolla on riittävän suuri puristusvoima. Tangot puristetaan maahan 20 mm/s \pm 5 mm/s vakionopeudella koko kairauksen ajan. Kairauslaitteen on pysyttävä paikallaan kairauksen ajan, joka voidaan tehdä painojen tai ankkurointien avulla. Puristuslaite ei saa liikkua maanpinnalla kairauksen aikana. (SFS 22476-1 2013, 21)

3.2. Käyttöluokat

Vaadittava tarkkuus määräytyy käyttötarkoituksen perusteella. Eurostandardin mukaan maaperäolosuhteista johtuvat vaatimukset jaetaan käyttöluokkiin taulu-

kon 1 mukaisesti. Käyttöluokassa 1 voidaan käyttää ainoastaan CPTu-kairauskoetta. Maa-aines määrittelee maa-ainestyyppin mihin kairaus soveltuu. Tulkinta ja arviointi kertovat mihin varmuuteen saatavat tulkinnot voidaan asettaa. Mitattavien parametrien sallittu vähimmäistarkkuus määrittelee arvon, joka tulisi alittaa. Tämä sallittu vähimmäistarkkuuden arvo sisältää kaikki virhelähteet, kuten sisäisen kitkan, tiedonkeruun, epäkeskisen kuormituksen, lämpötilan aiheuttamat vaikutukset ja mittavirheet (SFS 22476-1 2013). Kärkivastuksen ollessa välillä 0 - 700 kPa sallittu virhe on 35 kPa ja kärkivastuksen ollessa > 700 kPa on sallittu virhe 5 % eli mitattu virhe saa poiketa oikeasta arvosta maksimissaan 5 %. TE2 koetyyppi vastaa CPTu-kairauskoetta ja TE1 CPT-kairauskoetta. Käyttöluokkien maa-ainesten ja tulkinnot soveltuvuudet käyttöluokkaan selitetään taulukossa 2. (Liikennevirasto 2015, 18.) CPTu tulkinnoissa käytettävät kaavat edellyttävät, että kaikki kolme mitattavaa suuretta eli kärkivastus, vaippakitka ja huokospaine on mitattu onnistuneesti.

TAULUKKO 1. Käyttöluokat käyttötarkoituksen perusteella (Liikennevirasto 2015, 18)

Käyttöluokka	Kokeen tyyppi	Mitattava parametri	Sallittu vähimmäistarkkuus ^a	Mittausten välinen enimmäispituus	Käyttö	
					Maa-aines ^b	Tulkinta tai arviointi ^c
1	TE2	Kärkivastus	35 kPa tai 5 %	20 mm	A	G, H
		Vaippakitka	5 kPa tai 10 %			
		Huokospaine	10 kPa tai 2 %			
		Kaltevuuskulma	2°			
		Tunkeutumispyteus	0,1 m tai 1 %			
2	TE1 TE2	Kärkivastus	100 kPa tai 5 %	20 mm	A B C D	G, H* G, H G, H G, H
		Vaippakitka	15 kPa tai 15 %			
		Huokospaine ^d	25 kPa tai 3 %			
		Kaltevuuskulma	2°			
		Tunkeutumispyteus	0,1 m tai 1 %			
3	TE1 TE2	Kärkivastus	200 kPa tai 5 %	50 mm	A B C D	G G, H* G, H G, H
		Vaippakitka	25 kPa tai 15 %			
		Huokospaine ^d	50 kPa tai 5 %			
		Kaltevuuskulma	5°			
		Tunkeutumispyteus	0,2 m tai 2 %			
4	TE1	Kärkivastus	500 kPa tai 5 %	50 mm	A B C D	G* G* G* G*
		Vaippakitka	50 kPa tai 20 %			
		Tunkeutumispyteus	0,2 m tai 2 %			

TAULUKKO 2. Käyttöluokkien selitteet (Liikennevirasto 2015, 18)

Käyttöluokka	Kokeen tyyppi	Mitattava parametri	Sallittu vähimmäistarkkuus ^a	Mittausten välinen enimmäispituus	Käyttö	
					Maa-aines ^b	Tulkinta tai arviointi ^c
^a Mitatun parametrin sallittu vähimmäistarkkuus on kahdesta ilmoitetusta arvosta suurempi. Suhteellinen tarkkuus koskee mitattua arvoa eikä mittausaluetta.						
^b Standardin ISO 14688-2 [1] mukaisesti:						
A homogeenisesti kerrostuneet maat, joissa on erittäin pehmeästä jäykkään vaihtelevaa savea ja siltiä (yleensä $q_c < 3$ MPa)						
B kerrokselliset maat, joissa on pehmeästä jäykkään vaihtelevaa savea (yleensä $q_c \leq 3$ MPa) ja keskitiivistä hiekkaa (yleensä $5 \text{ MPa} \leq q_c < 10 \text{ MPa}$)						
C kerrokselliset maat, joissa on jäykkää savea (yleensä $1,5 \text{ MPa} \leq q_c < 3 \text{ MPa}$) ja hyvin tiivistä hiekkaa (yleensä $q_c > 20 \text{ MPa}$)						
D hyvin jäykästä kovaan vaihteleva savi (yleensä $q_c \geq 3 \text{ MPa}$) ja hyvin tiiviit karkeat maat ($q_c \geq 20 \text{ MPa}$)						
^c G maakerrosprofilointi ja maalajien tunnistaminen, joihin liittyy alhainen epävarmuustaso						
G* viitteellinen maakerrosprofilointi ja maalajien tunnistaminen, joihin liittyy korkea epävarmuustaso						
H geoteknisten parametrien tulkinta, johon liittyy alhainen epävarmuustaso						
H* viitteellinen geoteknisten parametrien tulkinta, johon liittyy korkea epävarmuustaso						
^d Huokospaine voidaan mitata vain TE2-tyypin menetelmällä.						

Tutkimusten perusteella suurikapasiteettisella kärjellä ei ole mahdollisuutta saavuttaa käyttöluokkaa 1, ellei kuormitusaluetta rajata suppeammaksi. (Liikennevirasto 2015, 18.) Suuremman kuormitusalueen käyttöalue aiheuttaa suuremman kalibrointivirheen. (Liikennevirasto 2015, 34.)

3.2.1 Esitarkistukset ja valmistelut

Kun CPTu-kairausta suunnitellaan, on oleellista huomioida, että kairauksen valmistelut vievät enemmän aikaa, kuin itse kairaus. Kairauksesta saatava mittausdata on epäluotettava, jos kairausta ja siihen liittyviä esivalmisteluja ei ole suoritettu asianmukaisella huolellisuudella.

Toimintatarkistukset ja kalibrointi

Ennen kairausta tarkistetaan käytettävä kairauslaitteisto ja sen toiminta. Maastossa tehdään toimintatarkastuksia koko kairauksen ajan. Kärjen kalibroinnin voimassaolo on tarkistettava ennen kairausta. Kalibroinnin voi suorittaa vain kärjen valmistajan valtuuttama taho. Kalibrointitarkistus tehdään, jos tuloksissa näkyy virhettä, joka voi liittyä kalibroinnin menetykseen taipuman tai vaurioitumisen vuoksi. Kairan kärkiosan kalibroinneista kerrotaan tarkemmin standardissa SFS 22476-1. Kalibrointikertoimen virheestä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 4.1. CPTu-kairauksen onnistumisen edellytykset. Taulukossa 3 on esitetty vaaditut tarkistukset ennen kairauksia ja sen aikana. (Kairausopas VI 2001, 26.)

TAULUKKO 3. CPTU-kairauksen tarkistukset (Kairausopas VI 2001, 26)

Tarkistukset	Ajankohta				
	Projektin alussa	Projektin aikana	Kairauksen alussa	Kairauksen jälkeen	6 kk välein
Suodatin	•		•		
Kairatangot	•		•		
Tiivisteet ja raot	•		•		
Kulumiset ja sovitteet	•		•	•	
Kalibrointitarkistus					•
Varmuustoiminnot	•				•
Toimintatarkastus		•	•		
Nollapisteen siirtymä		•	•	•	
Kairatankojen suoruus			•		
Painamisnopeus			•		

Mittauslaitteiden toimintatarkastus

Mittausjärjestelmän mittauslaitteiden toimintatarkistus, joka käsittää kärkipaine-, vaippakitka- ja huokospaineanturien tarkistamisen, tehdään seuraavasti:

- vähintään kuukauden välein tai 40 kairauksen jälkeen helppoissa olosuhteissa
- välittömästi kairauksen jälkeen tai ennen seuraavaa kairausta vaativissa olosuhteissa
- aina kairan vaurioituessa sekä korjauksen ja osien vaihdon jälkeen. (Kairausopas VI 2001, 26.)

Toimintatarkistusten tekeminen on esitelty tarkemmin Kairausopas VI 2001:ssa

Kairatangot

Kaikki kairauksessa käytettävät kairatangot on tarkistettava suoruuden osalta ja niiden on täytettävä toleranssivaatimukset. Erityisesti viiden alimman kairatangon suoruus on tärkeätä tarkistaa, koska niillä on tarkempi toleranssivaatimus 0,5 mm / 1 m. Tarkistus on tehtävä jokaisen kairauspisteen jälkeen ja varsinkin, jos kairaus on päättynyt kovaan maakerrokseen tai kairaus on tehty kivisessä maassa. (Kairausopas VI 2001, 26.)

Kärkiosan ja kitkahylsyn kulumisen

Kärkiosan ja kitkahylsyn kulumisen sekä kartiokärjen, suodattimen ja kitkahylsyn halkaisijoiden välinen suhde on tarkistettava vaatimusten mukaiseksi jokaisen kairauspisteen jälkeen ja erityisesti silloin, jos kairaus on tehty kivisessä maassa

tai kairaus on päättynyt kovaan ja kaltevaan pintaan. Kärkikartion mitat ja toleranssit on esitetty kuviossa 2 aiemmin. Kuvassa 1 on esitetty kärkikartio, jossa normaalia kulumista. Kärkien valmistajat tarjoavat apuvälineitä geometrian ja kulumisen mittaamiseen. CPTu-kairauksella on vaativammat toleranssit hienorakeisessa maassa, kuin CPT-kairauksella hiekkamaassa. (Kairausopas VI 2001, 27.) Käyttöluokka 1 voidaan saavuttaa vain tyypin TE2 -menetelmällä.



KUVA 1. Kärkikartiossa normaalia kulumisjälkeä 2021

Tiivisteiden kunto

Kaikkien kairakärjen osien väliset o-renkaiden ja rakotiivisteiden kunto tarkistetaan aina ennen kairauksen aloittamista. Tiivisteet ja raot puhdistetaan maa-aineksesta ja kuluneet tiivisteet vaihdetaan. Kuvassa 2 on kärkiä valmisteltavana ja tarkistettavana. Tiivisteet on vaihdettava uusiin, jos kairauksella tavoitellaan käyttöluokkaa 1. (Kairausopas VI 2001, 27.)



KUVA 2. CPTu-kärkiä valmisteltavana ja tarkistettavana kairausta varten 2021

Suodatin

Suodatin mittaa huokosvedenpainetta kairan kärkiosassa. Suodattimen sijainti on estetty kuviossa 4. Suodattimen osalta tehtävät tarkistukset ja valmistelut ennen kairausta ovat seuraavat:

- Arvioidaan huokospainekairauksen määrä ja varataan mukaan yksi suodatin kairauspistettä kohti.
- Varmistetaan suodattimen oikea ja helppo asennettavuus käytettävään kärkeen.
- Tarkistetaan suodattimen oikea halkaisija käytettävään kärkeen.
- Asennuksen jälkeen suodattimen tulee olla helposti sormin kierrettävissä, ei kuitenkaan liian löysästi. Poistetaan asennusvaiheessa syntyneet särmit sorvilla, viilalla ym. vastaavalla välineellä. (Kairausopas VI 2001, 27.)

Suodattimen esitarkistus tehdään kuivana ja jos suodattimet eivät täytä vaatimuksia niitä ei käytetä kairauksessa. (Kairausopas VI 2001, 27.) Kuvassa 3 on vasemmalla huokossuodatin sintratusta pronssista ja oikealla rakosuodatin.

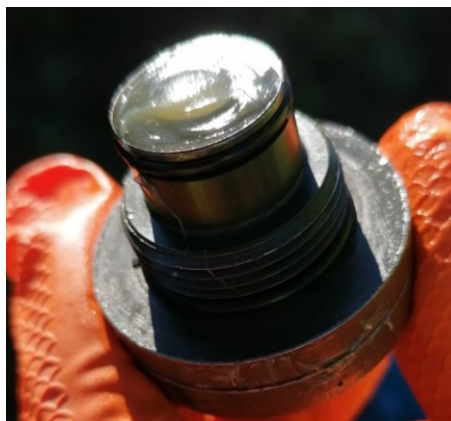


KUVA 3. Huokossuodatin ja rakosuodatin (Sandven 2010, 11)

Suodattimen kyllästäminen ja nesteiden käsittely

Kärkivastukseen ja vaippakitkaan arvoon vaikuttaa maassa vallitseva huokospaine, joka otettava huomioon. Huokospainetta mitattaessa on käytettävän suodattimen nestekyllästys sekä kärjen asennus ovat tärkeimmät esivalmistelun työvaiheet, jotta voidaan onnistua CPTu-kairauksessa. Huolellisuus on oleellinen tekijä varastoinnissa, ilmattomien nesteiden säilytyksessä sekä kuljetuksessa. Suodattimen kyllästämistapaan vaikuttaa, minkälainen suodatin on kyseessä sekä minkä tyyppisessä maassa kairaus tehdään. Myös ympäristön olosuhteet vaikuttavat nesteen valintaan. Kun käytetään huokossuodatinta, on käytettynä nesteenä yleensä glyseriini tai vesi, jossa ei ole ilmakuplia. Glyseriiniä käytetään,

kun kairataan maissa, jossa esiintyy negatiivista huokospainetta kuten tiiviissä hiekka- ja silttikerroksessa, ylikonsolidoituneessa savessa, ei täysin kyllästyneessä maassa tai kun kairataan kuivakuorikerroksen läpi ilman alkukairausta. Rakosuodattimen kyllästyksessä käytetään vaseliinia. Rakosuodattimen kärkikappaleen huokostiehyet täytetään vaseliinilla niin, että vaseliini pursuaa rakosuodattimen alta niin ettei ilmakuplia jää suodattimeen kuten kuvissa 4, 5 ja 6 on esitetty. (Kairauspas VI 2001, 28.)



KUVA 4 ja 5. Rakosuodattimen kyllästäminen vaseliinilla 2021

Vaseliinin etu on, että se ei jäädy pakkasessa, mutta haittana on sen viskositeetti, koska jäykkyytensä vuoksi sillä ei saavuteta kairauksessa yhtä tarkkaa mittausdataa kuin glyseriinillä tai vedellä. (Kairauspas VI 2001, 28.) Rakosuodattimella varustettua kärkeä käytettäessä ei esiinny samoja ongelmia kuin huokossuodattimien esikyllästämisenä, mutta rasvaa painettaessa rakoon ja kärjen onteloihin tulee olla varovainen. Rasva ei saa sisältää ilmakuplia, ja se tulee puristaa uraan hallitusti rasvapumpulla tai vastaavalla. (Sandven 2010, 11.)



KUVA 6. Ilmakuplattoman öljyn avulla puristuu ylimääräinen vaseliini pois 2021

Suodattimen asennus maastossa on hankalaa ja vaatii kärsivällisyyttä. Erityisesti huokossuodattimen käytössä, jonka kokoaminen tapahtuu veden alla. Suodattimen kokoaminen veden alla estää ilman pääsyn järjestelmään. (Kairausopas 2001, 29.) Huokossuodattimen kyllästämiseen on apuvälineitä, kuten kuvassa 7 näkyvä alipainepumppu. (Liikennevirasto 2015, 35)



KUVA 7. Huokossuodattimen kyllästämisen alipaineen avulla (Liikennevirasto 2015, 35)

Glyseriiniä ja vaseliinia käytettäessä kyllästyksessä on pyyhittävä ylimääräinen aine pois kärkikartion ja kitkahylsyn pinnoilta, jottei liukkaus vaikuta mittaukseen. (Kairausopas VI 2001, 28.) Suodattimen kyllästyksen jälkeen on suodatin osa suojattava kumikalvolla, jottei kyllästystä menetetä kairauksen alussa (SFS 22476-1 2013, 24.). Rakosuodattimen ja huokossuodattimen kyllästyksen tekeminen ja vaatimukset on esitetty tarkemmin Kairausopas VI 2001:ssä ja standardissa SFS 22476-1.

3.3. CPTu-kairauksen työvaiheet

3.3.1 Alkuvalmistelut

Kairausetäisyys

CPTU-kairauksen kairareian etäisyys lähimpiin kaira- ja näytteenottoreikiin on oltava vähintään 2 metriä. Ilma- ja vesihuuhtelulla tehtyihin kairausreikiin etäisyys oltava vähintään 5 metriä. Lisäksi kairauksen sijainnissa on huomioitava muu mahdollinen pohjamaata häiritsevä toiminta, kuten syvästabilointi tai porapaalu- tus. (Selänpää 2021, 21.) Kuvassa 8 raskas tela-alustainen kairausvaunu GM 200 GT savikolla Malmilla 2021.



KUVA 8. CPTu kairaus Malmilla syksyllä 2021

Alkukairaus

Alkukairaus on tehtävä aina, jos läpäistävänä on kuivakuorikerros tai täytemaakerros. Alkukairaus tehdään kuivakuori- tai täyterokkeen läpi menetelmällä, joka häiritsee maata mahdollisimman vähän. Kuvassa 9 on alkukairaus tehty kierrekairalla. Alkukairauksen tekemättä jättäminen voi aiheuttaa kairan kärjen huokostilan nesteen tai rasvan valumisen maakerrokseen. Tämä kyllästyksen menetys aiheuttaa epätarkkuutta syvemmällä mitatuissa huokospaineen arvoissa, ja

täten myös vaikuttaa kärkivastuksen ja vaippavastuksen arvoihin. Kairattaessa paksuissa täytemaakerroksissa, on reiän putkittaminen suositeltavaa. Lopuksi kairattu reikä täytetään vedellä, ellei pohjavesi ole sitä jo täyttänyt. Huomioitava on veden oikea lämpötila. (Kairausopas VI 2001, 28.)



KUVA 9. Alkukairaus kierrekairalla 2021

Puristinlaitteiston tarkistus

Puristinlaitteisto tarkistetaan ja varmistetaan, että kaikki laitteiston osat toimivat oikein. Maston suoruus tarkistetaan aina ennen kairauksen aloitusta. Kairatankojen poikkeama pystysuorasta olisi oltava alle 2 astetta. (Liikennevirasto 2015, 16.)

Suodattimen ja kärjen asennus sekä nestetäyttö

Oleellisin vaihe CPTu-kairauksen onnistumiseksi on suodattimen kyllästys ja kärjen asennus. Huokospaineen mittausjärjestelmä on kyllästettävä täysin ennen kairauskokeen aloitusta, ja sen on säilyttävä kyllästettynä niin kauan kun kunnes kairan kärkiosa yltää pohjaveden pintaan tai vedellä kyllästyneeseen maahan.

Kyllästyksen menetyksen ehkäisemiseksi on hyvä suojata suodatinosa kumikalvolla, joka rikkoutuu, kun kairan kärkiosa painuu maahan. (SFS 22476-1 2013, 33.)

Lämpötilan taseaus

Lämpötilan tasauksella pyritään kärjen lämpötila saattamaan mahdollisimman lähelle maanlämpötilaa. Lämpötilan taseaus voidaan tehdä upottamalla kärki alkukairauksella tehtyyn vedellä täytettyyn reikään silloin, kun olosuhteet sen sallivat. Kairattaessa lähellä maanpintaa keskikesällä ja -talvella tätä menetelmää ei voi käyttää. Lämpötila taseaus tehdään, jotta lämpötilariippuvaisten mittausanturien lämpötilan aiheuttama virhe olisi mahdollisimman pieni. Kairan kärkiosien kuljetuksessa käytetään matkajääkaappia, joka on säädetty sopivaan lämpötilaan. Kärjen lämpötilantaseaus on tehtävä ennen nolla-arvojen lukemista. (Liikennevirasto 2015, 16.)

Alkunollalukemien luku

Alkunollalukemat luetaan, kun lämpötila on tasaantunut maanlämpötilaan. Kärkeä ei saa kuormittaa alkunollalukemien lukemisen aikana. Jokaiselle mitattavalle parametrille kärkivastukselle, vaippakitkalle ja huokospaineelle luetaan alkunollalukemat, jotka merkitään kairauksesta tehtävään mittauspöytäkirjaan. Näiden alkunollalukemien lukeminen on erittäin tärkeää, koska kairauksen käyttöluokka sekä tuloksen laatu määräytyy luettujen alk- ja loppunollalukemien perusteella. (Liikennevirasto 2015, 16.)

3.3.2 Kairauksen suoritus

Kairaus

Kairaus aloitetaan välittömästi lämpötilatasauksen ja alkunollalukemien luvun jälkeen. Kärki lasketaan maanpinnan tasoon tai alkukairausreiän pohjalle. Kuvassa 10 nähdään CPTu-kairauksen aloitus pohjavedenpinnan tasolta. Vedellä täytetty alkureikä estää ilman pääsy suodattimen huokosiin käytettäessä huokossuodattinta kairauksessa. Savikoilla CPTu-kairaus on ohjeistettu aloitettavaksi pohjavedenpinnan tasolta tai hieman sen alapuolelta. (Selänpää 2021, 22.)



KUVA 10. CPTu-kairauksen aloitus pohjavedenpinnantasolta 2021

Kärkeä puristetaan pystysuoraan maahan vakionopeudella 20 mm/s (± 5 mm/s). Puristusnopeus tarkistetaan jokaisen kairauksen alussa ja nopeutta seurataan kairauksen aikana. Tunkeutumissyvyyttä mitataan manuaalisesti kairauksen aikana ja kairauksen aikana tehdyt huomiot kirjataan ylös. Kairan maahan puristamisen aikana seurataan kärkivastus-, vaippakitka- ja huokospaine antureiden arvoja, millä voidaan todeta, että laitteisto toimii oikein. Kairaus pysäytetään ainoastaan tankojen lisäämisen vuoksi. Samassa yhteydessä voidaan tehdä pidempi pysäytys, jolloin mitataan kairauksen aikana kehittyneen huokospaineen tasaantuminen ajan suhteen. Kairaustulosten myöhempää tulkintaa varten on tiedettävä maassa vallitseva huokospainetila. (Kairausopas VI 2001, 34.).

3.3.3 Kairauksen lopetus

Kairaus päätetään, kun haluttu määräsyvyys on saavutettu, tai jos kairan kärjen enimmäiskuormituskapasiteetti saavutetaan. Kärjen kuormituskapasiteetti on kärkikohtainen, eikä kärjen kuormituskapasiteettia saa ylittää vaan silloin keskeytetään kairaus.

Loppunollalukemien luku

Kärjen ylös nostamisen jälkeen luetaan välittömästi loppunollalukemat, niin ettei kärjen lämpötila ehdi muuttua. Loppunollalukemien luku on välttämätöntä, jotta kairauksen onnistumista voidaan arvioida. Aiemmin luettu alkunollalukema asettaa nollatason mihin verrataan kuormituksesta aiheutuvaa jännitemuutosta voimaa mittavassa anturissa. Kärjen on riiputtava vapaasti ja kärjen kevyt puhdistus

maa-aineksesta on sallittu ennen loppunollalukemien lukemista, jotta nollalukemat vastaavat kuormittamatonta tilaa. Kairattaessa hienorakeisissa maissa voi maa-aines tukkia suodatinta, joka näkyy loppunollalukemissa huokosylipaineena. Kärkeen jäänyt maa-aines kärkeä ylös nostettaessa voi myös aiheuttaa alipaineen, joka ei ehdi tasaantumaan. (Liikennevirasto 2015, 25)

Tarkistukset ja mittauspöytäkirja

Mahdolliset kairauksessa tulleet vauriot sekä kulumat tarkistetaan ja merkitään mittauspöytäkirjaan. Kärkikappale puretaan ja puhdistetaan asianmukaisesti. Kairauspisteen koordinaatit tai pisteen tiedot merkitään mittauspöytäkirjaan. Mittausdata tarkistetaan ylikuormituksen osalta. (Liikennevirasto 2015, 17.)

Saadut tulokset

Sähköisesti toimitettavassa aineistossa tulee esittää käyttöluokan mukaiset parametrit. Lisäksi on ilmoitettava syvyys ja kairauksen syöttönopeus. Infra-formaatissa esitetään seuraavat asiat:

- alku- ja loppunollalukemat kPa
- kärjen sallittu kuormitusväli / tyyppi
- kairauksen toteutunut käyttöluokka
- kärjen pinta-alakerroin a sekä b, jos erisuuri kuin 0
- käytetty suodatintyyppi

Kairauksen aikana mahdolliset dissipaatiokokeet lisätään koetuloksen kommenttikenttiin. (Selänpää 2021, 29.)

4 VIRHEET JA EPÄVARMUUDET

CPTu-kairauksen onnistumiseen vaikuttaa monta eri tekijää. Yksi suurimmista ongelmista on, että kairauksen tekemiseen ei suhtauduta kairausmenetelmän vaatimalla tarkkuudella. CPTu-kairausta tehdessä Kairausopas VI 2001:n tai standardin SFS 22476-1 ohjeiden ja vaatimusten noudattamatta jättäminen voi estää kairauksen suorittamisen onnistuneesti.

4.1. CPTu -kairauksen onnistumisen edellytykset

CPTu-kairauksessa muita epävarmuuden lähteitä ovat muun muassa ympäristön lämpötilan ja hetkellisen lämpötilan muutoksen aiheuttamat vaikutukset, väärät kalibrointiparametrit, kyllästyksen puute tai sen menetys, kuormituksen puutteellinen siirtyminen, tiedonmittausjärjestelmän virhe, kartiokärjen mittapoikkeamat, nollalukemien poikkeama, mekaaniset viat ja kärjen osien likaisuus. Vaikka CPTu-kairaus toteutettaisiin standardin SFS 22476-1 mukaisesti ja Kairausopas VI 2001:n ohjeita noudattaen voi tuloksissa olla epävarmuuksia, jotka johtuvat kairauksen aikaisesta lämpötilavaikutuksesta kairan kärkiosa. (SFS 22476-1 2013, 40.)

Lämpötilavirheet

Kairan kärjessä olevat mittausanturit ovat venymäliuska-antureita, joiden toiminta perustuu sähkönjohtavuuteen, joka on lämpötilariippuvainen. Vaikka kärjissä on sisäänrakennettu lämpötilankorjaus, sekään ei ole täysin luotettava. Tämän vuoksi on ehdottoman tärkeää, että nollalukemat luetaan kairan kärjen ollessa mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa. Maan lämpötila Etelä- Suomessa välillä 6–8 astetta ja Pohjois- Suomessa 2–4 astetta. Lämpötilavirheet aiheutuvat yleensä joko siitä, että kairan kärjen lämpötila ei vastaa ympäristön eli maaperän lämpötilaa tai kitkan aiheuttamasta kärjen lämpenemisestä. Ympäristön lämpötilavaikutusta voi pienentää niin, että saattaa kärjen lämpötilan mahdollisimman lähelle maaperän lämpötilaa. Lisäksi kärkien valmistajilla on tarjolla esimerkiksi matkajääkaappeja, missä voidaan lämpötila asettaa vastaamaan maassa olevaa lämpötilaa. (Liikennevirasto 2015, 26.) Kairattaessa tiiviissä hiekkakerroksessa,

kairaus aiheuttaa kitkaa, jonka vuoksi kairan kärki lämpenee. Näitä hetkellisen lämpenemisen vaikutuksia ei voi pienentää etukäteen mutta niitä voi vähentää erityislaitteilla -ja menettelyillä, joista on kerrottu tarkemmin standardissa SFS 22476–1. (SFS 22476-1 2013, 40.)

Nollalukemavirheet

Nollalukemat luetaan, kun kairan kärki on kuormittamattomassa tilassa sekä alku- että loppunollalukemien lukemisen aikana. CPTu-kairauksen onnistumista voidaan jo heti kairauksen jälkeen arvioida nollalukemien perusteella. Usein nollalukemat tallentuvat millivoltteina kairaustiedostoon ja ne muutetaan kalibrointikertoimen avulla Pascaleiksi, minkä vuoksi olisi myös ilmoitettava raakadatan yhteydessä. Kun mitattujen kärki- ja vaippavastuksen sekä huokospaineen nollalukema-arvot ovat lähellä toisiaan eli erotuksen ollessa mahdollisimman pieni voidaan tehdä tulkintoja kairauksen onnistumisesta. (Liikennevirasto 2015, 26.)

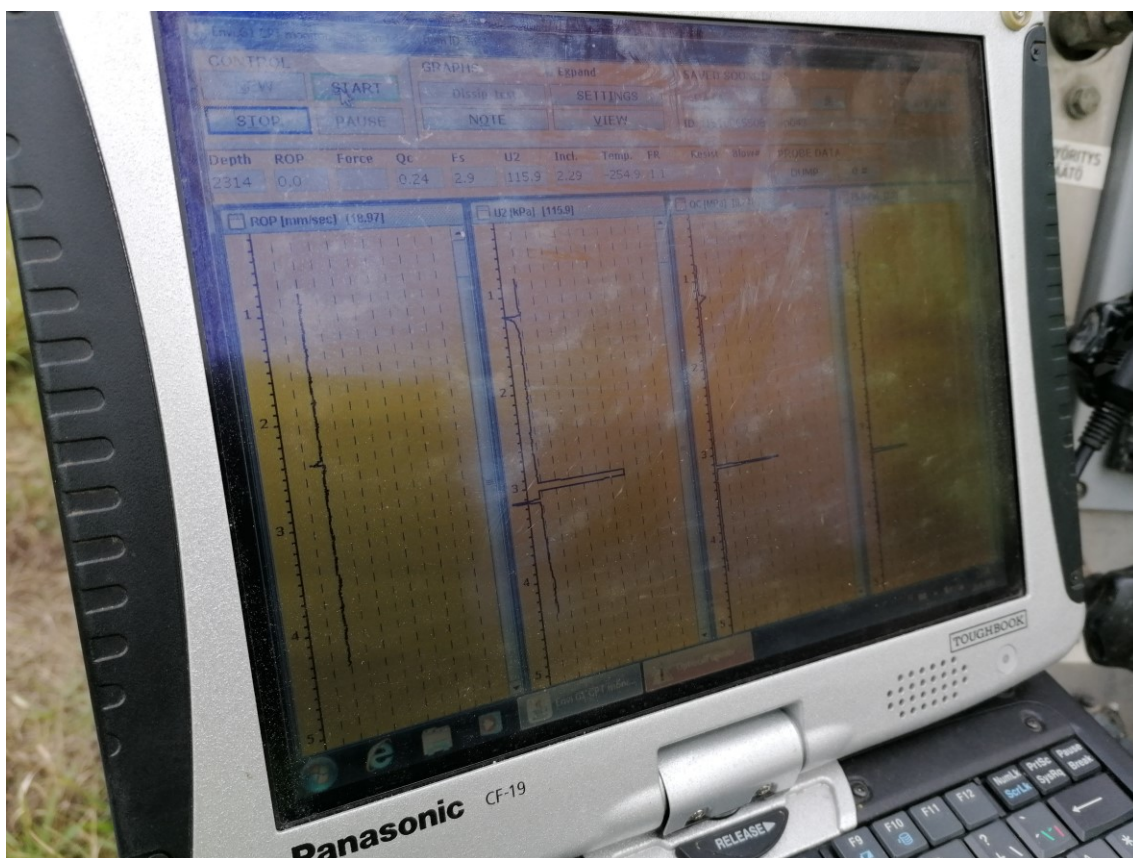
Poikkeama nollalukemissa voi aiheutua seuraavista tekijöistä:

- anturin antaman ulostulon vakaudesta
- lämpötilan muutoksesta testin aikana
- maa-aineksen tunkeutumisesta kärkeen
- O-renkaiden aiheuttamasta kitkasta
- kosteuden tunkeutumisesta kärkeen
- ylikuormituksesta ja sen aiheuttamasta kalibroinnin menetyksestä
- kärjen taipumisesta tai paikallisesta myötäämisestä. (Liikennevirasto 2015, 26.)

Kairauksessa luettava nollalukeman arvo on muuttuva suure ja se määritellään ennen jokaista kairausta sekä välittömästi kairauksen jälkeen. Alku- ja loppunollalukemien poikkeaman suuruutta voidaan pienentää huolellisesti tehdyillä alkuvalmisteluilla sekä noudattamalla ohjeita työn suorittamisessa. (Liikennevirasto 2015, 26.) Alku- ja loppunollalukemat luetaan kaikille mitattaville suureille ja pienimmän sallitun tarkkuuden arvo tulee näiden lukemien erotuksesta. Ja kuten aiemmin on jo todettu kappaleessa 3.2 Käyttöluokat, että tämä sallittu vähimmäistarkkuuden arvo sisältää kaikki virhelähteet, kuten sisäisen kitkan, tiedonkeuruun, epäkeskisen kuormituksen, lämpötilan aiheuttamat vaikutukset ja mittavirheet. (SFS 22476-1 2013, 22.)

4.2. Mittausdatassa näkyvät epävarmuudet

CPTu kairauksen aikana voidaan kairausta seurata reaaliajassa. Jo kairausta tehdessä voidaan arvioida mittausdatasta kairausta siten, että huokospaineanturin mittaaman arvon muuttuessa muutos näkyy myös kärkivastus- ja vaippavastusta mittaavien antureiden arvoissa, joka näkyy kuvassa 11. Jos huokospaineessa näkyy muutos, joka ei näy muissa mitattavissa parametreissa saattaa mittauksessa olla virhettä. Yleisimpiä mittauksessa esiintyviä epävarmuuksia ja niiden aiheuttajia esitellään seuraavaksi.



KUVA 11. CPTu-kairauksen reaaliaikaisessa mittausdatassa näkyvät muutokset 2021

Mittauksen resoluution vaikutus mittaustuloksiin

Mittausantureiden jännitys-venymäliuskojen antama jännitesignaali on analogista ja se on muutettava digitaaliseen muotoon. CPTu kärjen jännitteen vaihteluväli määräytyy kuormituskestävyyden ja kärjen rakenteen perusteella. Resoluutiolla tarkoitetaan, sitä kuinka moneen jännitetasoon kuormitusalue on jaettu.

Jos resoluutio on karkea, eli toisin sanoen huonompi, niin pienin havaittava muutostarvo kasvaa. Tämä aiheuttaa suuremman mittausvirheen. (Liikennevirasto 2015, 42.)

Negatiivinen vaippavastus

Negatiivisia arvoja vaippavastuksen mitatuissa arvoissa saattaa esiintyä, kun ollaan hienojakoisissa ja pehmeissä maakerroksissa. Nämä arvot eivät ole todellisia arvoja vaan virheitä, joita voivat aiheuttaa seuraavat tekijät:

- Nollatason muuttuminen negatiiviseksi alkunollalukemien lukemisen jälkeen, joka aiheutuu lämpötilan muutoksesta kärjessä.
- Vaippahylsyyn kohdistuva epätasainen rasitus, joka on riippuvainen venymäliuskojen määrästä.
- Huokosvedenpaine ero vaippahylsyn ylä- ja alapään välillä.
- Väärän korjauskertoimen käyttö vaippakitkan korjauksessa.
- Hyvin pienten vastusten huono mittaustarkkuus. (Liikennevirasto 2015, 30.)

Usein negatiivisia vaippavastuksen arvoja esiintyy savisissa maissa missä kärkivastus on pieni ja huokosvedenpaine suuri. Mikäli negatiivisia arvoja esiintyy vaippavastuksen mittauksessa, on niiden syy selvitettävä. Kun negatiivisten arvojen aiheuttaja tiedetään, voidaan mittausarvoja korjata. (Liikennevirasto 2015, 30.)

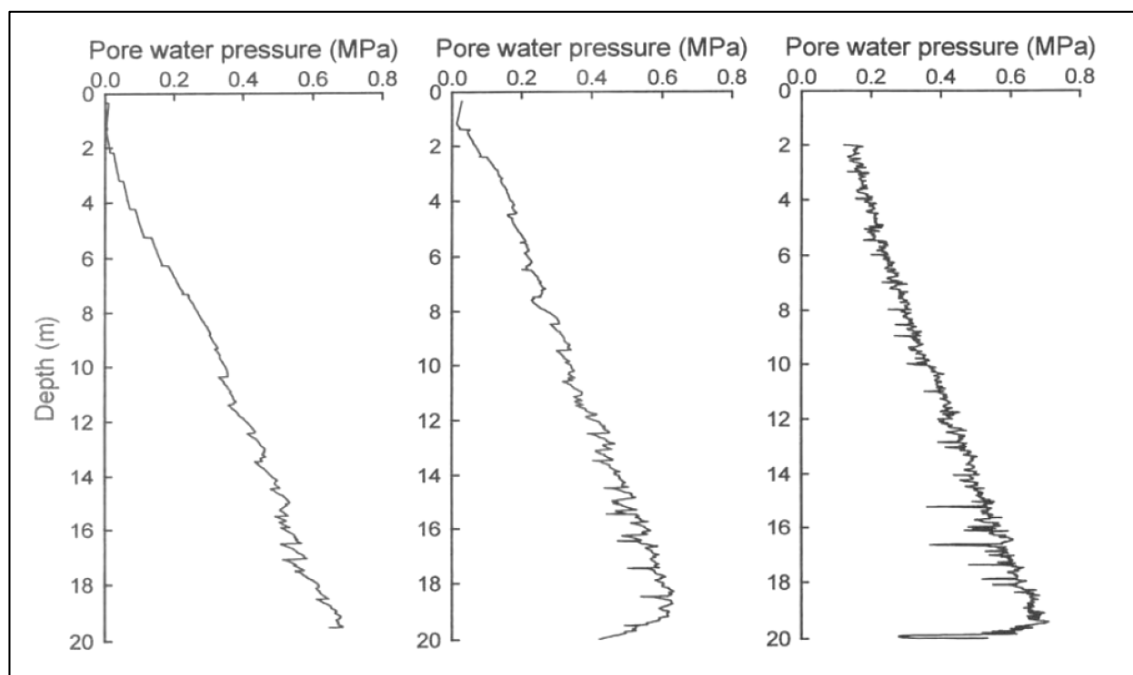
Negatiivinen huokospaine

Negatiivinen huokospaine ei välttämättä ole virhe. Se voi aiheutua maan pyrkimyksestä laajentua, kun kärkeä painetaan maahan. Tätä laajenemista tapahtuu lähinnä tiiviissä hiekkamaissa ja siltissä missä laajenemisilmiö aiheuttaa negatiivisen huokospaineen mittausdatassa. Negatiivinen huokospaine voi myös aiheuttaa kyllästyksen menetyksen kairattaessa kuivakuoren läpi ilman alkukairauksista, mikä myös aiheuttaa virhettä mittaukseen. (Liikennevirasto 2015, 38.)

Kyllästyksen menetys/huono kyllästys

Kyllästyksen menetys tai huono kyllästys voi näkyä mittausdatassa myös jo kairauksen aikana. Jotta huokosvedenpaine voidaan mitata onnistuneesti, on suo-

dattimen ja paineanturin välinen tila sekä itse suodatin kyllästettävä onnistuneesti. Kyllästymisen onnistuminen on nähtävissä mittausdatasta. Huonosti onnistunut kyllästys näkyy hitaana reagoitina mittausdatassa. Hyvin onnistunut kyllästys taas reagoi nopeasti muutokseen ja näkyy mittausdatassa korkearesoluutioisena kuvaajana. Kuviossa 7 näkyy esimerkit kyllästyksen onnistumisesta. (Lunne et al. 1997, 30.)



KUVIO 7. Kyllästämisen onnistuminen vasemmalta oikealle: huono, keskimääräinen ja hyvin onnistunut (Lunne et al. 1997, 30)

Pysähdyksien epäjatkuvuudet

Tankojen lisäys kairauksen aikana aiheuttaa epäjatkuvuutta mittausdatassa, tasan väliajoin esiintyvinä piikkeinä. Nämä epäjatkuvuudet voidaan poistaa mittausdatasta, jolloin maalajiluokitus kuvaajasta tulee selkeämpi.

Maan kerroksellisuus

On osoitettu, että kärkivastuksen arvoon vaikuttaa sekä kärjen alapuolella ja yläpuolella oleva maa-aines. Voidaan siis todeta, että kärki aistii tulevan maa-aineksen ominaisuuksien jo ennen siihen tunkeutumista ja toisaalta myös sen jälkeenkin. Suurin etäisyys milloin kärki alkaa aistia uuden maa-aineksen on riippuvainen maa-aineksen jäykkyydestä. Pehmeissä maa-aineksissa paksuuden pitää olla

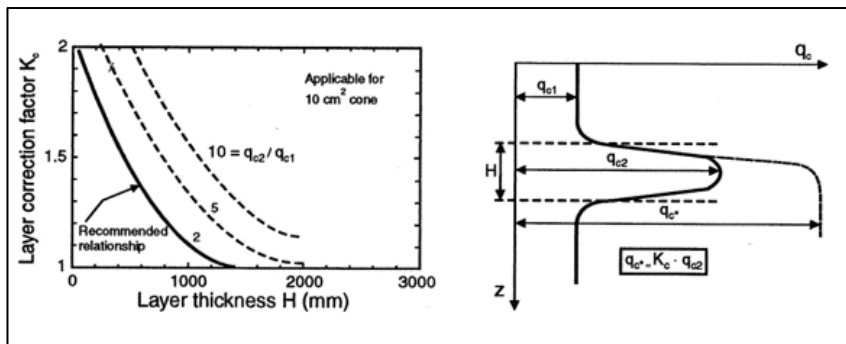
100 mm ja jäykissä maa-aineksissa 750 mm, jotta kärkivastuksen arvo vastaa täyttä arvoaan. (Lunne et al. 1997, 46.)

Yksinkertaiseen elastisuuteen perustuen Vreugdenhil et. al (1994) ehdotti miten korjata kärkivastuksen arvoa ohuissa kerroksissa. Kairauksessa kerrosten suhteellinen jäykkyys heijastuu kärkivastuksen muutoksena ympäröivästä pehmeästä maaperästä q_{c1} jäykässä maakerroksessa q_{c2} kärkivastukseen. Kärkivastuksen arvoa voidaan korjata kaavan 14 mukaisesti. (Lunne et al. 1997, 47.)

$$q_c^* = K_c \cdot q_{c2} \quad (14)$$

missä K_c on korjauskerroin kärkivastukselle kerroksen paksuuden funktiona, esitetty kuviossa 8. (Lunne et al. 1997, 47.)

Kärkivastusta suositellaan korjattavaksi konservatiivisemmän käyrän mukaisesti, joka osoitettu kuviossa 8. Kärkivastussuhde on silloin $q_{c2}/q_{c1} = 2$.



KUVIO 8. Suositeltu suhde $q_{c2}/q_{c1} = 2$ ja ehdotettu korjaus kärkivastuksen arvolle ohuissa hiekkakerroksissa. (Lunne et al. 1997, 47.)

Kärkivastuksen korjauskerroin voidaan laskea tällöin kaavan 15 mukaisesti.

$$K_c = 0,5 \cdot \left(\frac{H}{1000} - 1,45 \right)^2 + 1,0 \quad (15)$$

missä H on kerroksen paksuus [mm]
 q_{c2} on kärkivastus jäykässä kerroksessa
 q_{c1} on kärkivastus ympäröivässä pehmeämmässä kerroksessa. (Lunne et al. 1997, 47.)

Usein ohut hiekkakerros savikerroksien välissä luokitellaan silttiseksi hiekaksi maan käyttäytymiskaaviossa SBT (Soil Behavior Type), josta on kerrottu enemmän kappaleessa 5.3. Maaperän profilointi ja maaperä tyyppi. Tämä voi antaa virheellisen tulkinnan kerroksen pienempänä vedenjohtavuuskykynä. Nykyään tulkinnassa on myös apuna CPTu-kairauskokeen huokospainemittaus, jonka avulla tulkintaa vedenjohtavuuskyvystä voidaan tehdä. (Liikennevirasto 2015, 47.)

Kalibrointi

Kalibrointikertoimen virheet liittyvät voima-antureihin ja voima-antureiden mitaustuloksen muuttamisen kalibrointikertoimen avulla paineeksi. (Liikennevirasto 2015, 31.) Kyseiset virheet ovat seuraavat:

- Kalibroinnin virhe
- Nollakuormituksen virhe

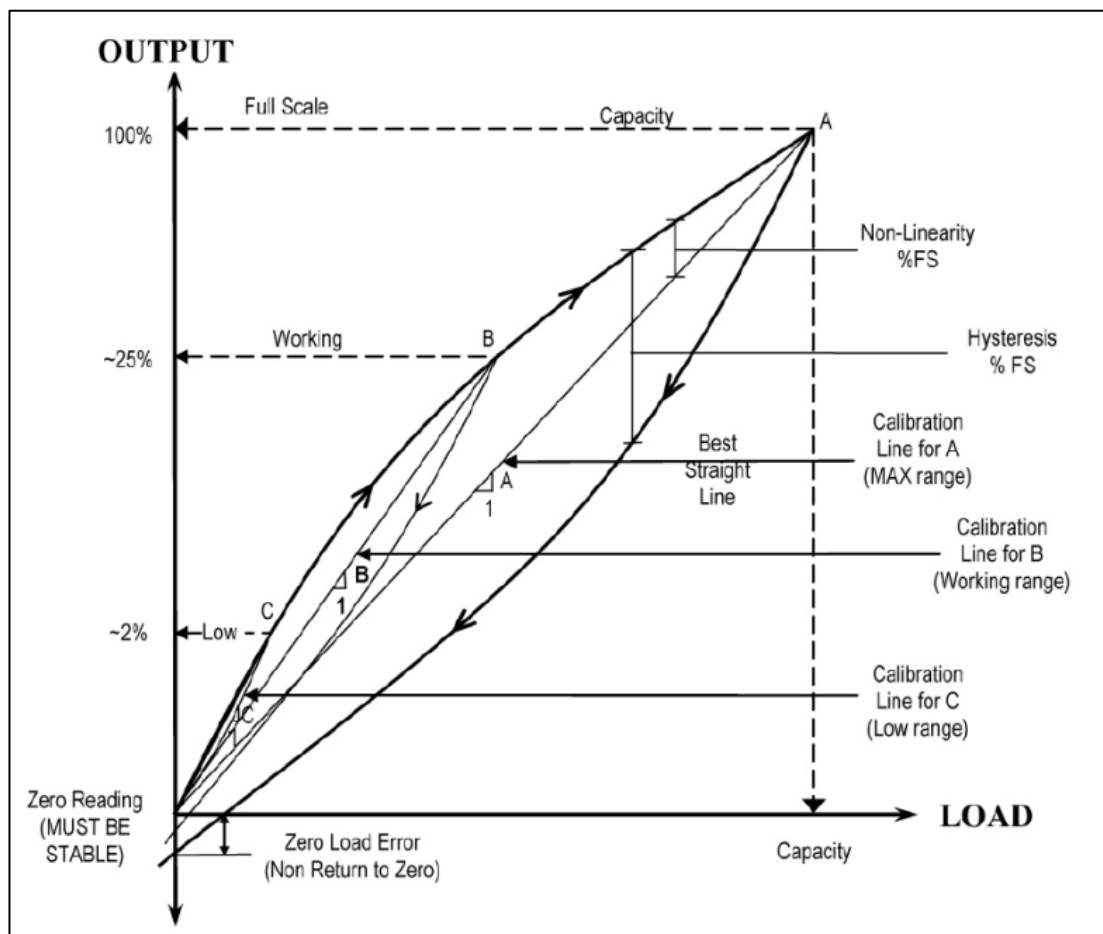
Näitä kahta virhettä havainnollistetaan kuviossa 9, missä on esitetty kalibrointisellin kuormitus - palautus sykli. (Liikennevirasto 2015, 31.)

Kalibrointikertoimen virheeseen vaikuttavat tutkimusten mukaa maa-aineksen tunkeutuminen liitoksiin. Liitoksiin tunkeutuva maa-aines aiheuttaa kuormitusta muuhun osaan kärjessä kuin siihen osaan, mihin voima-anturi on kiinnitetty. Tätä kalibrointi virhettä voidaan pienentää säännöllisillä tarkistuksilla ja puhdistuksilla. Myös kalibrointiväli olisi hyvä pitää mahdollisimman lyhyenä. Kalibrointikerrointa määritettäessä on otettava huomioon toistettavuus, hystereesi ja epälineaarisuus. Kalibrointikertoimen määrittäminen tulisi tehdä mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa, jotta kalibrointikerroin vastaa mahdollisimman hyvin tilannetta maaperässä kairauksen aikana . (Liikennevirasto 2015, 31.)

Kalibrointikäyrän epälineaarisuus aiheuttaa poikkeamaa on kuitenkin mahdollista pienentää rajaamalla kärjen käyttöalue tavalliselle työskentelyalueelle. Toisin sanoen, jos kärjen tyypillinen maksimi kuormitus on 40 MPa mutta vastusten arvot ovat pääosin 0–20 MPa välillä voidaan käyttää kalibrointikerrointa, joka on määritetty välille 0–20 MPa, joka on esitetty kuviossa 9 pisteessä B. Eikä siis käytetä

kalibrointikerrointa A, joka koko kapasiteetti alueen kalibrointikäyrä, vaikka käytössä olevan kärjen kuormituskapasiteetti olisikin 100 MPa. Poikkeaman suuruus pienenee tällöin selvästi, kuten kuviossa 9 nähdään. (Liikennevirasto 2015, 31.)

Kalibroinnista tehdään tallenne, jonka avulla voidaan seurata poikkeamien suuruutta. Näiden poikkeamien suuruutta voidaan seurata alkunollalukemien avulla. Alkunollalukemien poikkeama pystytään laskemaan, kun edellisten kalibrointikerrojen alkunollalukemat ovat tallennettu. Käyttöään aikana tapahtuvat vaihtelut, pienet karkiosassa tapahtuvat muutokset toiminnassa ja mitoissa, jotka aiheuttavat poikkeamia alkunollalukemiin. Alkunollalukemien poikkeamien suurentuessa on tehtävä kärjelle perusteellinen puhdistus ja muut tarvittavat toimenpiteet. Alkunollalukemien poikkeama näkyy kuviossa 9. (Liikennevirasto 2015, 33.) Tarkemmin kalibrointia käsitellään standardissa SFS 22476-1 ja Liikenneviraston 25/2015 esiselvityksessä, CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä.



KUVIO 9. Tyypillinen voima-anturi kuormituskuvaaja ja anturin kalibrointikäyrä liioitellulla epälineaarisuudella termien selventämiseksi (Liikennevirasto 2015, 31)

5 CPTu-TULKINNAT

CPTu-kairausten tarkoitus on selvittää maakerrosrajat ja niiden jatkuvuus. Tuloksena saadaan yleispiirteinen käsitys maaperän ominaisuuksista sekä käyttäytymisestä. Tuloksista voidaan myös määritellä geoteknisiä maaparametreja. Tulosten käytettävyys maakerrostenprofilointiin ja geoteknisten parametrien määrittämiseen on käsitelty taulukossa 1 ja 2 aiemmin. Maalajikerrosten tulkinta pelkistä mittaustuloksista voi olla hankalaa. Erityisesti hienorakeisen maan tulkinta pelkkien kairaus tuloksista saatujen käyrien avulla on vaikeaa, ilman kokemusta ja perehtymistä asiaan. Seuraavassa osuudessa on tarkasteltu Kairausopas VI:n ohjeita eri parametrien tulkinnan tekemiseen mittauksista saatujen tulostekäyrien avulla.

Kärkivastus q_c

Kairausdiagrammissa esiintyvän kärkivastuksen suuruus kertoo maan tiiveydestä ja kerroksellisuudesta. Kärkivastusta kuvaavan käyrän tasaisuus kertoo maaperän rakeisuudesta, mitä suurempi vaihtelu käyrässä sitä suurempi on maaperän rakeisuus. CPTu-kairauksen erottelutarkkuus on suhteellisen hyvä hienorakeisista maista soraan asti. Tiiveyden määrittäminen kerroksellisista maista on hankalaa, koska kärkivastuksen arvoon vaikuttavat sekä maaperä kärjen yläpuolella ja maaperä kärjen alapuolella. (Kairausopas VI 2001, 43.)

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

- karkeampi maa-aines on kyseessä
- suurempi on maassa vallitseva pystyjännitys
- suurempi vaakapaine maassa vallitsee
- suurempi on maan tiiveysaste
- suurempi on maan ylikonsolidaatioaste. (Kairausopas VI 2001, 43.)

On myös huomioitava, että nämä eivät ole toisistaan riippumattomia suureita.

Vaippakitka f_s

Vaippakitka on maan ja vaippahylsyn välistä kitkaa. Vaippakitka mittaa kairauksen aikana syntyviä vaakasuuntaisia paineita, jolloin sen arvo on maalajista sekä maakerroksen ylikonsolidoitumisasteesta riippuvainen. Maalajien vaihtelua voidaan arvioida kärkivastuksen ja vaippakitkan muutoksen suhteen. (Kairausopas VI 2001, 43.)

Maan ominaisuudet vaikuttavat vaippakitkan arvoon siten, että vaippakitka on sitä

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

Tässä on huomioitava, että nämä eivät ole toisistaan riippumattomia suureita.

Huokospaine u

CPTu-kairauksessa tehdyn huokospainemittauksen avulla voidaan havaita ohuematkin kerrokset maaperässä. Huokospainesuhteen B_q avulla pystytään tekemään maalajeista tulkintaa sekä arvioimaan huokospaineen suuruudesta sa- ven suljettua leikkauslujuutta. Saatujen tulosten tulkintaa vaikeuttaa maan ylikonsolidoitumisasteen vaikutus huokospaineeseen sekä se, jos maa-aines ei ole kokonaan vedellä kyllästynyt. Vertailua muihin kairaustuloksiin on tehtävä, jotta voidaan varmistua tulkitun kerroksen oikeellisuudesta ja laajuudesta. (Kairausopas VI 2001, 44.)

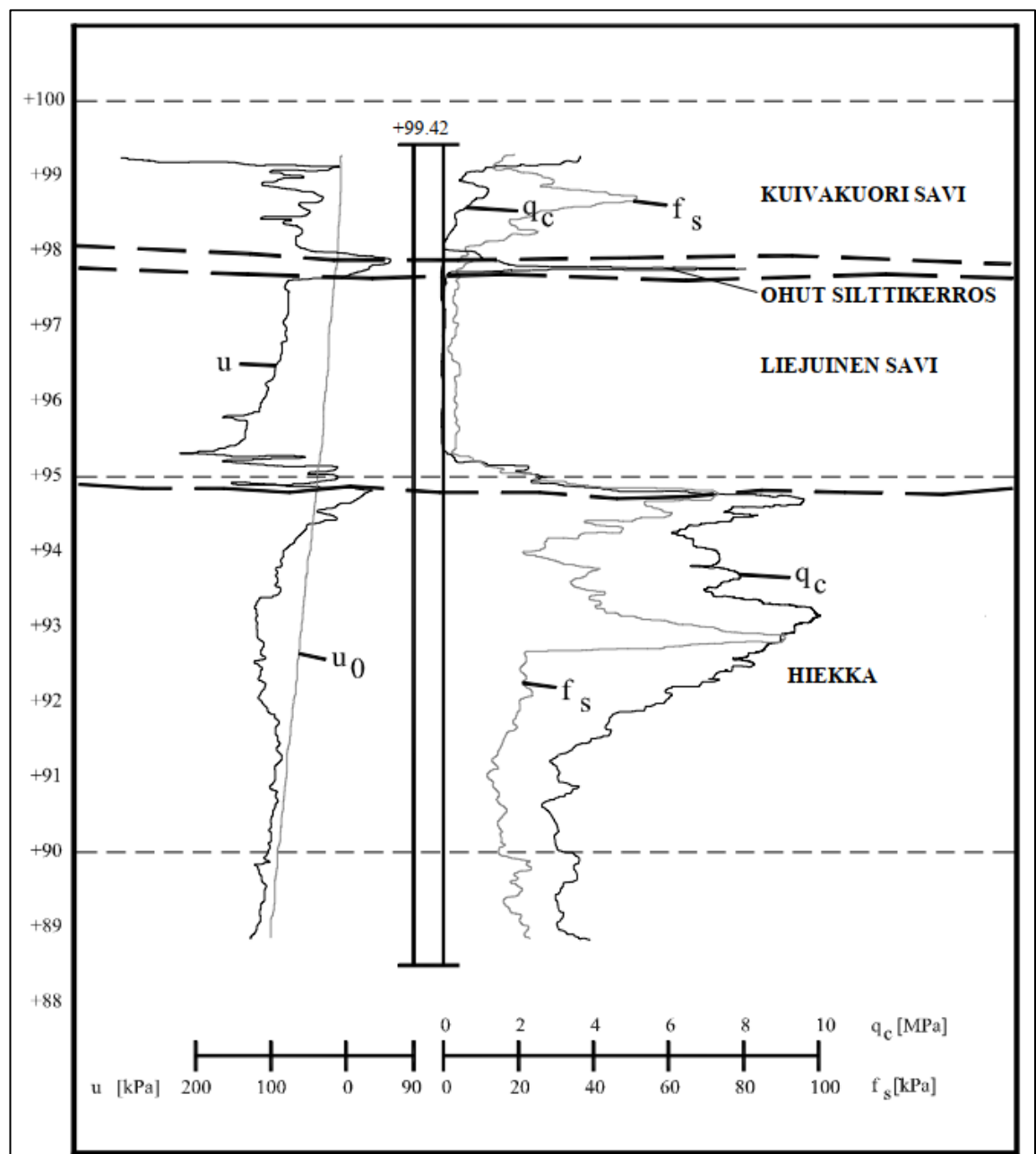
Maan ominaisuudet vaikuttavat huokospaineeseen siten, että huokospaine on sitä

- korkeampi mitä hienorakeisempi maa-aines on kyseessä,
- suurempi mitä suurempi on koheesiomaan suljettu leikkauslujuus,
- pienempi mitä suurempi on maan ylikonsolidaatioaste,
- suurempi mitä suurempi on maalajin sensitiivisyys (Kairausopas VI 2001, 44.)

Huomioitava on, että nämä eivät ole toisistaan riippumattomia suureita.

5.1. Maalajitulkinta kairausdiagrammista

Usein CPTu-kairauksen alustava maalajitulkinta tehdään silmämääräisesti mittaustulosten avulla. Mittaustulosten lisäksi voidaan tulkinnessa käyttää myös kairaajan tekemiä havaintoja kairauksen aikana. Tasalaatuissa hiekasta ja savesta pystytään tekemään erilaisten luokitusdiagrammien avulla melko tarkkoja maalajitulkintoja. Lisäksi on hyvä tehdä muita tutkimuksia kuten näytteenottoja varsinkin, jos tulokset ovat ristiriitaisia muiden tutkimusten kanssa. Kuviossa 10 on esitetty CPTu-kairauksen kairausdiagrammi. (Kairausopas VI 2001, 44.)



KUVIO 10. CPTu-kairausdiagrammi (Kairausopas VI 2001, 45)

Kuviossa 10 on CPTu-kairausdiagrammista, jossa näkyy kairauspylvään vasemmalla puolella mittauskäyrä huokospaineelle u ja maassa vallitsevan huokospaineen u_0 käyrä. Pylvään oikealla puolella on kärkivastuksen q_c ja vaippakitkan f_s mittauskäyrät. Kairausdiagrammissa nähdään noin 1,0 metrin vahvuinen kuivakuorikerros sekä sen onnistunut kairaus CPTu-kärjellä. Yleensä kuitenkin on suositeltavaa aloittaa CPTu-kairaus alkukairauksella esimerkiksi kierrekairalla, jolla alkukairaus tehdään joko pohjavedenpinnan tasolle tai kuivakuorikerroksen alapuolelle. Tämä tehdään siksi, ettei kärjen kyllästystä menetetä. Kyllästykseen menetys aiheuttaa virhettä huokospaineen arvoihin ja siten myös saatuihin tuloksiin. Heti kuivakuorikerroksen alapuolella on ohut silttikerros, jonka tunnistaa siltille tyypillisellä, huokospaineen laskuna samalla kun kärkivastus kasvaa. Siltille tyypillinen terävä muutos kärkivastuksessa näkyy selvästi. Silttikerroksen ollessa paksumpi kärkivastuksessa on nähtävissä terävää sahaavaa muutosta kärkivastuksen arvossa. Usein vaippakitkassakin näkyy jatkuvaa pientä vaihtelua. Ohuen silttikerroksen alla on savinen kerros. Huokospaine kasvaa selkeästi ohuen silttikerroksen jälkeen ja on suurempi kuin maassa vallitseva huokospaine. Savelle tyypillistä on tasaiset ja maltillisesti syvyyden kasvaessa muuttuvat kärkivastus ja vaippakitka. Liejuiseksi savi voidaan tulkita pienemmän kärkivastuksen arvon perusteella mutta on syytä varmistaa saven liejuisuus myös näytteenotolla. Liejuisen savikerroksen alla on hiekkakerros missä näkyy selkeä kärkivastuksen kasvaminen. Hiekassa kärkivastuksessa näkyy pientä vaihtelua jatkuvasti mutta ei terävinä piikkeinä kuten siltissä. Kairauksen syventyessä mitattu huokospaine laskee lähelle maassa vallitsevaa huokospainetta, joka johtuu hiekan hyvästä vedenläpäisevyydestä. Vaippakitka on tasaista ja samantyyppistä kuin savella kun hiekka on hienorakeista ja tasalaatuista. Kivisissä hiekkakerroksissa vaihtelu voi olla suurtakin vaippakitkassa. (Kairausopas VI 2001, 45.) Alustavan maalajimäärityksen tekeminen on kerrottu tarkemmin Kairausopas VI:ssa.

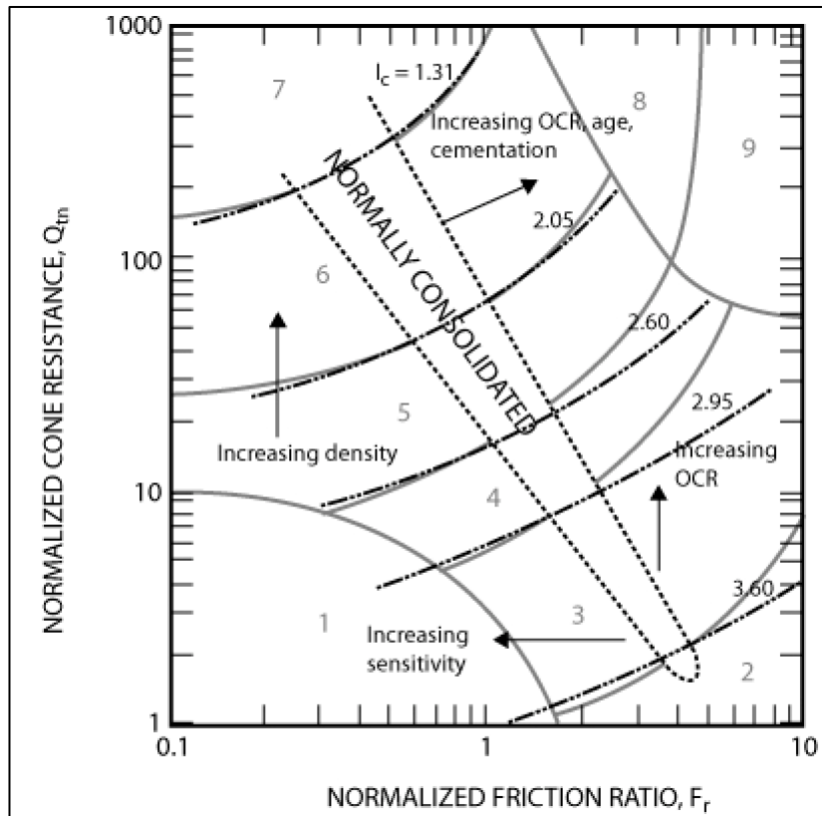
5.2. Maaperän profilointi

CPTu-kairauksesta saatava tietoa voidaan käyttää maaperän profilointiin ja maaperän käyttäytymistyyppin määrittämiseen. Kairauksesta saatu tieto kertoo maaperän kokonaiskäyttäytymisestä kärjen ympärillä. CPTu-kairauksessa mitattujen parametrien suuruudet ovat maankäyttäytymisestä riippuvaisia tietyssä jännitystilassa. Tätä CPTu-kairaukseen perustuvaa maaperätyypin tulkintaa kutsutaan

maaperän käyttäytymistyyppiä eli Soil Behavior Type (SBT). Maa voidaan luokitella sen käyttäytymisen mukaan eri luokkiin. Oleellinen huomio on, että maan käyttäytyminen ei ole sidoksissa maalajiluokitukseen. SBT-luokitusta voidaan käyttää apuna, kun valitaan taulukkoarvoja. SBT-luokitus tehdään käyttämällä SBT-kuvaajia, joita on olemassa useampia eri luokitteluparametreille perustuen. Kuviossa 11 on esitetty normalisoitu SBT-kuvaaja, jossa parametreinä käytetty normalisoitua kärkivastusta ja kitkasuhdetta. Kuvaajassa esitetty myös SBT-indeksi I_c käyrät. Kaava 16 määrittelee saman keskeisten ympyröiden säteet, jotka rajaavat eri SBT alueet kuvaajassa. Kitkasuhteen määrittely on esitetty kappaaleessa 2.5.4. Taulukossa 4 on kuvaajassa esitetty SBT-alueiden sanalliset määritelmät ja indeksin I_c arvot. (CPT-guide 2015, 27.)

$$I_c = ((3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2)^{0,5} \quad (16)$$

missä Q_t on normalisoitu kärkivastus $(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$
 F_r on normalisoitu kitkasuhde prosentteina
 $(f_s / (q_t - \sigma_{v0})) * 100 \%$ (CPT-guide 2015, 29)



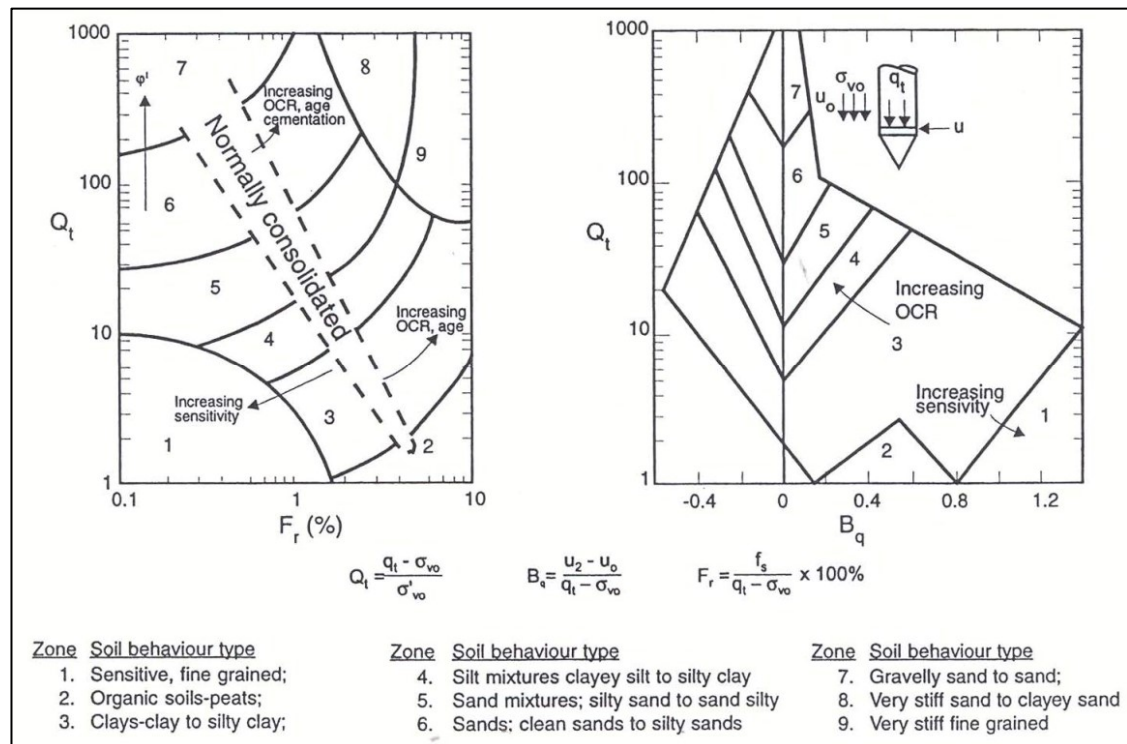
KUVIO 11. SBT kuvaaja perustuen normalisoituun kärkivastukseen ja normalisoituun kitkasuhteeseen (CPT-guide 2015, 27)

TAULUKKO 4. SBT-kuvaajassa maaperätyyppien luokittelu ja SBT indeksi I_c (CPT-guide 2015, 27.)

Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – clay	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

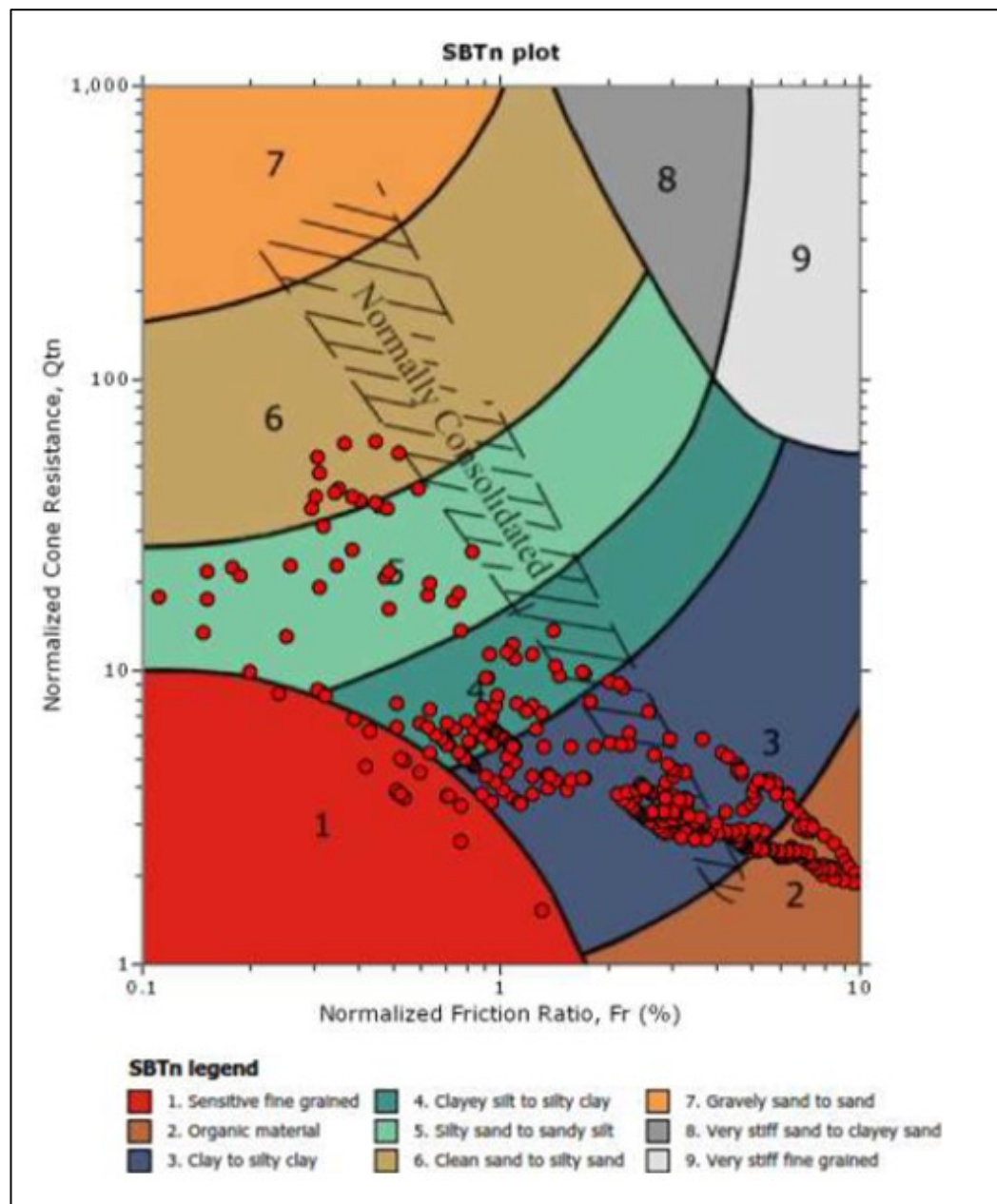
*erittäin ylikonsolidoitunut tai sementoitunut, SBT-indeksi I_c ei päde luokittelualueissa 1,8 ja 9.

SBT-luokittelua voidaan tarkentaa CPTu -kairauksella, jossa mitataan myös huokosvedenpainetta. Kairauksesta saatujen tulosten avulla voidaan määrittellä huokospainesuhde B_q , kuten kappaleessa 2.5.5 Huokospainesuhde B_q on esitetty. Huokosvedenpaineen lisäyksen Δu arvoista saadaan tarkentavaa arviota maankäyttäytymislukituksen tekemisessä. Kuviossa 12 on esitetty normalisoidut STBn kuvaajat perustuen normalisoidun kärkivastuksen Q_t sekä kitkasuhteen F_r että huokospainesuhde B_q suhteeseen. (CPT-guide 2015, 29)

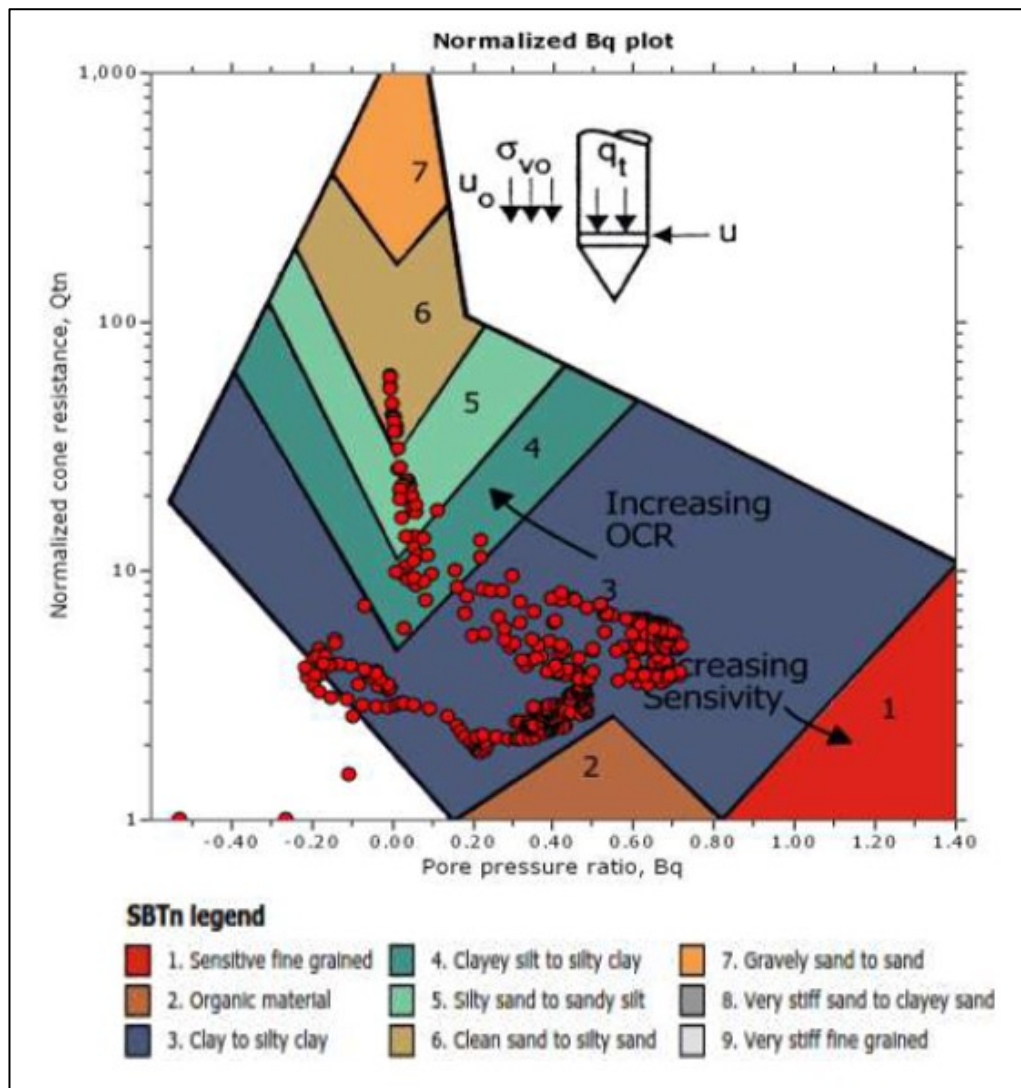


KUVIO 12. Normalisoidut SBTn kuvaajat $Q_t - F_r$ ja $Q_t - B_q$ Robertsonin mukaan 1990 (CPT-guide 2015, 28)

Nykyään SBT-luokittelu kuvaajat ovat värikoodattuja helpottamaan visuaalista esittämistä. Alla olevassa kuviossa 13 näkyy mittaustulokset esitettyinä normalisoitu kitkasuhde F_r normalisoidun kärkivastuksen Q_t suhteen. Kuviossa 14 on esitetty normalisoitu huokospainesuhde B_q normalisoidun kärkivastuksen Q_t suhteen. Jokainen piste vastaa yhtä mittaussyvyyttä. Lisää havainnollisuutta kuvaajaan saataisiin pisteiden värikoodauksella syvyyden mukaan. Kuvion alaosassa on selitetekstit kaikille kuviossa näkyvän maaperätyypin eri alueelle. (Selänpää 2021, 59.)



KUVIO 13. Normalisoidut SBTn-kuvaaja Q_t - F_r (Selänpää 2021, 59)



KUVIO 14. Normalisoidut SBTn-kuvaaja $Q_t - B_q$ (Selänpää 2021, 59)

5.3. CPTu tulokinnan geotekniset parametrit

CPTu-kairauksen tuloksista geoteknisten parametrien arvioimiseen on kehitetty useita empiirisiä korrelaatioita. Näiden korrelaatioiden luotettavuus ja soveltuvuus vaihtelee paljon. CPTu -kairauksessa käytettäessä erilaisia lisäantureita kuten esimerkiksi seismistä anturia, voidaan sen avulla parantaa maan jäykkyyden arviointia. Taulukossa 5 on esitetty CPTu-kairauksen sopivuus maaperän eri parametrien arvioimiseen. Tämä taulukko ei ota kantaa parametrien arvioinnin luotettavuuteen ainoastaan menetelmän soveltuvuuteen. Parametrin arvion luotettavuus perustuu moniin eri tekijöihin, jotka on otettava tapauskohtaisesti huomioon arviointia tehdessä.

TAULUKKO 5. CPTu -kairauksen soveltuvuus maaperän parametrien arvioimiseen. (CPT-guide 2015, 24)

Soil Type	D_r	Ψ	K_o	OCR	S_t	s_u	ϕ'	E, G^*	M	G_0^*	k	c_h
Coarse-grained (sand)	2-3	2-3	5	5			2-3	2-3	2-3	2-3	3-4	3-4
Fine-grained (clay)			2	1	2	1-2	4	2-4	2-3	2-4	2-3	2-3

1 = hyvä, 2 = hyvä - kohtalainen, 3 = kohtalainen, 4 = kohtalainen - heikko, 5 = heikko, tyhjä = ei saa käyttää, * = jos seisminen anturi käytössä

Parametrit:

OCR	yliekonsolidaatioaste
M	kokoonpuristuvuus
s_u	suljettu leikkauslujuus
S_t	sensitiivisyys
c_h	konsolidaatiokerroin
k	vedenläpäisevyys
D_r	suhteellinen tiiveys
ϕ'	kitkakulma
E	muodonmuutosmoduuli
G	leikkaus moduuli
G_0	pieni leikkaus muodonmuutosmoduuli
Ψ	(state parameter) nykytilan huokosluvun e ja kriittisen tilan huokosluvun e_{cs} erotus

Tulkintaohjelmista saatavat tulokset näille parametreille ovat arvioita. Kaikkien parametrien tuloksen kohdalla on tehtävä vertailuja muiden kairausten, tutkimusten ja näytteenoton tuloksiin. Pelkästään CPTu-kairausten tulkintojen tulosten perusteella ei voida arvioida maaparametrejä tai tehdä laskelmia.

5.3.1 Hienorakeisen maan geotekniset parametrit

Suljettu leikkauslujuus s_u

Saven suljetun leikkauslujuuden arviointiin CPTu-kairausten tuloksista on käytännössä kaksi eri lähestymistapaa. Toinen on teoreettiset menetelmät ja toinen, empiiriset menetelmät, jotka perustuvat empiiriseen korrelaatioon.

Teoreettiset menetelmät

Käytettävät teoreettiset menetelmät voidaan jakaa viiteen eri luokkaan seuraavasti:

- kantokestävyysteoria
- laajenemisteoria
- energian säilymisteoriat yhdistettynä laajenemisteoriaan
- analyyttiset ja numeeriset ratkaisut käyttäen lineaarista ja epälineaarista jännitys-muodonmuutosriippuvuutta
- siirtymäpolkuteoria. (Lunne et al. 1997, 63.)

Kaikki nämä teoriat perustuvat kärkevyyden ja suljetun leikkauslujuuden suhteeseen, joka esitetty kaavassa 17.

$$q_c = N_c \cdot S_u + \sigma_0 \quad (17)$$

missä	N_c	on teoreettinen kärkevyyden kerroin
	σ_0	on in-situ kokonaisjännitys.
		Riippuen mitä teoriaa käytetään voi σ_0 olla σ_{v0} , σ_{h0} tai σ_{mean} (Lunne et al. 1997, 63.)

Koska kyseessä on monimutkainen ilmiö, on huomioitava että, kaikki teoreettiset menetelmät tekevät olettamuksia maan käyttäytymisestä, maan murtumisesta ja muista reunaehdoista. Teoreettisilla menetelmillä on rajoituksensa, kun mallinnetaan maan käyttäytymistä. Todelliseen maan käyttäytymiseen vaikuttavat eri tekijät kuten esimerkiksi kuormitus, anisotropia, sensitiivisyys ja ikääntyminen. Teoreettisten menetelmien tulokset on varmistettava kenttäkokeilla ja laboratoriotesteillä. (Lunne et al. 1997, 64.)

Empiiriset menetelmät

Käytetyt empiiriset menetelmät saven suljetun leikkauslujuuden s_u arvioimisessa CPTu-kairausten tuloksista, voidaan jakaa kolmeen eri tapaan seuraavasti:

- suljetun leikkauslujuuden arviointi kokonaiskärkivastuksen q_t avulla
 - suljetun leikkauslujuuden arviointi tehokkaan kärkivastuksen q_e avulla
 - suljetun leikkauslujuuden arviointi huokosvedenylipaineen Δu avulla.
- (Lunne et al. 1997, 64.)

Suljettu leikkauslujuus s_u kokonaiskärkivastuksen q_t avulla

Arvio suljetun leikkauslujuuden suuruudesta saadaan käyttämällä kaavaa 18.

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_k}, \quad (18)$$

missä N_k tai N_{kt} on empiirinen kärkikerroin
 σ_{v0} on maassa vallitseva kokonaisjännitys. (Lunne et al. 1997, 64.)

Kärkikertoimelle on esitetty useita eri arvoja. Tyypillisesti arvo vaihtelee välillä 10...18 ja yleisesti käytetty keskiarvo on 14. Jos saven plastisuus kasvaa, kasvaa myös kärkikertoimen arvo ja jos sensitiivisyys kasvaa kärkikertoimen arvo pienenee. Vastaavasti jos huokospainesuhde B_q on isompi pienenee kärkikerroin N_{kt} . Joten jos hienorakeisessa hyvin sensitiivisessä maaperässä, missä B_q noin 1,0 voi kärkikertoimen N_{kt} arvo olla jopa 6. (Lunne et al. 1997, 64.)

Suljettu leikkauslujuus s_u tehokkaan kärkivastuksen q_e avulla

Arvio suljetun leikkauslujuuden suuruudesta saadaan käyttämällä kaavaa 19. Kaavassa esitetty tehokas kärkivastus q_e on korjatun kärkivastuksen q_t ja mitatun huokosvedenpaineen u_2 erotus (Lunne et al. 1997, 64.).

$$s_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}}, \quad (19)$$

Kärkikertoimen N_{ke} arvo vaihtelee välillä 6–12 tai välillä 1–13 korreloiden huokospaineparametria B_q . (Lunne et al. 1997, 66.)

Suljettu leikkauslujuus s_u huokosylipaineen Δu avulla

Suljettua leikkauslujuutta voidaan arvioida huokosylipaineen Δu avulla. Huokosvedenpaineen mittausturi on u_2 . Suljettua leikkauslujuutta arvioidaan käyttämällä kaavaa 20.

$$s_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}}, \quad (20)$$

missä Δu on huokosvedenylipaine

$N_{\Delta u}$ on kärkekerroin. (Lunne et al. 1997, 67.)

Laajenemisteoriaan perustuvan kärkekerroimen arvo vaihtelee teoreettisesti 2–20 välillä. Huokospaineparametriin B_q korreloiden kärkekerroimen arvo vaihtelee välillä 4–10. Varovaiseen arvioon valitaan arvo lähempänä ylärajaa. (Lunne et al. 1997, 67.)

Suljetun leikkauslujuuden arviointi ruotsalaisella menetelmällä

Kairausopas VI 2001:ssä on esitetty hienorakeisen maan suljetun leikkauslujuuden s_u arviointia käyttämällä kaavaa 21, missä suljettua leikkauslujuutta arvioidaan nettokärvivastuksen $(q_t - \sigma_{v0})$ ja maan juoksurajan w_L avulla.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65 \cdot w_L}, \quad (21)$$

missä q_t on korjattu kärvivastus

σ_{v0} on maassa vallitseva pystyjännitys

w_L on juoksuraja. (Kairausopas VI 2001, 50.)

Käytettäessä kaavaa 21 on huomioitava, että saatu leikkauslujuus koskee ainoastaan homogeenistä maata. Häiriintyneessä ja epähomogeenisessä maassa huomioidaan laskelmissa ainoastaan puolet saadusta leikkauslujuuden arvosta. Juoksuraja on määriteltävä laboratoriossa. (Kairausopas VI 2001, 50.)

Rolf Larssonin julkaisussa CPT-sondering, juoksurajan lisäksi mainitaan suljetun leikkauslujuuden ja nettokärvivastuksen suhteeseen vaikuttavan myös maan ylikonsolidaatioaste. Jos maan ylikonsolidaatioaste on suuri, vaikuttaa se saatuihin

leikkauslujuuden arvoihin merkittävästi. Jos maa on normaalikonsolidoitunutta tai lievästi ylikonsolidoitunutta, se ei aiheuta suurta muutosta saatuihin leikkauslujuuden arvoihin. Ylikonsolidaatioaste on huomioitu kaavassa 22. (SGI 2015, 50.)

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{13,4 + 6,65 \cdot W_L} \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,2}, \quad (22)$$

missä	q_t	on korjattu kärkivastus
	σ_{v0}	on maassa vallitseva pystyjännitys
	W_L	on juoksuraja
	OCR	on ylikonsolidaatioaste. (SGI 2015, 50.)

SHANSEP-CPTu

Saven suljettua leikkauslujuutta CPTu-kairauksesta määritellään kaavojen 18 ja 20 avulla, perustuen kärkikertoimiin N_{kt} ja $N_{\Delta u}$. Kärkikertoimien arvoja voidaan korjata vastaamaan paikallisen saven ominaisuuksia vastaavaksi. Tämä voidaan tehdä käyttämällä SHANSEP-mallia (Ladd & Foott 1974), joka huomioi myös ylikonsolidoitumisasteen. (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 3.)

SHANSEP on yleisesti käytetty malli saven suljetun leikkauslujuuden arviointiin, missä S on normaalikonsolidoituneen saven suljetun leikkauslujuuden s_u suhde tehokkaaseen pystyjännitykseen σ'_{vc} ja m on moduuliluku. Kaavan 23 käyttäminen kuitenkin vaatii ylikonsolidoitumisasteen OCR määrittämisen ja moduuliluvun m määrittämisen laboratoriossa.

$$\frac{s_u}{\sigma'_{vc}} = \left(\frac{s_u}{\sigma'_{vc}} \right)_{NC} OCR^m = S OCR^m \quad (23)$$

Normalisoidun lujuussuhteen S arvot vaihtelevat testaus menetelmästä riippuen. Rasialeikkauskokeesta (DSS) saadut arvot ovat välillä 0,20–0,27 ja kolmiakselikokeesta (TXC) arvot ovat välillä 0,28–0,35. Ylikonsolidoitumisaste OCR voidaan arvioida CPTu tuloksista seuraavien kaavojen 24 ja 25 avulla. (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 4.)

$$\sigma'_p = \alpha(q_t - \sigma_{v0}) \quad (24)$$

$$\sigma'_p = k(u_2 - u_0) = k\Delta u \quad (25)$$

Sijoittamalla $OCR = \sigma'_p / \sigma'_{vc}$ sekä kaava 23, kaavoihin 18 ja 20, jolloin saavat kärkekertoimien N_{kt} ja $N_{\Delta u}$ määrittelyn kaavat 26 ja 27 seuraavanlaisen muodot.

$$N_{kt} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{vc}}{s_u/\sigma'_{vc}} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{vc}}{S OCR^m} = \frac{OCR^{1-m}}{\alpha S}, \quad (26)$$

missä	S	on normalisoitu lujuussuhde $S = (s_u/\sigma'_{vc})_{NC}$
	m	on empiirinen materiaalikerroin
	α	on paikka- tai kerroskohtainen empiirinen kerroin. (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 4.)

Alfakertoimen arvo riippuu testausmenetelmästä ja saven anisotropiasta. Suomalaiselle hieman ylikonsolidoituneelle savelle ehdotetut arvot $\alpha = 0,24$ (Väylävirasto 14/2018, 25.) ja $k = 0,39$ (Di Buò, et al. 2020). Materiaalikertoimelle m on suomalaiselle savelle, jonka OCR on välillä 1–4 ehdotettu arvoa 0,76, perustuen siipikairaustuloksiin (D'Ignazio et al. 2016). (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 4.)

$$N_{\Delta u} = \frac{(u_2 - u_0)/\sigma'_{vc}}{s_u/\sigma'_{vc}} = \frac{(u_2 - u_0)/\sigma'_{vc}}{S OCR^m} = \frac{OCR^{1-m}}{kS}, \quad (27)$$

missä	S	on normalisoitu lujuussuhde $S = (s_u/\sigma'_{vc})_{NC}$
	m	on empiirinen materiaalikerroin
	k	on paikka- tai kerroskohtainen empiirinen kerroin. (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 4.)

Näiden kaavojen perusteella empiiriset kärkekertoimien arvot N_{kt} ja $N_{\Delta u}$ nousevat kasvavan ylikonsolidoitumisasteen mukana. Normalikonsolidoituneelle savelle, jonka OCR on yksi ja ehdotetun empiirisen kertoimen α ollessa 0,3 ja rasialeikkauskokeesta arvioitu lujuussuhde S on 0,22, antaa kaava 26 kärkekertoimelle N_{kt} arvon noin 15. Kun kerroin k on 0,53 ja S on 0,22 saadaan kaavasta 27 kärkekertoimelle $N_{\Delta u}$ arvoksi noin 8,6. (D'Ignazio & Lehtonen 2021, 4.)

Sensitiivisyys S_t

Saven sensitiivisyyttä S_t voidaan varovasti arvioida CPTu-tuloksista suljetun leikkauslujuuden s_u ja häirityn suljetun leikkauslujuuden $s_{u(rem)}$ suhteena. Koska häirityn suljetun leikkauslujuuden arvon ajatellaan vastaavan vaippavastuksen f_s arvoa voidaan saven sensitiivisyyttä arvioida kaavalla 28. (CPT-guide 2015, 38.) Kaavaa ei kuitenkaan sellaisenaan voi käyttää suomalaisen sensitiivisen saven arviointiin.

$$S_t = \frac{s_u}{s_{u(rem)}} = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}} (1/f_s) = (7/F_r), \quad (28)$$

missä	s_u	on suljettu leikkauslujuus
	$s_{u(rem)}$	on häiritty suljettu leikkauslujuus
	N_{kt}	on kärkekerroin (~ 14)
	f_s	on vaippavastus
	q_t	on korjattu kärkivastus
	σ_v	on pystyjännitys
	F_r	on normalisoitu kitkasuhde prosentteina (CPT-guide 2015, 38.)

Suhteellisen sensitiivisillä savilla ($S_t > 10$) vaippakitkan arvo voi olla hyvinkin pieni, joka aiheuttaa virhettä tarkkuudessa. Siksi on suositeltavaa, että sensitiivisyyden ja häirityn suljetun leikkauslujuuden arvoja käytetään vain ohjeellisina arvoina. (CPT-guide 2015, 38.)

Ylikonsolidaatioaste OCR

Ylikonsolidaatioaste OCR määritellään esikonsolidaatiojännityksen σ'_c ja tehokkaan maassa vallitsevan pystyjännityksen σ'_{v0} suhteena kaavan 29 mukaisesti.

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} \quad (29)$$

Robertsonin mukaan ylikonsolidoituneille saviille OCR voidaan määrittää CPTu-tuloksista seuraavalla kaavalla 30. (CPT-guide 2015, 40.)

$$OCR = 0,25 \cdot Q_t^{1,25}, \quad (30)$$

missä Q_t on normalisoitu kärkivastus $(q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$, ilman yksiköitä.
(CPT-guide 2015, 40.)

Kokoonpuristuvuusmoduuli M

Kairausopas VI 2001 kertoo että, kokoonpuristuvuusmoduuli M savelle määritellään kaavan 31 mukaisesti.

$$M_i = m_i \cdot q_n = m_i \cdot (q_T - \sigma'_{v0}), \quad (31)$$

missä M_i on vallitsevan tilan kokoonpuristuvuusmoduuli
 m_i on empiirinen kerroin
 q_n on nettokärkivastus. (Kairausopas VI 2001, 53.)

Parametri m_i määritellään taulukosta 6.

TAULUKKO 6. Parametrin m_i määrittäminen.

m_i	B_q	$S_c/S_{v0'}$	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

Kokoonpuristuvuusmoduulia M voidaan arvioida CPT tuloksista seuraavan empiirisen kaavan 32 mukaisesti. (CPT-guide 2015, 58.)

$$M = \alpha_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (32)$$

Robertson (2009) ehdotti käytettäväksi seuraavia normalisoidun kärkivastuksen Q_t vaihteluarvoja α_M arvon määrittämisessä:

Hienorakeisille maalajeille:

Kun $I_c > 2,20$

$\alpha_M = Q_t$, kun $Q_t < 14$

$\alpha_M = 14$, kun $Q_t > 14$

Karkearakeisille maalajeille:

$$\text{Kun } I_c < 2,20$$

$$\alpha_M = 0,01888 [10^{(0,55I_c + 1,68)}]. \text{ (CPT-guide 2015, 58.)}$$

CPT tulosten perusteella saadaan likimääräinen arvio kokoonpuristuvuusmoduulille.

Kimmomoduuli E

Seismisen lisämoduulin avulla CPT-kairauksessa voidaan mitata leikkausaallonnopeutta V_s . Elastiseen teoriaan perustuen soveltaminen teknisiin ongelmiin edellyttää, että pieni jännitysmoduuli on redusoitu sopivalle räsitusasteelle. Useimmille hyvin suunnitelluille rakenteille redusointiaste on usein lähellä kerrointa noin 2,5. Tämän perusteella voidaan arvioida vastaava kimmomoduuli E' seuraavan kaavan 33 mukaan. (CPT-guide 2015, 49.)

$$E' \sim G_0 = \rho \cdot V_s^2, \quad (33)$$

missä	G_0	pieni leikkaus muodonmuutosmoduuli
	ρ	maaperän tiheys [kg/m^3]
	v_s	leikkausaallonnopeus [m/s]

Kokoonpuristuvuusmoduulia M voidaan myös arvioida mitatun leikkausaallonnopeuden V_s mukaan. L'Heureux ja Long (2017) ehdottivat kaavaa 34, joka perustuu norjalaisten savien tutkimusdataan. (Di Buò 2020, 138.)

$$M_0 = 0,0001 V_s^{2,212} \quad (34)$$

Suomalaisiin saviin tämä kaava ei sovi sellaisenaan, johtuen eroista plastisuudessa, sensitiivisyydessä ja ylikonsolidaatioasteesta. Ödometrikokeesta saatavan kokoonpuristuvuusmoduulin M_{oed} suhde jännitysmoduulin G avulla voidaan arvioida kokoonpuristuvuusmoduulia M_0 kaavan 35 mukaisesti. (Di Buò 2020, 138.)

$$M_0 = \frac{1}{10} \frac{2(v-1)}{(2v-1)} \rho V_s^2 = 0,225 \rho V_s^2 = 0,000375 V_s^2 \quad (35)$$

missä	ρ	on tiheys 1500 [kg/m ³]
	u	on Poissonin suhde, oletetaan 0,1
	v_s	on leikkausaallonnopeus [m/s]
	M_0	on kokoonpuristuvuusmoduuli [MPa]. (Di Buò 2020, 138.)

Di Buòn (2020) mukaan teoreettinen kaava yliarvio kokoonpuristuvuusmoduulia M . Kalibroimalla arvoa systemaattisen virheen tekijällä ($b = 0,87$) on kaava 36 seuraavanlaisessa muodossa.

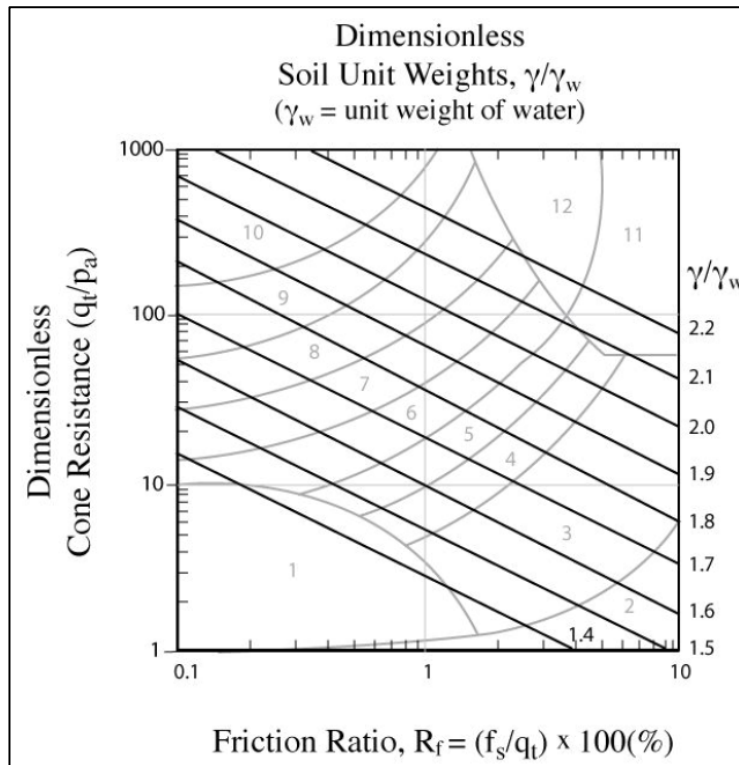
$$M_0 = 0,000326 V_s^2 \quad (36)$$

Tilavuuspaino γ

Maaperän tilavuuspainon määrittämiseen on suositeltavaa käyttää häiriintymätöntä näytteenottoa ja laboratoriossa tehtäviä määrittäksiä. On kuitenkin myös mahdollista arvioida tilavuuspainoa CPTu -kairausten tuloksien perusteella. Maan tilavuuspainoa voidaan arvioida kitkasuhteen R_f ja korjatun kärkivastuksen q_t kuvaajan avulla, joka on esitetty kuviossa 15. Tilavuuspainosuhte lasketaan kaavan 37 mukaisesti. (CPT-guide 2015, 36.)

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0,27 \cdot [\log R_f] + 0,36 \cdot \left[\log \frac{q_t}{p_a} \right] + 1,236 \quad (37)$$

missä	γ	on tilavuuspaino
	γ_w	on veden tilavuuspaino samassa yksikössä kuin γ
	q_t	on korjattu kärkivastus
	p_a	ilmakehän paine samassa yksikössä kuin q_t . (CPT-guide 2015, 36.)



KUVIO 15. CPTu-kairaukseen perustuva yksikötön maaperän tilavuuspainosuhte γ/γ_w (CPT-guide 2015, 36)

5.3.2 Karkearakeisten maalajien geotekniset parametrit

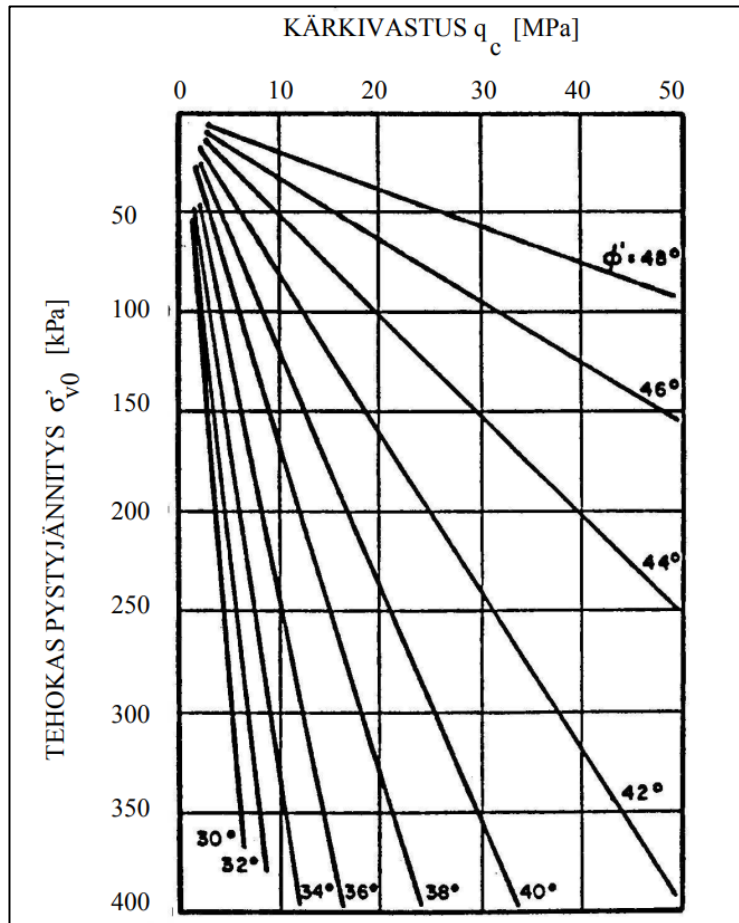
Kitkakulma φ

Kitkakulman määrittämiseen on useita eri teorioita. Kitkakulman määrittäminen hiekkamaassa (Robertson & Campanella, 1983) mukaan tehdään korjaamattoman kärkivastuksen q_c ja tehokkaan pystyjännityksen σ'_{v0} suhteen avulla kaavan 38 mukaisesti. (Kairausopas VI 2001, 51.)

$$\varphi' = \arctan \left(0,096 + 0,386 \cdot \log \left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) \right), \quad (38)$$

missä	φ'	on tehokas kitkakulma [°]
	q_c	on korjaamaton kärkivastus [kPa]
	σ'_{v0}	on tehokas pystysuora jännitys [kPa]. (Kairausopas VI 2001, 51.)

Kaavaan 38 perustuen kuviossa 16 on esitetty suorat, jonka mukaan kitkakulman suuruutta voidaan varovaisesti arvioida hiekkamaassa.



KUVIO 16. Kitkakulman ja kärkivastuksen välinen riippuvuus hiekkamaassa (Kairausopas VI 2001, 52)

Suhteellinen tiiveys D_r

Kairausopas VI esittää kitkamaan suhteellisen tiiveyden määrittämiseen käytettäväksi kaavaa 39 (Jamiolkowski et al. 1985), missä suhteellinen tiveys D_r määritellään korjatun kärkivastuksen q_t ja tehokkaan pystyjännityksen σ'_{v0} avulla. (Kairausopas VI 2001, 51.)

$$D_r = -98 + 66 \cdot \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} \right), \quad (39)$$

missä D_r on suhteellinen tiveys [%]
 q_t on korjattu kärkivastus [kPa]
 σ'_{v0} on tehokas pystyjännitys [kPa]. (Kairausopas VI 2001, 51.)

Huomioitava on kaavaa 39 käytettäessä että CPTu-kairauksesta saatavien parametrien avulla voidaan määrittää suhteellinen tiiveys kitkamaalle, jos maa on normaalikonsolidoitunut ja tasarakeista hiekkaa. (Kairausopas VI 2001, 51.)

Muodonmuutosominaisuudet

Muodonmuutosmoduulien E_d ja E_m määrittäminen tehdään karkeille maille alla esitetyn kaavan 40 mukaisesti. Taulukossa 7 on esitetty laskuissa käytettävät kertoimet k_E maalajin perusteella. (Kairausopas VI 2001, 53.)

$$E_d = k_E \cdot q_c, \quad (40)$$

missä q_c on korjaamaton kärkivastus [MPa]
 k_E on kerroin, joka on riippuvainen maalajista. (Kairausopas VI 2001, 53.)

TAULUKKO 7. Eri maalajien mukaiset k_E kertoimet.

Maalaji	k_E
siHk	2
Hk	4
srHk	8

Muodonmuutosmoduuli E_m saadaan taulukosta 8 interpoloimalla korjaamattoman kärkivastuksen funktiona.

TAULUKKO 8. Muodonmuutosmoduulin E_m interpolointi korjaamattoman kärkivastuksen funktiona.

Korjaamaton kärkivastus q_c	Muodonmuutosmoduuli E_m
0	0...10
2,5	10...20
5	20...30
10	30...40
20	40...50

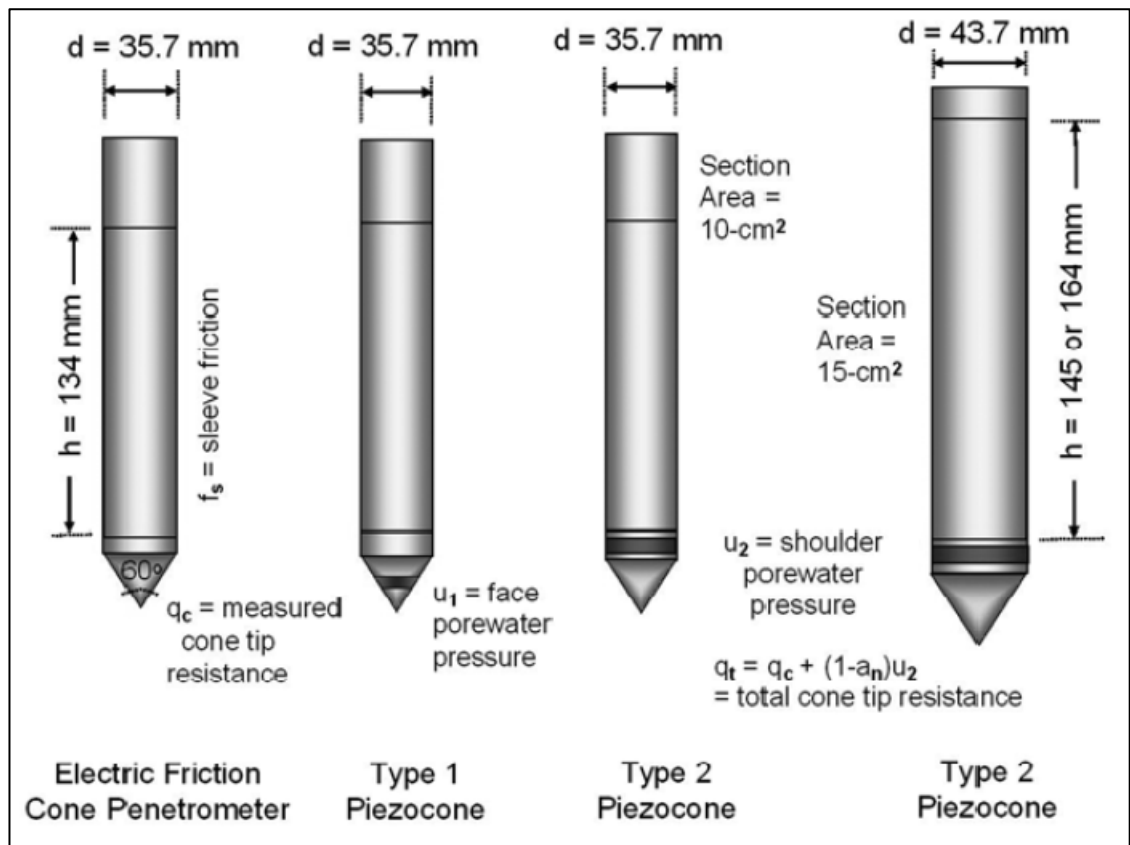
5.4. Maan vedenläpäisevyys ja dissipaatiokoe

CPTu-kairauksen aikana vedellä kyllästyneessä hienorakeisessa maa-aineksessa muodostuu huokosylipainetta, kun CPTu-kairan kärki tunkeutuu maaperään. Huokosylipaineen suuruus riippuu saven ominaisuuksista kuten pehmeydestä, eheydestä, jäykkyydestä ja sitkeydestä. Maan vedenläpäisevyyttä voidaan arvioida kairauksen yhteydessä huokosylipaineen tasaantumiskokeen avulla eli dissipaatiokokeella. Dissipaatiokokeessa eli huokosvedenpaineen tasaantumiskokeessa mitataan aikaa siitä, kun kärjen tunkeutuminen maaperään on pysäytetty ja huokosylipaine alkaa laskemaan. Koe päättyy siihen, kun ylipaine lopulta tasaantuu maassa vallitsevan huokospaineen tasolle. Se kuinka nopeasti ylipaine tasaantuu, riippuu siitä, mikä on ympäröivän maaperän vedenläpäisevyys (k), sekä vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin c . Nämä maaperän virtaus- ja tiivistymisominaisuudet liittyvät toisiinsa kaavan 41 mukaisesti. Huokosylipaineen tasaantuminen voi kestää silttisissä savissa muutamia minuutteja, kun taas ehyessä plastisessa savessa tasaantuminen voi kestää jopa päiviäkin.

$$c = \frac{k \cdot M}{\gamma_w}, \quad (41)$$

missä	c	on konsolidaatiokerroin
	k	on vedenläpäisevyys
	γ_w	on veden tilavuuspaino
	M	kokoonpuristuvuusmoduuli. (CPT-guide-6th-edition, 2016.)

Kuviossa 17 on esitetty huokospaineanturien u_1 ja u_2 sijainnit CPTu kairan kärjessä. Suomessa on lähes aina u_2 tyyppin huokospaineanturi käytössä. Poikkeaminen tästä käytännöstä on ilmoitettava selkeästi mittauspöytäkirjassa sekä sähköisesti luovutettavassa aineistossa.



KUVIO 17. CPTU-kärkien standardimittoja (Sandven 2010, 3)

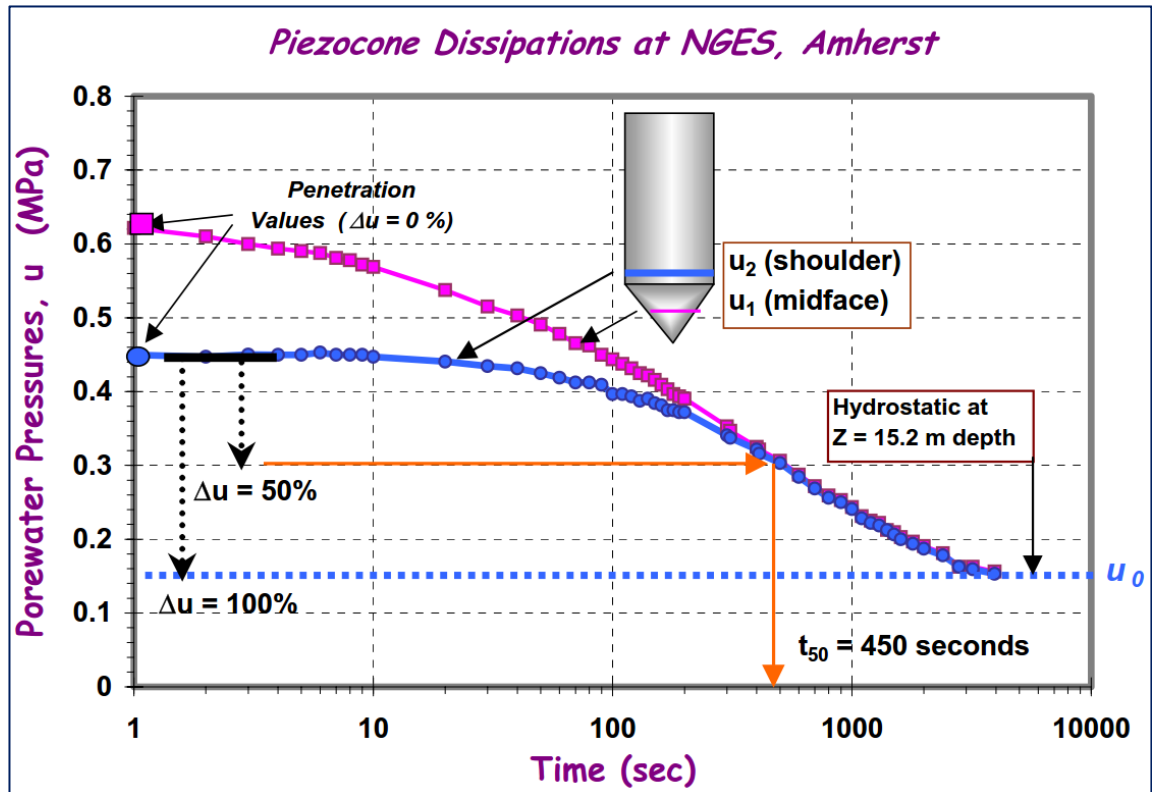
Monotoninen dissipaatio

Monotonisessa dissipaatioissa huokosylipaineen (Δu) arvot laskevat ajan kuluessa logaritmisesti. Maalajina ovat yleensä savi tai siltti, joiden koostumus vaihtelee pehmeästä tiiviiseen. (Mayne 2002, 2.)

Dilatorinen dissipaatio

Usein ylikonsolidoituneissa ja epätasaisessa halkeilevassa maaperässä dissipaatiokokeessa voidaan nähdä kokeen alussa huokosylipaineessa tapahtuva nousu, jonka jälkeen huokosylipaine lähtee laskemaan. Ilmiö johtuu maaperässä tapahtuvasta laajenemisilmiöstä eli dilaatiosta. (Mayne 2002, 6.)

Konsolidaatiokerrointa voidaan arvioida dissipaatiokokeen perusteella. Konsolidaatiokerroin tulkitaan dissipaatiokokeen tuloksista, kun huokosylipaineen taantumisesta on tapahtunut 50 prosenttia. Kuviossa 18 on esitetty monotoninen dissipaatiokoe, jossa mitattu kahden eri paikassa olevan huokospaineanturin avulla. Teoreettinen aikakerroin on tulkittu huokospaineanturin u_2 käyrästä. (Mayne 2002, 2.)



KUVIO 18. Dissipaatiokoe pehmeässä kerroksellisessa savessa kahdella huokospaineanturilla (Mayne 2002, 2)

Kaavan 42 avulla voidaan arvioida saven horisontaalisen konsolidaatiokertoimen (c_h) suuruutta monotonisessa dissipaatiossa.

$$c_h = \left(\frac{T_{50}}{t_{50}} \right) \cdot r^2, \quad (42)$$

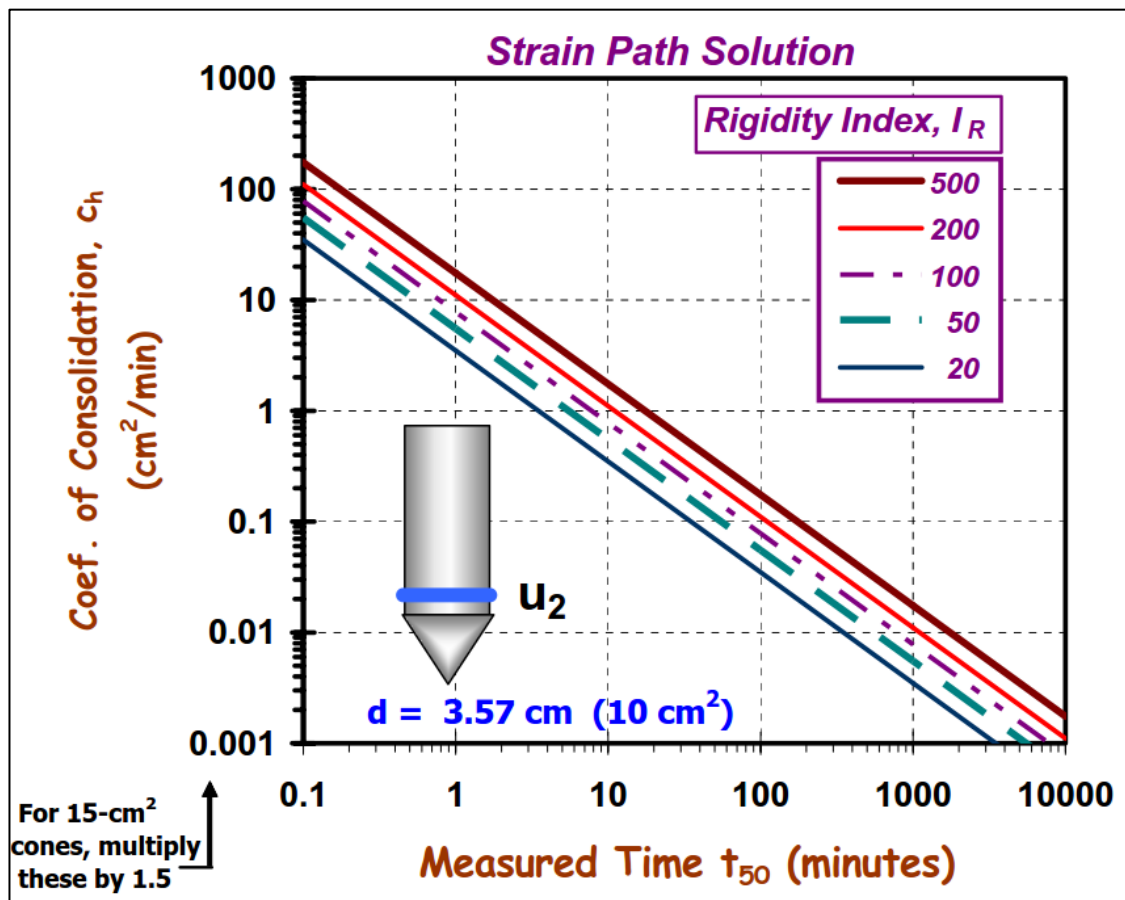
missä	T_{50}	on teoreettinen aikakerroin 50 %, ($u_2 = 0,245$ ja $u_1 = 0,118$)
	t_{50}	on mitattu aika, kun dissipaatiosta tapahtunut 50 % [s]
	r	on kärkikartion säde [mm]. (CPT-guide 2015, 55.)

Saven horisontaalinen konsolidaatio c_h voidaan määrittää myös kaavan 43 mukaisesti, perustuen siirtymäpolkuteoriaan Teh & Houlsby (1991). Kaava ottaa huomioon myös jäykkyyksindeksi I_R . (Mayne 2002, 2.)

$$c_h = \frac{T_{50} \cdot r^2 \sqrt{I_R}}{t_{50}} = \frac{T_{50} \cdot r^2 \sqrt{\frac{G}{s_u}}}{t_{50}}, \quad (43)$$

missä	T_{50}	on teoreettinen aikakerroin 50 %, ($u_2 = 0,245$ ja $u_1 = 0,118$)
	t_{50}	on mitattu aika, kun dissipaatiosta tapahtunut 50 % [s]
	r	on kärkikartion säde. (Mayne 2002, 2.)
	I_R	on jäykkyysindeksi
	G	on leikkausmoduuli
	s_u	on suljettu leikkauslujuus. (Gregg Drilling & Testing. 2013, 10.)

Kuviossa 19 on esitetty horisontaalisen konsolidaatiokertoimen c_h lineaarisetkuvajaat siirtymäpolkuteoriaan perustuen, joissa otettu huomioon myös jäykkyysindeksi I_R .



KUVIO 19. Konsolidaatiokerroin c_h kun 50 % dissipaatio, u_2 anturilla mitattuna (Mayne 2002, 6)

Vedenläpäisevyyskerroin k

Tyypin 2 CPTu-kärkikartio, joka on esitetty kuviossa 13, missä huokospaineen mittausanturi u_2 sijaitsee välittömästi kärkikartion takana. Vedenläpäisevyyttä voidaan arvioida kaavan 44 perusteella kun käytössä on 2-tyypin kärki u_2 mittausanturilla ja siinä tapauksessa, kun dissipaatio on monotoninen.

$$k = \frac{1}{(251 \cdot t_{50})^{1,25}}, \quad (44)$$

missä k on vedenläpäisevyyskerroin [cm/s]

t_{50} on mitattu aika, kun dissipaatiosta tapahtunut 50 % [s]

Kaava 44 on empiirinen kaava Perez & Fauriel (1988), joka perustuu mitattuun 50 % aikaan dissipaatiokokeessa. (Mayne 2002, 2.)

Maan vedenjohtavuutta voidaan arvioida myös karkeasti SBT-indeksiä I_c käyttämällä. Taulukossa 9 vedenläpäisevyyskerroin k on arvioitu arvoja, jotka perustuvat SBT- karttoihin. (CPT-guide 2015, 52.)

TAULUKKO 9. SBT-karttoihin (Robertson 2010) perustuvia karkeit arvioita vedenläpäisevyyskerroin k . (CPT-guide 2015, 52.)

SBT Zone	SBT	Range of k (m/s)	SBT _n I_c
1	Sensitive fine-grained	3×10^{-10} to 3×10^{-8}	NA
2	Organic soils - clay	1×10^{-10} to 1×10^{-8}	$I_c > 3.60$
3	Clay	1×10^{-10} to 1×10^{-9}	$2.95 < I_c < 3.60$
4	Silt mixture	3×10^{-9} to 1×10^{-7}	$2.60 < I_c < 2.95$
5	Sand mixture	1×10^{-7} to 1×10^{-5}	$2.05 < I_c < 2.60$
6	Sand	1×10^{-5} to 1×10^{-3}	$1.31 < I_c < 2.05$
7	Dense sand to gravelly sand	1×10^{-3} to 1	$I_c < 1.31$
8	*Very dense/ stiff soil	1×10^{-8} to 1×10^{-5}	NA
9	*Very stiff fine-grained soil	1×10^{-9} to 1×10^{-7}	NA

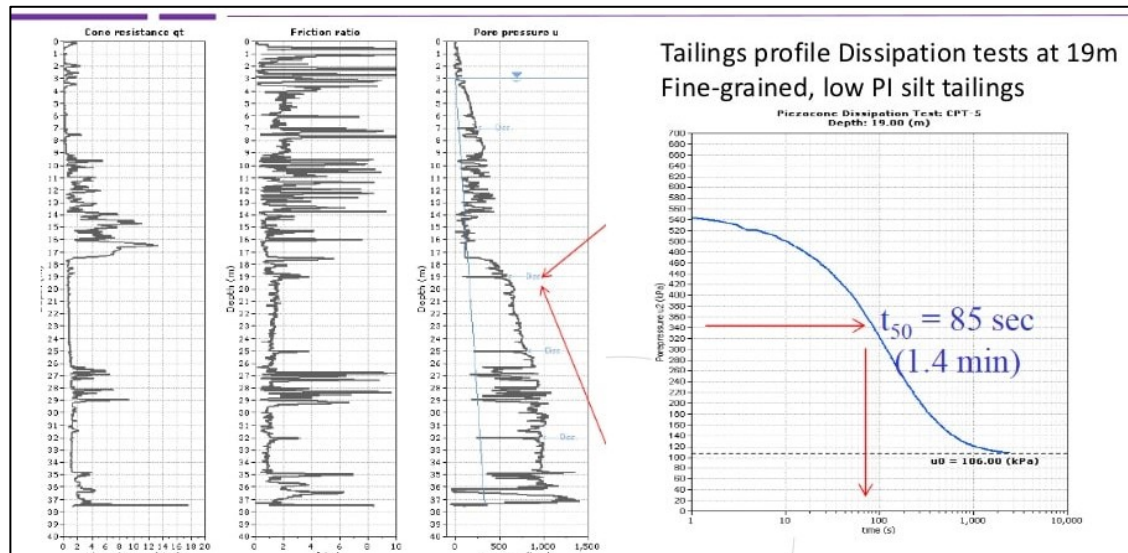
*Overconsolidated and/or cemented

Taulukossa 9 esitetty korrelaatio vedenläpäisevyyskerroimen ja SBTn I_c voidaan esittää myös seuraavanlaisesti:

$$\text{Kun } 1,0 < I_c \leq 3,27 \quad k = 10^{(0,952 - 3,04I_c)} [m/s]$$

$$\text{Kun } 3,27 < I_c \leq 4,0 \quad k = 10^{(-4,52 - 1,37I_c)} [m/s]$$

Näillä edellä olevilla, vaihteluväleillä voidaan arvioida maaperän vedenläpäisevyyden todennäköisyyden vaihtelua syvyyden mukaan. Mutta koska kairauksesta saadut parametrit ovat riippuvaisia monista eri muuttujista maaperässä, tulisi näitä arvoja käyttää vain ohjeellisina arvoina. Kuviossa 20 on esitetty dissipaatiokokeen suoritukset kairauksen aikana sekä dissipaatiokokeesta saatu kuvaaja logaritmisessa asteikossa.



KUVIO 20. Dissipaatiokokeet kairauksessa ja kuvaaja (Gregg Drilling & Testing. 2013, 12)

Dissipaatiokokeeseen oleellisesti liittyviä asioita ja huomioita ovat

- dissipaatiokokeet ohjelmoitava halutulle tarkastelusyvyydelle sekä määritellään kokeen kesto
- maalajin vaikutus kokeen suoritus aikaan, voi kestää päiviäkin
- maan oltava täysin vedellä kyllästynyt, pohjaveden pinnan alapuolella
- maan veden johtavuus on riippuvainen kokoonpuristuvuusmoduulista
- konsolidaatiota tapahtuu pääosin horisontaalisessa suunnassa
- jäykkyysindeksillä ($I_r = G/s_u$) suuri merkitys
- samankaltaisuutta 1-D konsolidaatioon laboratoriossa
- oletus huokosylipaineen monotonisesta vähenemisestä. (Selänpää 2021, 73.–75.)

Epävarmuuksia ovat huokospaineen jakautuminen, maan epähomogeenisuus (kerroksellisuus), maan makrorakenne, anisotrooppisuus, ei-horisontaalisen dissipaation vaikutus, kärjen aiheuttama maan häiriintyminen, suodattimen tukkeutuminen, suodattimen kyllästyksen onnistuminen. (Selänpää 2021, 76.)

6 TULKINTAOHJELMISTO

Tulkintaohjelmistolle asetetut vaatimukset sekä tulkintaohjelmiston valikkojen toiminnot ja ominaisuudet esitetään seuraavaksi. Aiemmin kappaleessa 5.3. CPTu tulkinnan geotekniset parametrit on esitelty useita kaavoja, mitä tulkintaohjelmisto käyttää parametrien määrittelyyn.

6.1. Ohjelmiston valinta

Tulkintaohjelmistojen vaatimuksina edellytettiin käyttämisen helppoutta, tulosten tulkinnan tarkkuutta sekä niiden luotettavuutta. Yksi valintaan vaikuttava oli myös se, kuinka natiivisti ohjelmisto pystyy lukemaan CPTu-kairauksen infraformaattia.

Tulkintaohjelmistolle tuloksille asetetut vaatimukset olivat seuraavat:

- maalajirajat
- maaperän karakterisointi
- maan lujuus- ja jäykkyys ominaisuudet
- dissipaatiokoe
- mittausdatan laadun arviointi.

Markkinoilla olevista tulkintaohjelmistoja valikoitui aluksi yhteensä neljä vertailuun. Vertailussa oli Geologismikin CPeT-IT v3.0, Novotechnin NovoCPT, Geosoftin CPT-pro sekä Datgelin CPT Tool. Vertailusta kuitenkin jäi pois heti Novotechnin NovoCPT puuttuvan dissipaatioanalyysin vuoksi. Myös Geosoftin CPT-pro jäi pois vertailusta vanhentuneen ja epäkäytännöllisen käyttöjärjestelmän vuoksi. Myös Datgelin CPT Tool jäi pois vertailusta sen epäkäyttäjäystävällisyyden vuoksi. Lopuksi päädyttiin testaamaan ainoastaan Geologismikin CPeT-IT v3.0 tulkintaohjelmistoa.

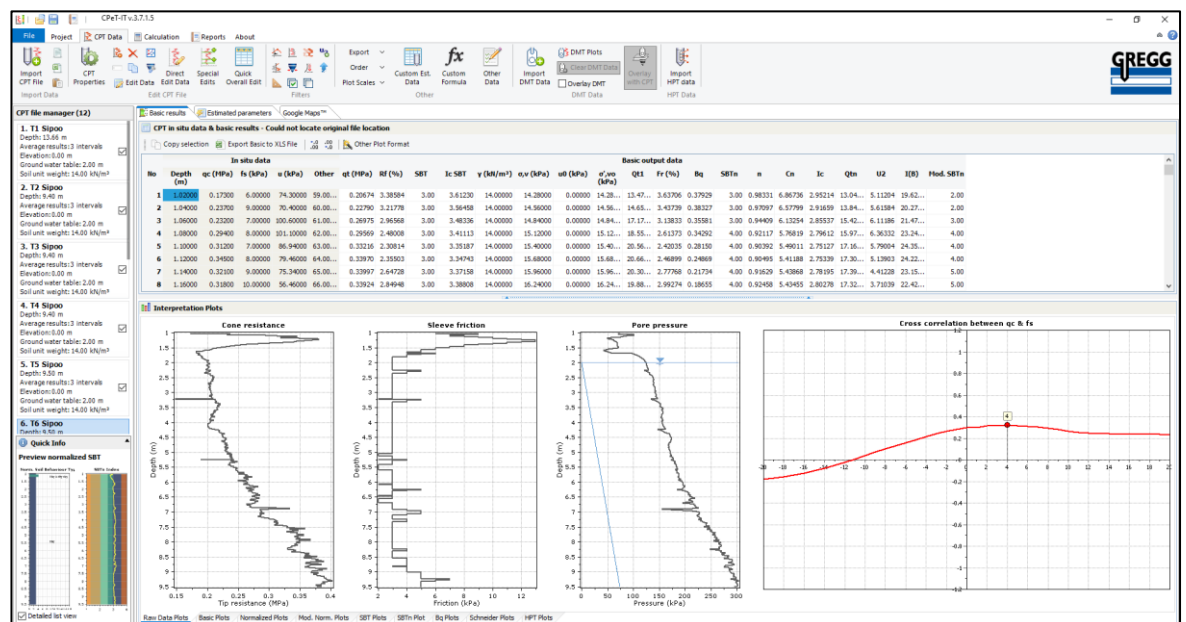
6.2. CPeT-IT

Yleistä

CPeT-IT on kreikkalaisen GeoLogismikin ohjelmistosuunnittelu yrityksen CPT tulkintaohjelmisto. CPeT-IT tulkintaohjelmisto on kehitetty yhteistyönä Gregg Drilling & Testing Inc. ja Professori Peter Robertsonin kanssa, joka on maailmanlaajuisesti tunnettu geotekniikan alan asiantuntija.

Ohjelmistoon viedään CPT-kairauksesta niin sanottua raakadataa, josta saadaan perustulkinnat maaperän käyttäytymistyyppistä (SBT) sekä useiden geoteknisten parametrien arvioita. Ohjelmiston tulkinnot ja laskennat perustuvat Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice kirjaan (Lunne et al. 1997.) sekä Professori Peter Robertsonin tekemiin päivityksiin.

Tässä opinnäytetyössä oli käytössä CPeT-IT ohjelmiston kokeiluversio, jossa kaikki tulkintaohjelmiston ominaisuudet eivät olleet käytössä mutta suurin osa kuitenkin. Tulkintaohjelmisto näytti selkeältä ja käyttäjäystävälliseltä. Kuvakaappauksessa yleiskuva tulkintaohjelmistosta kuvassa 12.



KUVA 12. Kuvakaappaus ohjelmiston CPT data -välilehdestä

Ohjelmistoon ei voi viedä suoraan infra-formaatin mukaisia tiedostoja. Kairauksesta saatavat tiedostot on muutettava eri formaattiin, joita ovat txt-tiedosto tai xls-

tiedosto. Tarkastelun perusteella voidaan todeta, ettei tämä ole mahdollista millään kaupallisella tulkintaohjelmistolla.

Aiemmin kappaleessa 3.2 Käyttöluokat kerrotaan eurostandardeihin perustuvista käyttöluokista, joilla CPT- kairaukset luokitellaan. Käyttöluokittelu perustuu nollalukemiin, joita ei tulkintaohjelmistossa käsitellä lainkaan, joten kairausten käyttöluokkamäärittely on tehtävä toisella menetelmällä.

Maalajirajojen siirtymäalueiden tunnistamiseen on tulkintaohjelmistossa ominaisuus, Transition layer detection. Tulkintaohjelmisto jättää huomioimatta dataa silloin kun kärki on siirtymäalueella savesta hiekkaan tai toisin päin. Tämä perustuu SBT indeksiin I_c ja sen vaihtumisnopeuden suhteeseen. Käyttäjä voi vaikuttaa arvoihin, mitkä jätetään huomioimatta.

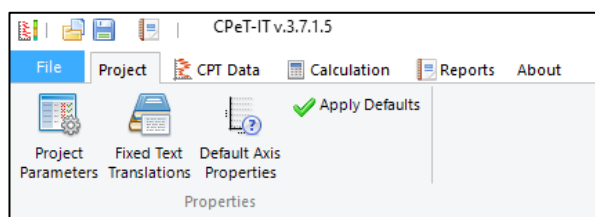
Maaperän ominaisuuksien määrittelyyn sekä maan lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin määrittämiseen ohjelmistossa oli kattavasti esitettyä geoteknisiä parametrejä. Näiden parametrien soveltuvuus kuitenkin suoraan käytettäväksi ei ole suoraan mahdollista sellaisenaan. On huomioitava, että tulkintaohjelmisto antaa ainoastaan arvioita, joita on kalibroitava vastaamaan paikallisia olosuhteita.

Tulkintaohjelmistossa on myös dissipaatiokokeen tulkinta, mikä oli yksi tulkintaohjelmistolle asetetuista vaatimuksista.

6.3. Päävalikot

6.3.1 Project-valikko

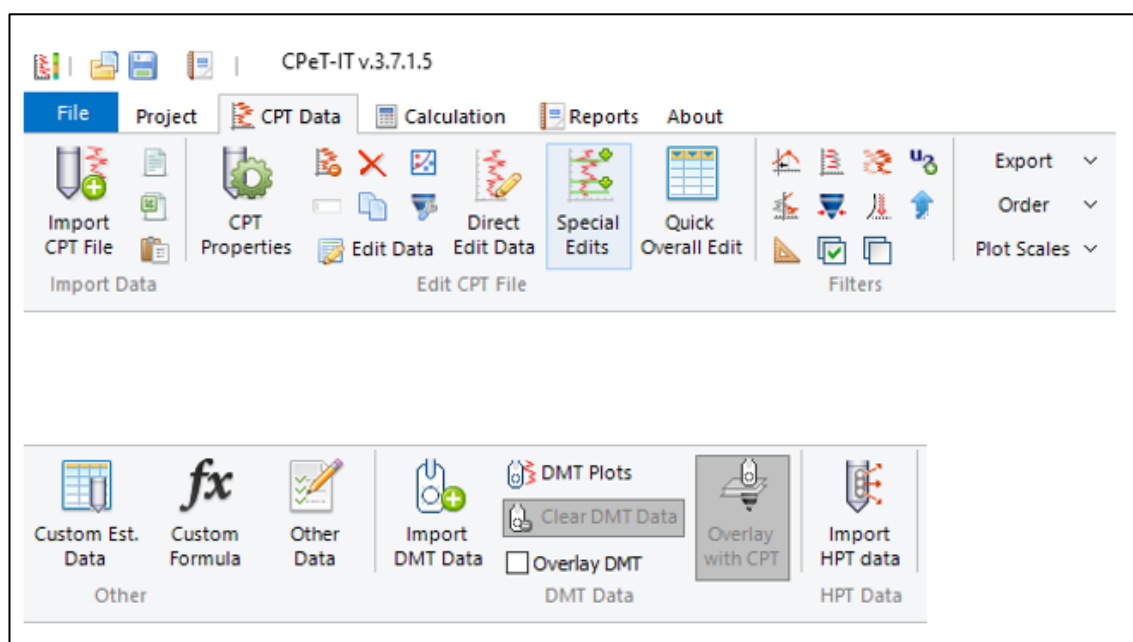
Projektivalikossa luodaan projekti ja annetaan projektin tiedot kuten sijainti, määritellään käyttöyksiköt ja mittausasteikkojen esitystapa. Lisäksi sinne voidaan lisätä yrityksen omat tiedot ja logoineen tulostettaviin raportteihin. Kuvassa 13 näkyy Project valikon toiminnot.



KUVA 13. Project-valikon toiminnot

6.3.2 CPT Data-valikko

Tulkintaohjelmistoon viedään tiedostoja Import-välilehdeltä. Tiedostoja voidaan viedä eri formaateissa. Ohjelmistoon ei voi viedä suoraan infra-formaatin mu- kaista kairautiedostoa vaan se on muutettava tekstitiedostoksi ja muokattava sitä, jotta ohjelmisto pystyy lukemaan sen. Excel-tiedoston vieminen tulkintaoh- jelmistoon onnistuu hyvin ja on luontevin tiedostomuoto, koska tulkinnan tulok- setkin ovat Excel-muodossa. Molempien tiedostojen viemisessä ohjelmistoon, on huomioitava, että kairauksista saatavissa tiedostoissa saattaa olla poikkeamia esimerkiksi sarakkeiden järjestyksessä. Tulkintaohjelmistoon viettäessä tiedos- toja, on tiedettävä, mitä mittaussuuretta missäkin sarakkeessa on mitattu. Sa- malla on tarkistettava valitun tiedoston mittaussyksiköt ja erityisesti kärkivastuksen arvot. Tulkintaohjelmisto käyttää kärkivastuksen mittayksikkönä MPa. Kuvakaap- pauksessa 14 on näkymä CPT Data-valikosta toimintoihin.



KUVA 14. Kuvakaappaus CPT Data-valikosta toimintoihin

CPT Properties

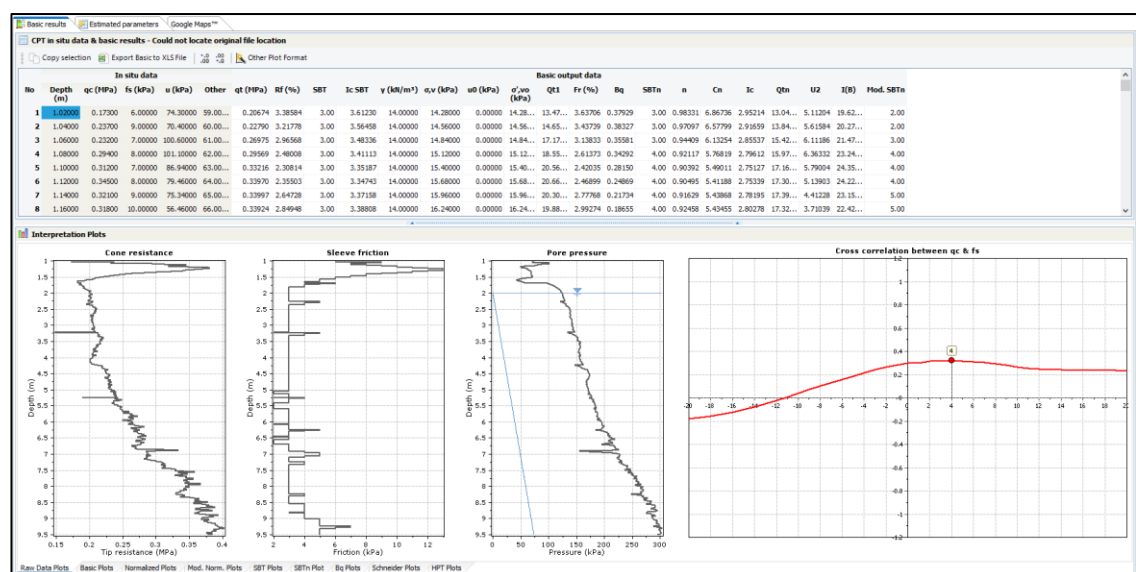
CPT Properties-valikon alla on neljä välilehteä. Ensimmäisessä määritellään maanpinnan taso, pohjavedenpinnan taso ja sekä käytetyn kärjen kärkikerroin. Toisella eli laskentavälilehdellä määritellään projektiin sopivat käyttäjän valitse- mat laskentaparametrit ja valitaan tilavuuspainon käyttötapa laskennoissa. Vii- meisellä välilehdellä määritetään laskennassa käytettävät teoriat esimerkiksi tila- vuuspainon ja tiiveyden laskemisessa. Samasta valikosta voidaan myös valita

mitä maaperätyyppiluokitusta käytetään. Valikosta löytyy toiminnot, jolla voidaan muokata raakadatan mittauspisteitä sekä lisätä tarkentavia tekstejä kuvaajiin.

Filter-valikon alta löytyy seuraavanlaisia toimintoja, joilla voidaan:

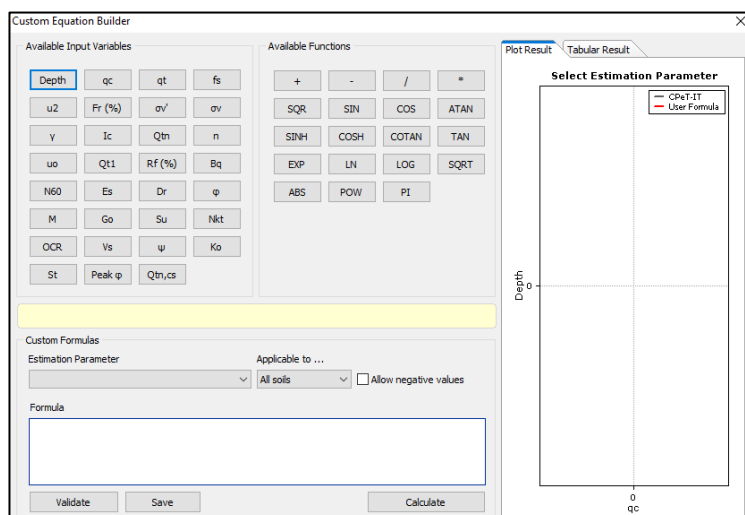
- korjata kärkivastuksen ja vaippavastuksen mittausero
- poistaa piikkejä, joita tulee tankojen vaihdosta
- siirtää mitattua dataa halutulla arvolla
- poistaa negatiivisia arvoja
- muuntaa u_1 anturin arvot u_2 anturin arvoiksi
- lisätä inkliinaatitietoa syvyyskorjauksen tekemiseksi
- muuttaa syvyystietoja halutulla arvolla.

Alla olevassa kuvassa 15 näkyy oikeassa reunassa kärkivastuksen ja vaippavastuksen mittausten onnistuminen, joka määritellään onnistuneiden mittaustenerotuksena. Erotus näkyy kuvaajassa punaisena viivana, jolla pisteen arvona 4. Numeron ollessa nolla, voidaan tulkita että, mitatut arvot ovat kunnossa. Kyseistä arvoa voi korjata Cross correlation filter toiminnolla, mutta tämän käyttö muuttaa raakadataa, poistaen mittausarvoja, jotka eivät ole onnistuneet. Arvojen poistaminen vaikuttaa mittauksen syvyyteen, jolloin se ei vastaa todellista mittauskai-
rausta. Ominaisuutta voidaan kuitenkin käyttää, jollain tasolla, kairauksen mit-
tauksen onnistumisen laadun arvioinnissa.



KUVA 15. Kuvakaappaus tulkintaohjelmistoon tuodun raakadatan kuvaajista

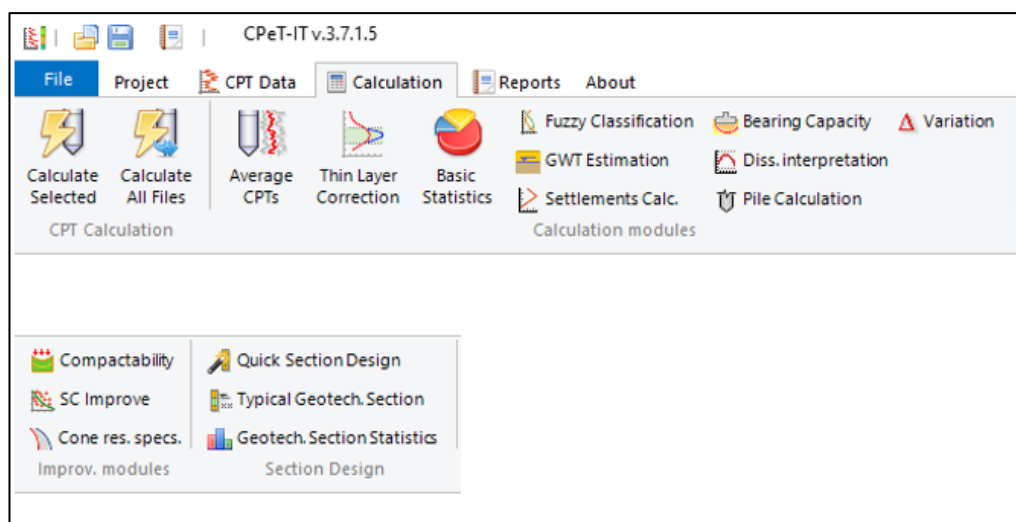
Lisäksi valikosta löytyy Custom formula toiminto, jonka yhtälön muodostamisen laskentavälilehti on kuvassa 16. Laskentalehdellä voidaan luoda omia yhtälöitä tulkintakuvaajien tekemiseksi, sillä edellytyksellä, että ne perustuvat ohjelman käyttämiin parametreihin. Toiminto ei ollut käytössä kokeiluversiossa, jolloin tämän toiminnon tarkempaa tarkastelua ei voitu tehdä.



KUVA 16. Custom formula toiminto

6.3.3 Calculation-valikko

Calculation valikosta löytyy useita laskentatoimintoja sekä toimintoja, joilla voidaan muokata tulostuvia kuvaajia, käyttäjän voi muokata kuvaajiin tulostuvien alueiden raja-arvoja sekä määritellä käytettävät laskentaparametrit. Kuvassa 15 näkyy Calculation valikossa olevat toiminnot.



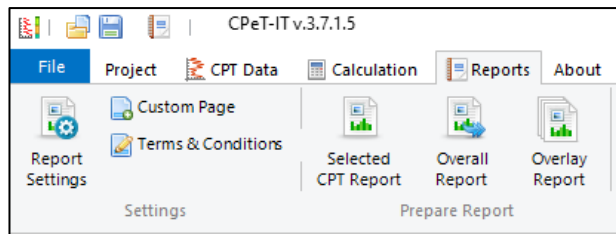
KUVA 15. Calculation -valikon toiminnot

Calculation- valikosta löytyvät esimerkiksi muun muassa seuraavat laskennat ja toiminnot:

- average CPTs, kairausten keskiarvo luonti
- thin layer correction, ohuen kerroksen korjaamiseksi
- dissipatio-testi
- painumalaskenta
- kantavuuslaskenta
- paalun kantavuuslaskenta.

6.3.4 Reports

Report välilehdellä valitaan käytettävän raportin tyyppi. Kuvakaappauksessa 16 näkyvien toimintojen kautta voidaan valita raportissa esitettävät tulokset ja muokata raportin muuta sisältöä.



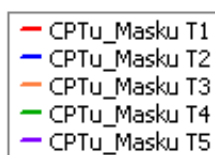
KUVA 16. Reports -valikon toiminnot

7 TULOKSET

Tulkintaohjelmistosta saatuja tuloksia vertailtiin FINCONE projektin CPTu-kairauksista saatuihin tuloksiin sekä laboratoriotuloksiin. Väyläviraston ja Tampereen yliopiston yhteisessä FINCONE projektissa tutkittiin pehmeän saven ominaisuuksia CPTu-kairausta hyödyntäen sekä kehitettiin näytteenottoa väitöskirjatutkijoiden Juha Selänpään ja Bruno Di Buò, toimesta.

7.1. Yleistä

FINCONE projektissa tutkittiin ja kehitettiin CPTu-kairauksia sekä näytteenottoja eri menetelmillä savessa Perniössä, Maskussa, Sipoossa, Paimiossa ja Lempäälässä. Näiden kohteiden maaperä on epäorgaanista savea, joiden plastisuus vaihtelee 16–60 välillä ja sensitiivisyys vaihtelee välillä 15–100. Seuraavaksi tarkastellaan Maskussa tehtyjen kairauksen vertailuaineiston (Di Buò 2020) tuloksia ja näitä tuloksia on vertailtu tulkintaohjelmiston antamiin tuloksiin. Kairaus T1 on tehty suurikapasiteettisella kärjellä ja kairaukset T2–T5 on tehty sensitiivisellä kärjellä. Kuvioissa 17–20 on esitetty tulostulokset eri parametreille. Liitteissä 1–5 on esitetty kohdekohtaisesti vastaavat tulokset. Vasemmalla puolella kuvissa on vertailutulokset ja oikealla tulkintaohjelmiston antamat tulokset. Esiteltyjä mitattuja parametreja käytetään useiden geoteknisten parametrien määrittämisessä, tästä syystä tarkastellaan tulkintaohjelmiston antamaa tarkkuutta vertailemalla käyriä keskenään. Kaikki eri kohteissa tehty CPTu-kairaukset tulostulokset on esitetty samassa kuviossa. Käyrät piirretty eri väreillä, jotta ne erottuvat helpommin. Kaikissa kohteissa T1 kairaus on tehty suurikapasiteettisellä kärjellä ja muut herkällä kärjellä. Kuvioissa 22, 23, 24 ja 25 esitetyt tulostulokset on värikoodattu kuvion 21 mukaisesti.

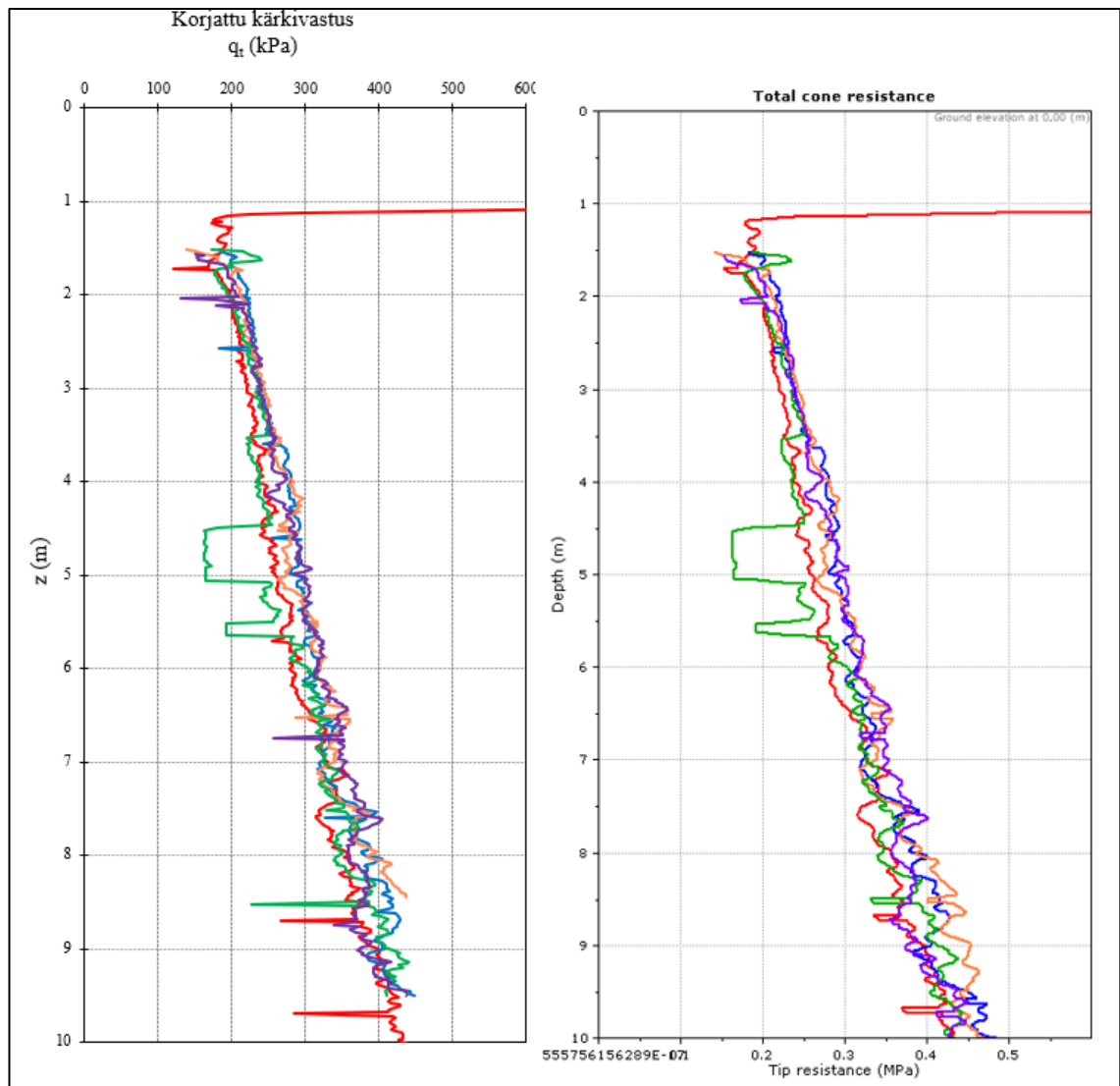


KUVIO 21. Tulostulokset värin mukaan Maskussa

7.2. Mitatut tulokset

Korjattu kärkivastus q_t

Maassa oleva huokosvedenpaine vaikuttaa kärkeen pienentäen mitattua kärkivastuksen q_c arvoa. Korjattu kärkivastus lasketaan kaavalla 7. Tulkintaohjelmiston tulos vastaa tarkkuudeltaan hyvin vertailuarvon (Di Buò, 2020) tulosta kuviossa 22. Korjatun kärkivastuksen tulokset liitteissä 1 – 5 sivulla 1.

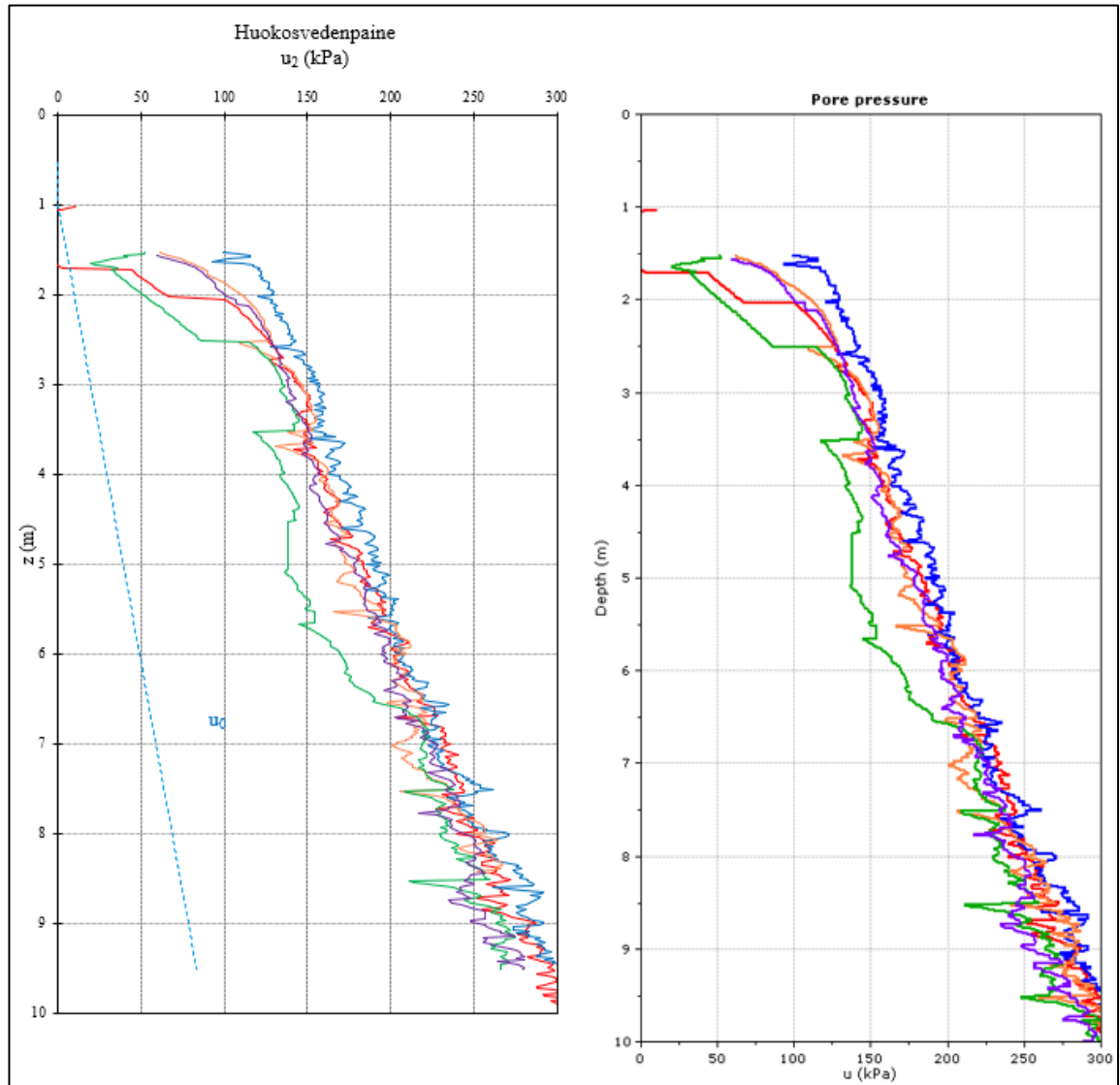


KUVIO 22. Korjatun kärkivastuksen käyrät, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT tulostuskäyrät

Kaikissa tulostuskäyrissä näkyy kärkivastuksen kasvaminen tasaisesti syvyyden suhteen. Kairauksessa T4 (vihreä) noin 4,5 m – 5,7 m syvyydessä näkyy kairauksessa pehmeämpi/sensitiivisempi savikerros, missä korjatun kärkivastuksen arvot laskevat selvästi. Muissa kairauksissa tämä ei kuitenkaan näy.

Huokospaine u_2

Huokospaine u on CPTu-kairauksen aikana mitattu huokospaine. Huokospaine määritellään aiemmin esitetyn kaavan 3 mukaisesti. Tulkintaohjelmiston antama tulos vastaa hyvin tarkkuudeltaan vertailuaineiston (Di Buò, 2020) tulosta kuviossa 23. Huokospaineen tulokset liitteissä 1 – 5 sivulla 1.



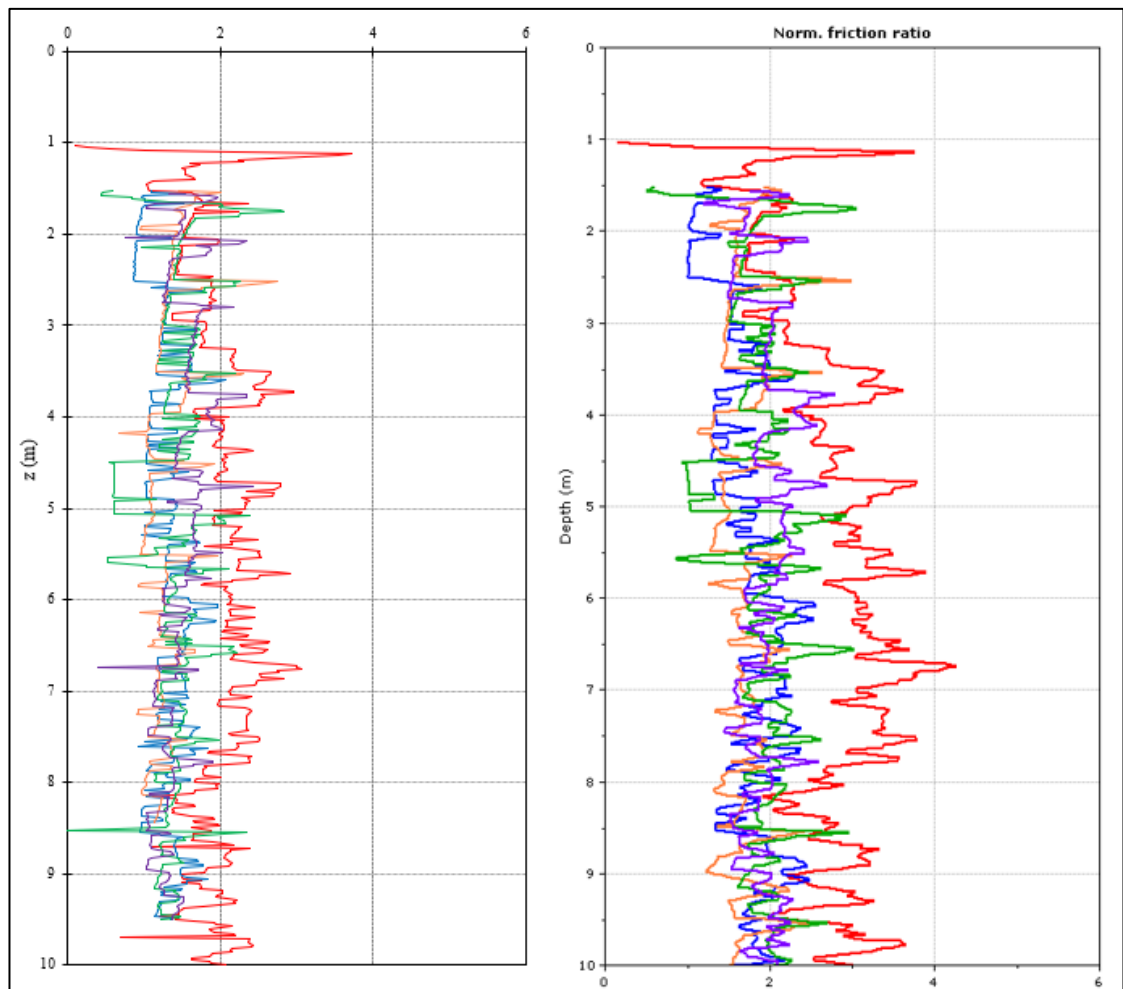
KUVIO 23. Mitatun huokospaineen u_2 käyrät, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-ohjelmiston tulostuskäyrät

Kairauksissa T1 näkyy huokospaineessa alussa huono vaste noin 2 metriin saakka. Kairauksessa T4 huono vaste huokospaineessa näkyy noin 2,5 metriin asti. Korjatun kärkivastuksen ja huokospaineen käyristä on nähtävissä tasainen muutos syvyyden suhteen sekä kärkivastuksen ja huokospaineen arvoissa. Kairauksessa 4 näkyvä lasku huokospaineessa välillä 3,5–6,5 m ja kärkivastuksen

pienentyminen välillä 4,5–5,5 m viittaisi pehmeämpään ja hiukan vettäläpäisevämpään hienorakeiseen maakerrokseen.

Normalisoitu kitkasuhde F_r

Normalisoitua kitkasuhdetta käytetään maaperän profilointiin sekä maaperän käyttäytymistyyppin (SBT) määrittämiseen. Normalisoitu kitkasuhde on mitatun vaipavastuksen suhde nettokärkivastukseen prosentteina. Kuviossa 24 on vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja ohjelmiston tulokset. Aiemmin kappaleessa 5.2. Maaperän profilointi ja maaperätyyppi on esitetty normalisoituun kitkasuhteeseen perustuva SBT kuvaaja. Normalisoidun kitkasuhteen tulokset liitteissä 1 – 5 sivulla 2.

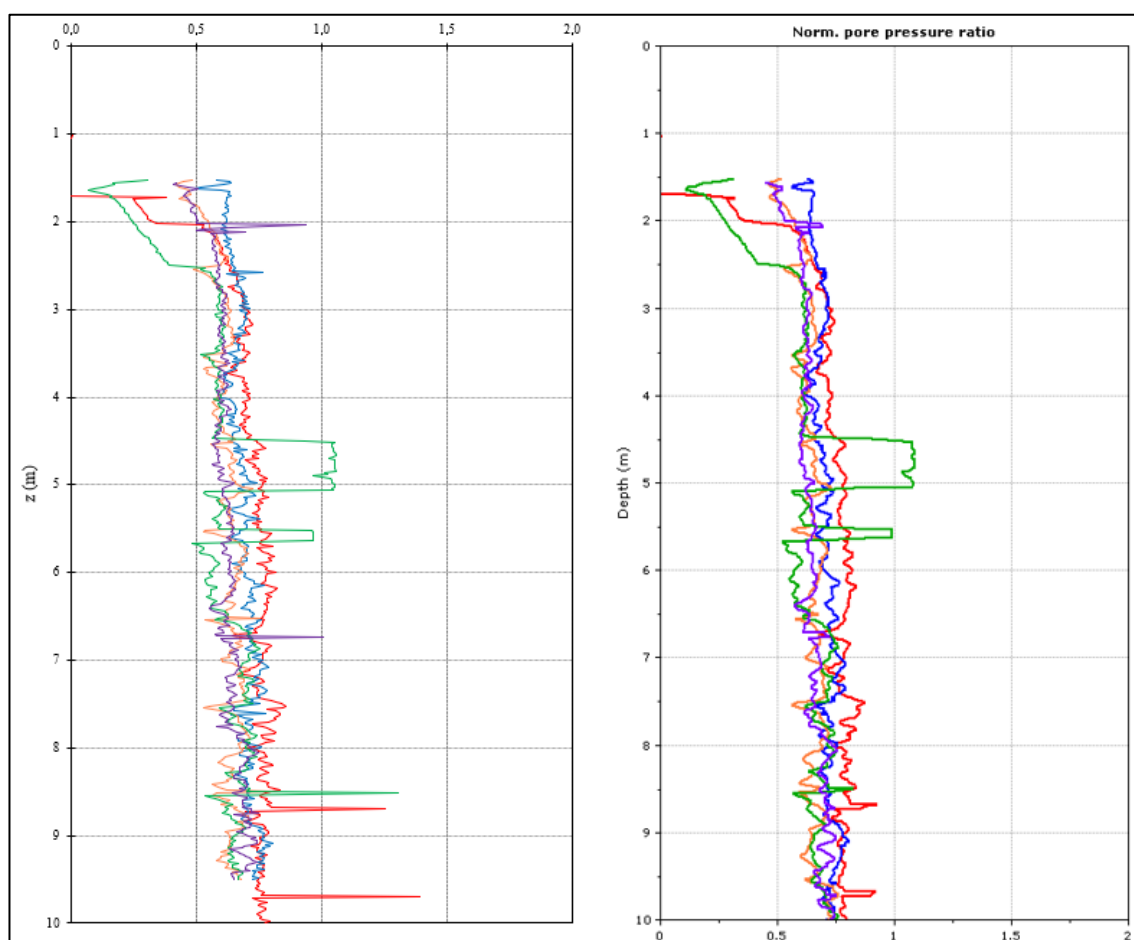


KUVIO 24. Normalisoitu kitkasuhde F_r käyrät, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-ohjelmiston tulostuskäyrät

Tulkintaohjelmiston antama normalisoidun kitkasuhteen antama käyrä ei vastaa vertailuaineiston normalisoidun kitkasuhteen käyrää. Alussa nähdään, että molemmat käyrät käyvät huippuarvossa 3,76 syvyydellä 1,14 m. Tämän jälkeen tulkintaohjelmiston käyrät saavat vähitellen suurempia arvoja ja syvyydessä 6,74 m huippuarvo on 4,22 kun vertailuaineiston arvo samalla syvyydellä on noin 2,5. Syytä tähän ei saatu varmistettua.

Normalisoitu huokospainesuhde B_q

Huokospainesuhde B_q määritellään sen hetkiselä tasolla syntyvän huokospai-
neen ja korjatun nettokärvastuksen väliseksi suhteeksi kaavan 13 mukaisesti. Huokospainesuhdetta käytetään maaperän käyttäytymistyyppi SBT-luokituk-
sessa, jota on käsitelty kappaleessa 5.2. Maaperän profilointi ja maaperätyyppi. Kuviossa 25 on huokospainesuhteen vertailuaineiston (Di Buò, 2020) tulos ja oh-
jelmiston tulos. Normalisoidun huokospainesuhteen tulokset liitteissä 1 – 5 sivulla 2.

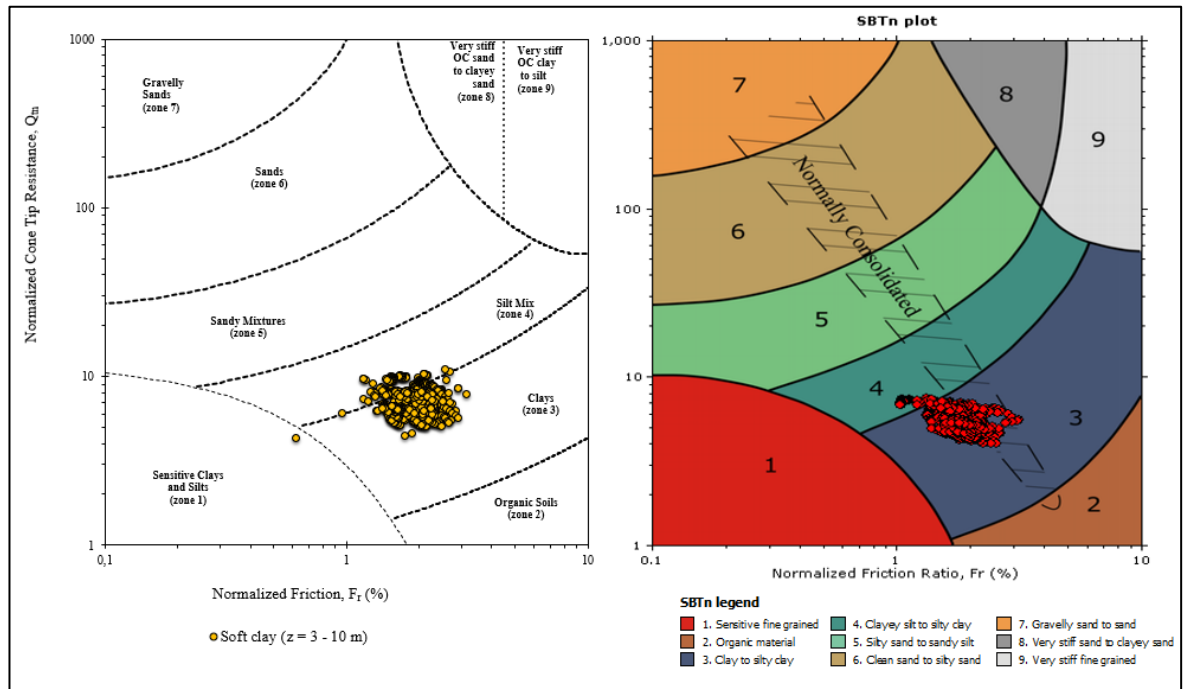


KUVIO 25. Normalisoitu huokospainesuhde B_q käyrät, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT tulokäyrät

Normalisoidun huokospainesuhteen käyrät vastaavat hyvin vertailuaineiston tuloksia. Sama aiemmin nähty kärkevyyden q_t laskun muutos nähdään huokospainesuhteen B_q nousuna samalla syvyydellä.

7.3. SBTn-kuvaajat

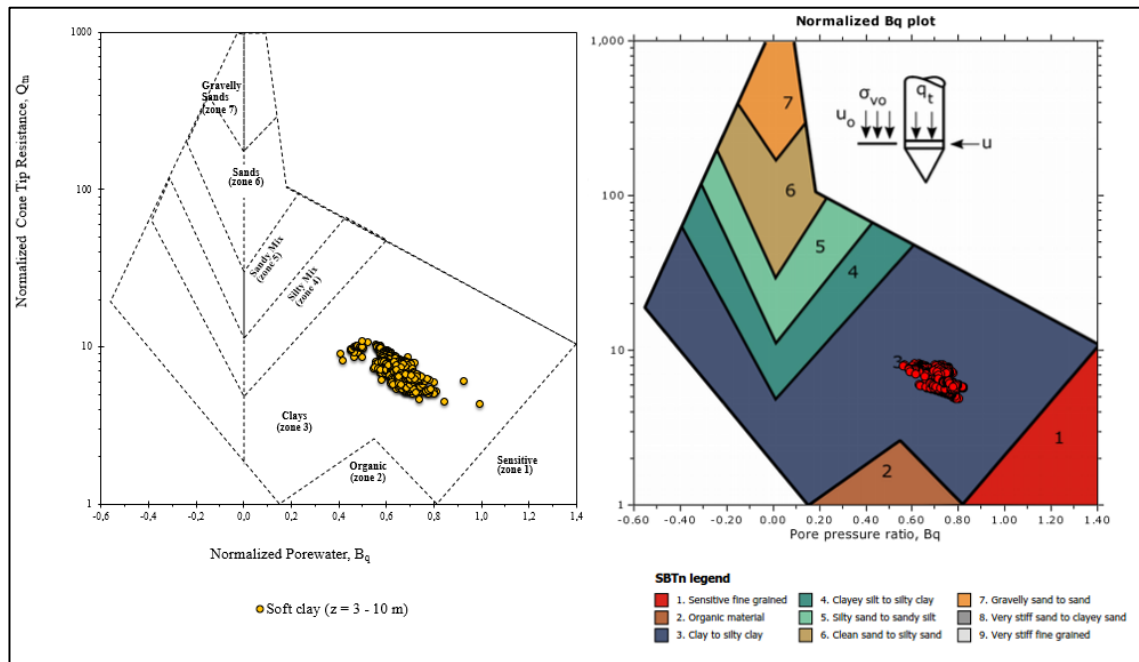
Huokospainesuhteen B_q ja kitkasuhteen F_r avulla määritellään maaperän käyttäytymistyyppi SBT. Useimmiten kuvaajat esitetään normalisoidun kärkevyyden Q_t suhteen, mikä ottaa huomioon maassa vallitsevan tehokkaan pystyjännityksen. Huomioitava on myös, että maalajimääritys ja maaperän käyttäytymistyyppiluokitus ovat eri asioita. Vasemmalla puolella kuviossa 26 on esitetty vertailuaineiston (Di Buò, 2020) normalisoituun kitkasuhteeseen perustuva SBTn-kuvaaja, missä on kaikkien Maskussa tehtyjen kairauksen tulokset syvyydellä 3–10 m. Oikealla puolella on esitetty normalisoidun kitkasuhteeseen perustuva edustavin tulos kairauksesta T2, johtuen siitä, ettei ohjelmisto tulostanut pisteitä raporttiin. Kitkasuhde- normalisoitu kärkevyys SBTn- kuvaajat liitteissä 1–5 sivulla 3.



KUVIO 26. Kitkasuhteeseen F_r perustuvat normalisoidut SBTn-kuvaajat, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT kuvaajat

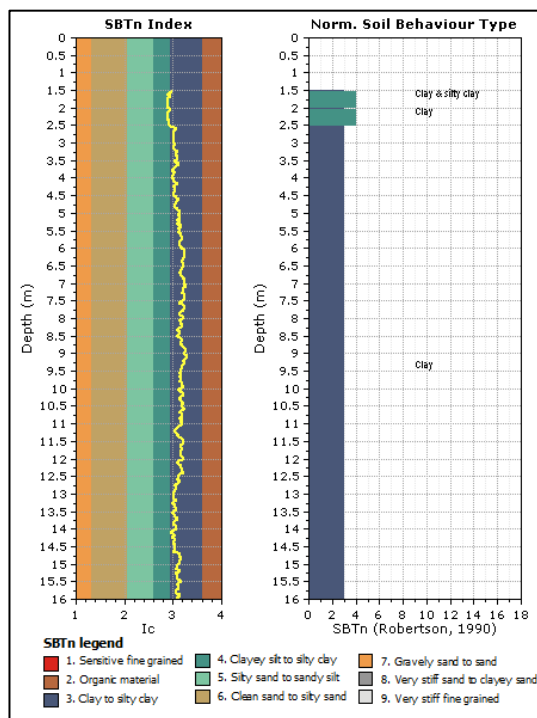
Kuviossa 27 on esitetty normalisoidun huokospainesuhteeseen B_q perustuvat SBTn-kuvaajat. Vasemmalla vertailuaineiston kuvaaja ja oikealla edustavin

SBTn-kuvaaja kairauksesta T2. Huokospainesuhde B_q - normalisoitu kärkivastus Q_t SBTn -kuvaajat liitteissä 1–5 sivulla 3.



KUVIO 27. Huokospainesuhteeseen B_q perustuvat normalisoidut SBT-kuvaajat, vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT tulostykäyrät

Pystyprofiilina SBTn-kuvaaja kairauksesta T2 on esitetty kuviossa 28. Kuviossa myös vasemmalla on tulkintaohjelmiston SBT indeksi I_c esitettynä jatkuvana tuloksena syvyyden suhteen.

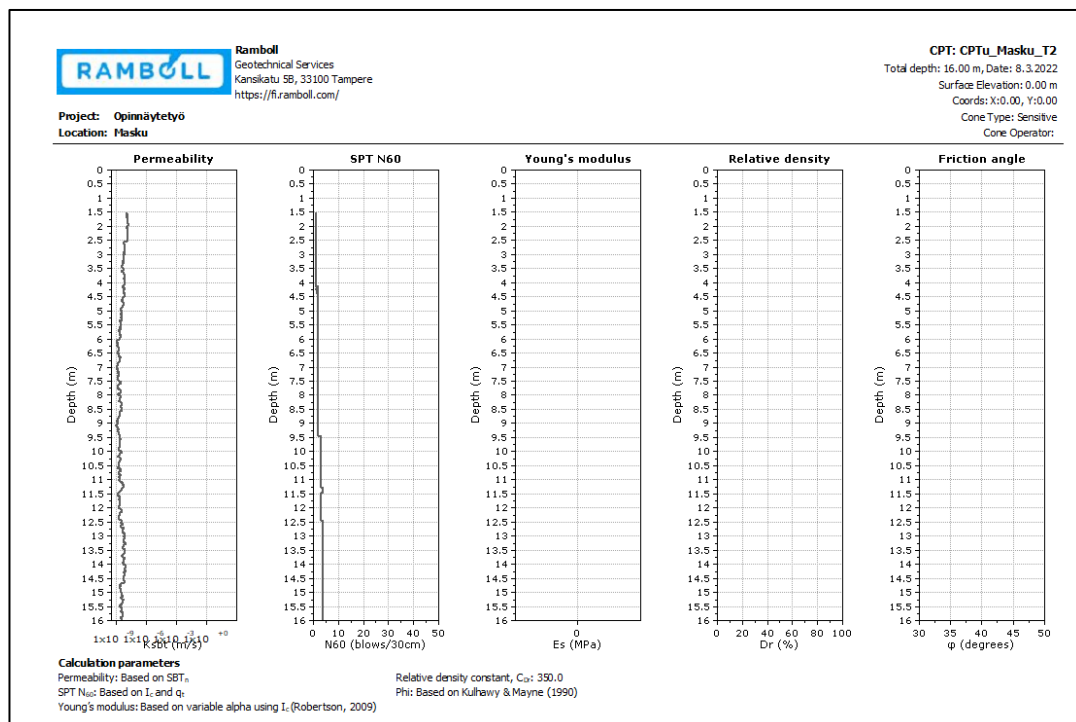


Kuvio 28. SBT indeksi I_c ja normalisoitu SBT kuvaaja syvyyden suhteen

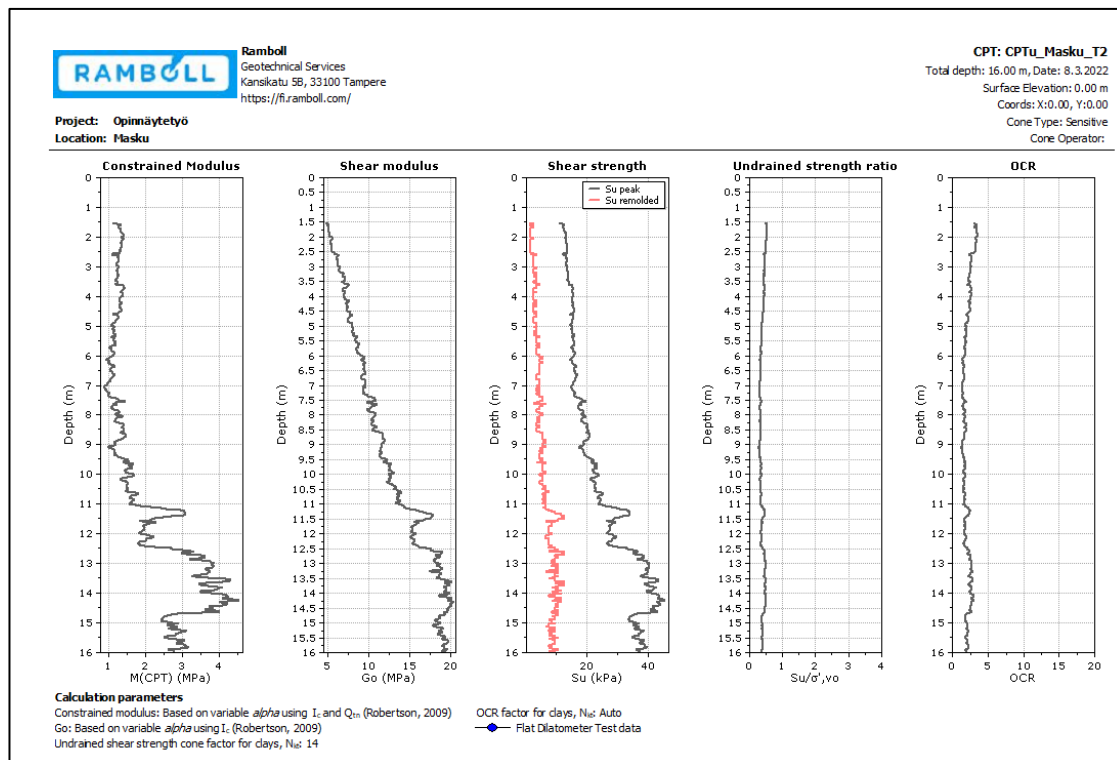
7.4. Geoteknisten parametrien arviot

Tulkintaohjelmisto laskee arvoja määrätyle parametreille, jotka perustuvat mitattuun tietoon. Oleellinen asia on ymmärtää, että vaikka tulkintaohjelmisto antaa arvoja määrätyle parametreille kuten esimerkiksi kokoonpuristuvuusmoduuli, suljettu leikkauslujuus, ylikonsolidaatioaste, kitkakulma ja sensitiivisyys ne ovat silti vain tulkintaohjelmiston antamia arvioituja tuloksia. Nämä arviot perustuvat laskentakaavoihin, joita on esitelty jo useita kappaleessa 5.3. CPTu tulkinna geotekniset parametrit. Kuvioissa 29, 30 ja 31 on esitetty parametrien arvioita.

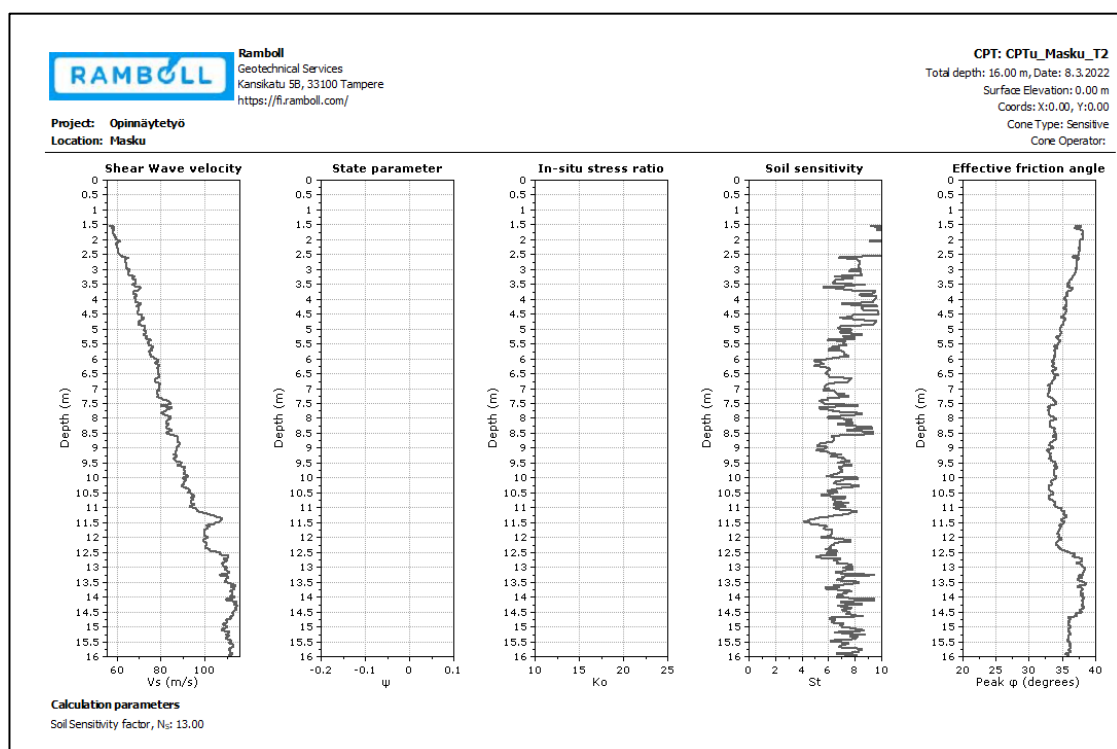
Arvioiduissa tuloksissa nähdään, ettei tulkintaohjelmisto esitä parametrille arvioita ollenkaan, jos ohjelmiston laskentakaavassa on rajattu laskenta ainoastaan karkearakeisille maalajeille. Rajaus tehdään SBT indeksin I_c määrittelyn perusteella. Kuten kuviossa 29 nähdään, tulkintaohjelmisto ei esitä arvioita karkearakeisen maan parametreille, kuten suhteelliselle tiiveydelle, kimmokertoimelle tai kitkakulmalle lainkaan.



kokoonpuristuvuusmoduulia, koska osassa tehdyistä CPTu-kairauksissa oli käytössä myös seisminen moduuli.



KUVIO 30. Tulkintaohjelmiston arviot eri parametreille syvyyden suhteen



KUVIO 31. Tulkintaohjelmiston arviot eri parametreille syvyyden suhteen

7.5. Tulosten tarkastelu

Tulkintaohjelmisto antaa arvioita maaperäparametreille, mutta tulkintaohjelmiston arvioimat tulokset eivät ole sellaisenaan käytettäviä. Kahden parametrien arvioita voidaan kuitenkin kalibroida suomalaiselle savelle määriteltyjen yhtälöiden avulla, joita Selänpää on tarkastellut väitöskirjassaan (Selänpää 2022). Nämä kaavat on kalibroitu ja ovat käyttökelpoisia, silloin kun maaperäolosuhteet ovat samankaltaiset, kun tutkimuksessa on esitetty. Näistä tarkastellaan ylikonsolidaatioasteen OCR määrittelyä sekä suljetun leikkauslujuuden s_u suuruuden arviointia kärkekertoimelle N_{kt} määritellyn arvon avulla. Väitöskirjassaan Selänpää on esittänyt useita yhtälöitä suomalaisen saven ylikonsolidaatioasteen ja suljetun leikkauslujuuden arviointiin perustuen CPTu -kairauksista saatuun jatkuvaan mitausarvioon syvyyden suhteen. (Selänpää 2022, 198.)

OCR

Tulkintaohjelmisto yliarvioi ylikonsolidaatioasteen OCR. Taulukossa 10 on esitetty Maskusta ödometrikokeesta saadut arvot eri näytteenottosyvyyksillä sekä CPTu kairauksista saadut tulkintaohjelmiston arvioimat arvot samalta syvyydeltä. Kairaukset ja näytteenotto on tehty samalla alueella lähellä toisiaan.

TAULUKKO 10. Maskussa ödometrikokeesta määritetyt arvot ORC:lle ja tulkintaohjelmiston arvioimat arvot ORC:lle

Syvyys (m)	OCR _{oed}	T1 OCR Arvio	T2 OCR Arvio	T3 OCR Arvio	T4 OCR Arvio	T5 OCR Arvio
2,84	1,85	2,23	2,45	2,49	2,41	2,41
2,99	1,95	2,21	2,46	2,46	2,43	2,44
3,15	1,89	2,17	2,42	2,47	2,35	2,41
5,15	1,77	1,71	2,08	1,91	1,64	2,14
5,15	1,74	1,70	2,10	1,96	1,62	2,13
7,96	1,17	1,57	1,77	1,98	1,63	1,66
8,15	1,41	1,56	1,81	2,00	1,64	1,74

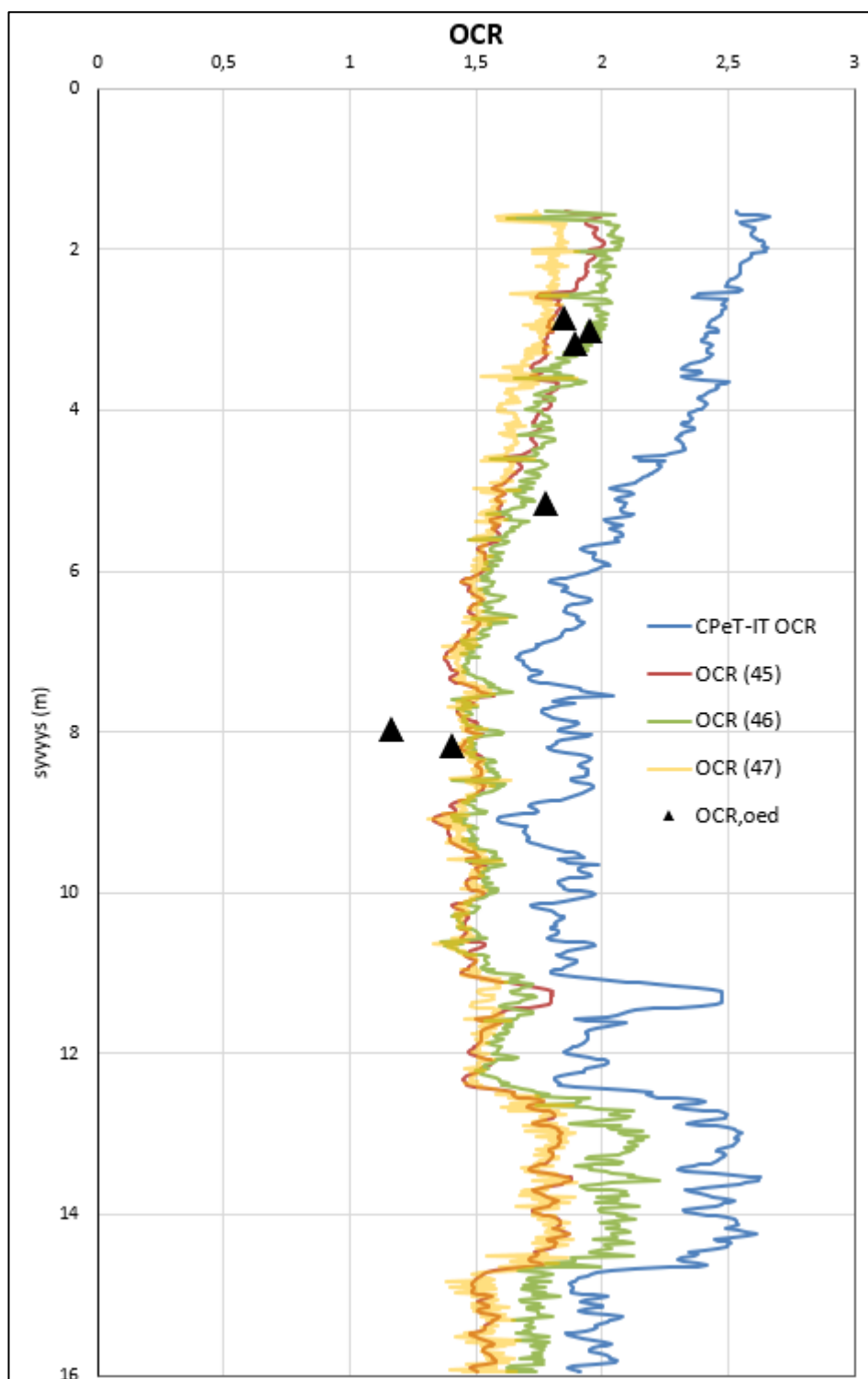
Tulkintaohjelmisto esittää arvioituja tuloksia, joita on kalibroitava paikallisten maaperäolosuhteiden mukaiseksi. Ylikonsolidaatioasteen arvioituja tuloksia voidaan kalibroida kaavojen 45,46 ja 47 avulla. (Selänpää 2022, 198.)

$$OCR = 0,173 \cdot \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} + 0,533 \quad (45)$$

$$OCR = 0,370 \cdot \frac{u_2 - u_0}{\sigma'_{v0}} + 0,013 \quad (46)$$

$$OCR = (1,607 \cdot B_q - 0,582) \cdot \frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \quad (47)$$

Kuviossa 32 on esitetty kaavojen 45, 46 ja 47 avulla kalibroidut arvot ylikonsolidaatioasteelle savelle eri syvyyksissä. Sinisellä esitetty tulos on ohjelmiston antama arvio ylikonsolidaatioasteesta OCR. CPTu kairauksesta saatavatulos on jatkuvaa mittausdataa syvyyden suhteen. Saatavat tulokset ovat useita satoja rivejä käsittäviä numeroarvoja, jotka perustuvat eri laskentakaavoihin. Näitä yksittäisiä pistetuloksia voidaan korrelaatioyhtälöiden avulla korjata taulukkolaskennan avulla, jolloin koko käyrä korjaantuu kokonaisuudessaan vastaamaan suomalaiselle savityypille saatuja ödometrikokeen tuloksia. Kuviossa 32 voidaan nähdä miten korrelaatiokaavoilla 41, 42 ja 43 korjatut käyrät korreloivat hyvin ödometrikokeesta saatuihin tuloksiin nähden. Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset liitteissä 1–5 sivulla 4.

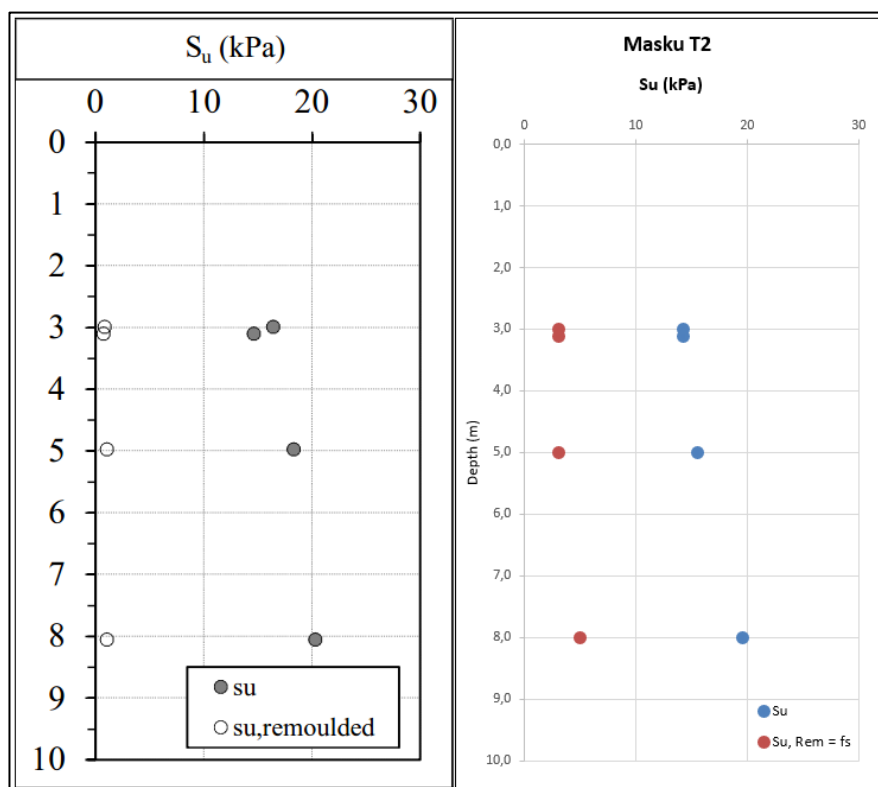


KUVIO 32. Ylikonsolidaatioasteen OCR suuruuden arvioinnin tulokset korrelaatioyhtälöiden avulla Maskussa

Suljettu leikkauslujuus s_u

Tulkintaohjelmistosta suoraan saatu suljetun leikkauslujuuden arvo on lähes samoissa arvoissa samalta syvyydeltä otettujen laboratoriotestien kanssa. Kuvi-

ossa 33 vasemmalla on laboratoriotulokset kartiokokeesta saadusta saven suljetusta leikkauslujuudesta s_u sekä häiritystä saven leikkauslujuudesta $s_{u,rem}$ Maskussa. Oikealla on arvio saven suljetulle leikkauslujuudelle ja häiritylle leikkauslujuudelle ohjelmiston CPTu-kairausten vastaavalla syvyydeltä luetun pisteen perusteella. Tulkintaohjelmistossa häirityn suljetun leikkauslujuuden ajatellaan vastaavan vaippavastuksen f_s arvoa. Suljetun leikkauslujuuden tulokset liitteissä 1–5 sivulla 5.



KUVIO 33. Vasemmalla saven suljettu leikkauslujuus ja häiritty suljettu leikkauslujuus (Di Buò, 2020) sekä tulkintaohjelmiston vastaava tulos

Tulkintaohjelmistosta saatavat tulokset ovat arvioita. Näitä saatuja parametrien arvoja ei siis voi sellaisenaan esimerkiksi laskelmien perusteena käyttää. Tulkintaohjelmistosta arvioitua saven suljettua leikkauslujuutta voidaan kuitenkin kalibroida Selänpään väitöskirjassaan esittämien yhtälöiden avulla. Selänpää (2022) on esittänyt useita eri korrelaatioyhtälöitä väitöskirjassaan, joiden avulla voidaan tulkintaohjelmiston antamaa tulosta kalibroida suomalaiselle savityypille sopivaksi. Tulkintaohjelmisto käyttää kärkeikertoimelle N_{kt} oletusarvoa 14. Tätä arvoa voidaan kuitenkin muokata sopivammaksi paikallisten olosuhteiden mukaan. Maskusta tulkintaohjelmiston antaman tuloksia on vertailtu Selänpään esittämiin korrelaatioyhtälöihin avulla saatuihin tuloksiin. Kuviossa 34 on esitetty lasketut

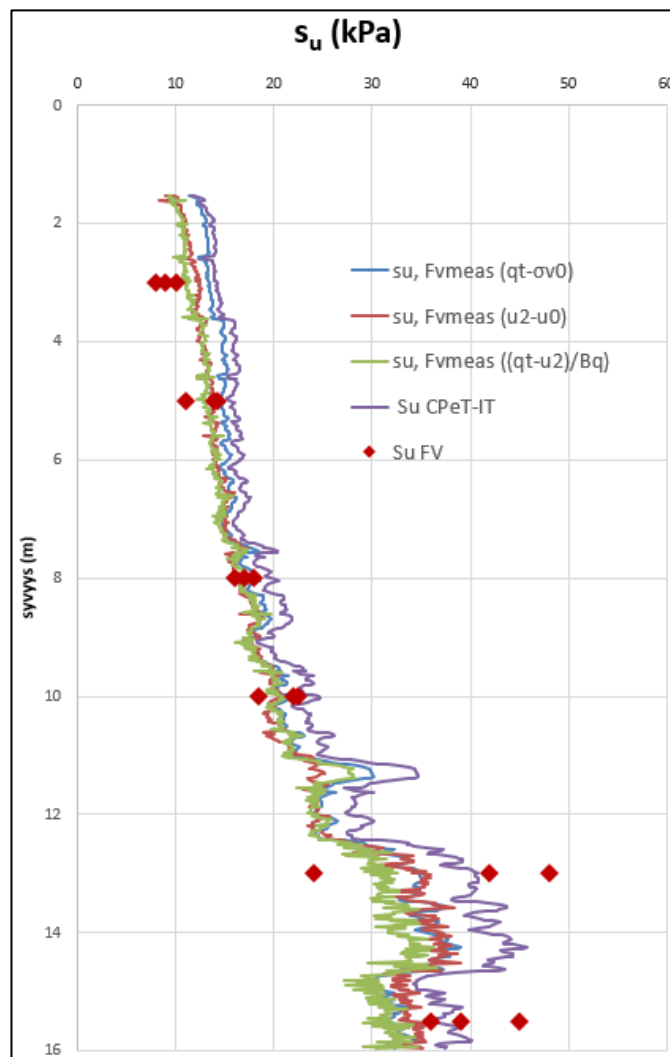
jatkuvat arvot suljetulle leikkauslujuudelle syvyyden mukaan kaavojen 48, 49, ja 50 perusteella sekä tulkintaohjelmiston tulos kärkikertoimen N_{kt} ollen 14.

$$s_{u,FVmeas} = 0,058 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) + 1,896 \quad (48)$$

$$s_{u,FVmeas} = 0,081 \cdot (u_2 - u_0) + 0,909 \quad (49)$$

$$s_{u,FVmeas} = \frac{q_t - u_2}{-15,407 \cdot B_q + 14,47} \quad (50)$$

Kuviosta 34 nähdään korrelaatioyhtälöiden vaikutukset tulkintaohjelmiston antamaan käyrään.



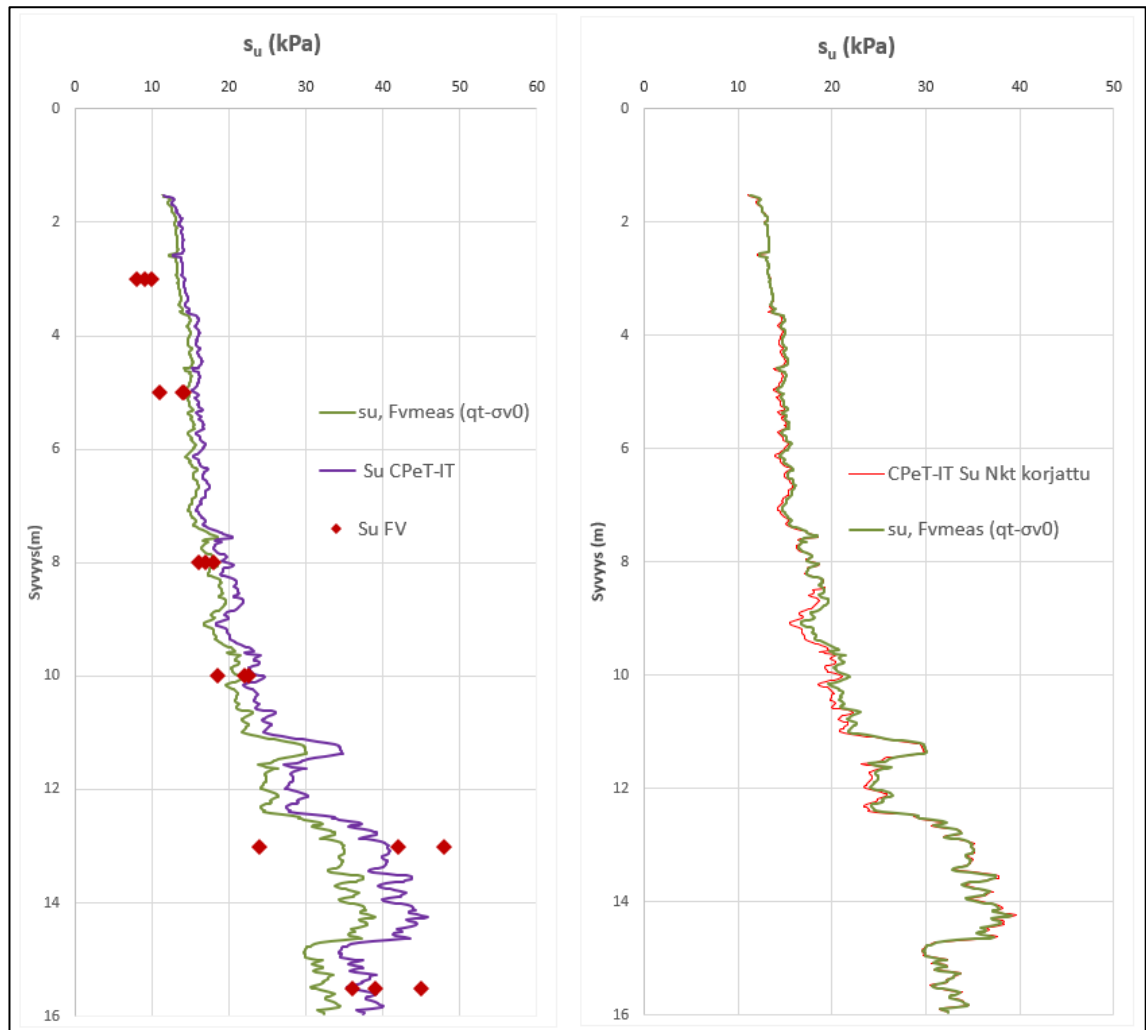
KUVIO 34. Suljettu leikkauslujuus määriteltynä tulkintaohjelmistosta, korrelaatiokaavojen 48,49 ja 50 avulla sekä mitatut siipikairaustulokset Maskusta (Selänpää, 2022)

Koska tulkintaohjelmiston suljetun leikkauslujuuden arviointi perustuu kärkekertoimeen N_{kt} , voidaan mitatun siipikairauslujuuden korrelaatiokaavoista käyttää ai-noastaan kaava 48. Korjaamalla kärkekertoimen N_{kt} arvoa eri syvyyksillä saadaan tulkintaohjelmiston antama arvio suljetulle leikkauslujuudelle eri syvyyksillä. Kärkekertoimen arvo eri syvyydellä saadaan kaavan 18 avulla. Sijoittamalla kaavaan 18, kaavasta 48 saatu suljetun leikkauslujuuden arvo $S_{u,FVmeas}$ saadaan kärkekertoimelle N_{kt} arvo jatkuvana syvyyden suhteen kaavan 51 mukaisesti.

$$N_{kt} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{S_{u,FVmeas}} = \quad (51)$$

$$= \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{0,058 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) + 1,896}$$

Saadut korjatut kärkekertoimen N_{kt} arvot viedään tulkintaohjelmistoon, jolloin saadaan korjattu arvo suljetulle leikkauslujuudelle. Arvot voidaan syöttää joko antamalla yksi arvo koko mittausdatalle tai määrittelemällä arvot eri syvyyksillä. Kuvi-ossa 35 on esitetyt käyrät ovat korrelaatiokaavan 48 antama käyrä ja tulkintaohjelmiston antama käyrä, missä käyttäjän määrittelemät kärkekertoimen arvot , jotka vaihtelevat eri syvyyksillä.

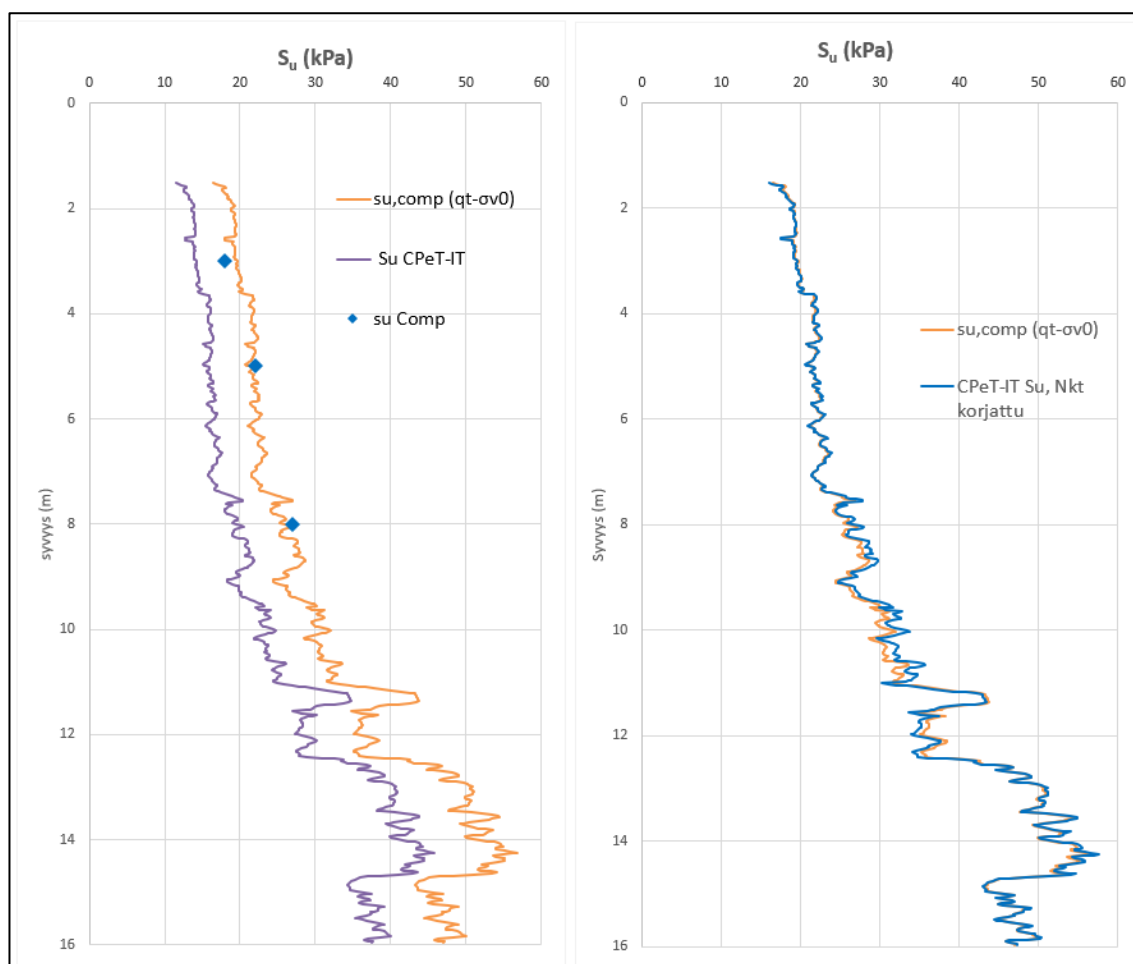


KUVIO 35. Korrelaatiokäyrä $s_{u,Fvmeas}$ ja tulkintaohjelmiston CPeT-IT käyrät sekä siipikairaustulokset Maskusta (Selänpää, 2022). Vasemmalla käyrä ennen kärkikertoimen korjausta ja oikealla korjatun kärkikertoimien N_{kt} arvojen mukaan määriteltä käyrä suljetulle leikkauslujuudelle.

Puristuskokeesta saatua suljettua leikkauslujuutta voidaan korreloida tulkintaohjelmistoon kaavan 52 avulla.

$$s_{u,Comp} = 0,084 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) + 2,913 \quad (52)$$

Kuviosta 36 nähdään korrelaatioyhtälön vaikutus tulkintaohjelmiston antamaan käyrään.



Kuvio 36. Korrelaatiokäyrä $S_{u,Comp}$ ja tulkintaohjelmiston CPeT-IT käyrät sekä puristuskokeen tulokset Maskussa (Selänpää, 2022). Vasemmalla käyrä ennen kärkekertoimen korjausta ja oikealla korjatun kärkekertoimien N_{kt} arvojen mukaan määriteltä käyrä suljetulle leikkauslujuudelle.

Selänpää on esittänyt useita korrelaatioyhtälöitä (Selänpää 2022, 198.). Osa yhtälöistä vaatii kuitenkin laboratoriotuloksia kuten juoksurajan w_L sekä plastisuusindeksi PI määrittelyn. Tulkintaohjelmistoon käyttöön soveltuvat korrelaatioyhtälöt 48 ja 52. Korrelaatioyhtälöiden tulokset liitteissä 1–5 sivulla 6.

Kokoonpuristuvuusmoduuli M

Kokoonpuristuvuusmoduulia M voidaan arvioida seismisen anturin avulla, joka mittaa leikkausaallonpituutta V_s . Taulukossa 11 on esitetty Perniössä tehdyistä CPTu- kairauksista mitatut arvot leikkausaallonpituudelle V_s sekä kaavojen 35 ja 36 avulla lasketut arviot kokoonpuristuvuusmoduulille M_0 sekä ödometrikokeen laboratoriotulokset kokoonpuristuvuusmoduulille (Di Buò, 2020). Näytteenotot

Perniön kohteella oli tehty kolmella eri menetelmällä. Vertailussa käytettiin Miniblock näytteenottomenetelmällä saatuja tuloksia. Kokoonpuristuvuusmoduulia M_0 on myös arvioitu tulkintaohjelmiston laskettujen arvioitujen tulosten perusteella taulukossa 12.

TAULUKKO 11. Kokoonpuristuvuusmoduulin M_0 suuruus Miniblock-näytteenottomenetelmällä laboratorion ödometrikokeesta Perniön kohteelta (Di Buò, 2020) sekä CPTu-kairauksen mitatuista arvoista suuruus kalibroitu kaavalla 36.

PERNIÖ		Miniblock		
Syvyys [m]	Laboratorio M_0 [Mpa]	V_s [m/s]	Laskettu M_0 [Mpa]	Kalibroitu M_0 [Mpa]
3,15	1,10	60,82	1,39	1,21
3,15	1,00	60,82	1,39	1,21
3,92	1,40	71,21	1,90	1,65
6,36	1,50	70,16	1,85	1,61
6,37	1,80	70,16	1,85	1,61
6,74	1,90	71,08	1,89	1,65
6,75	1,90	71,08	1,89	1,65

TAULUKKO 12. Kokoonpuristuvuusmoduulin M_0 arvioitu suuruus CPTu arvioituista tuloksista vastaavalla syvyydellä ja laboratorion ödometrikokeen tulokset Perniön kohteelta (Di Buò, 2020)

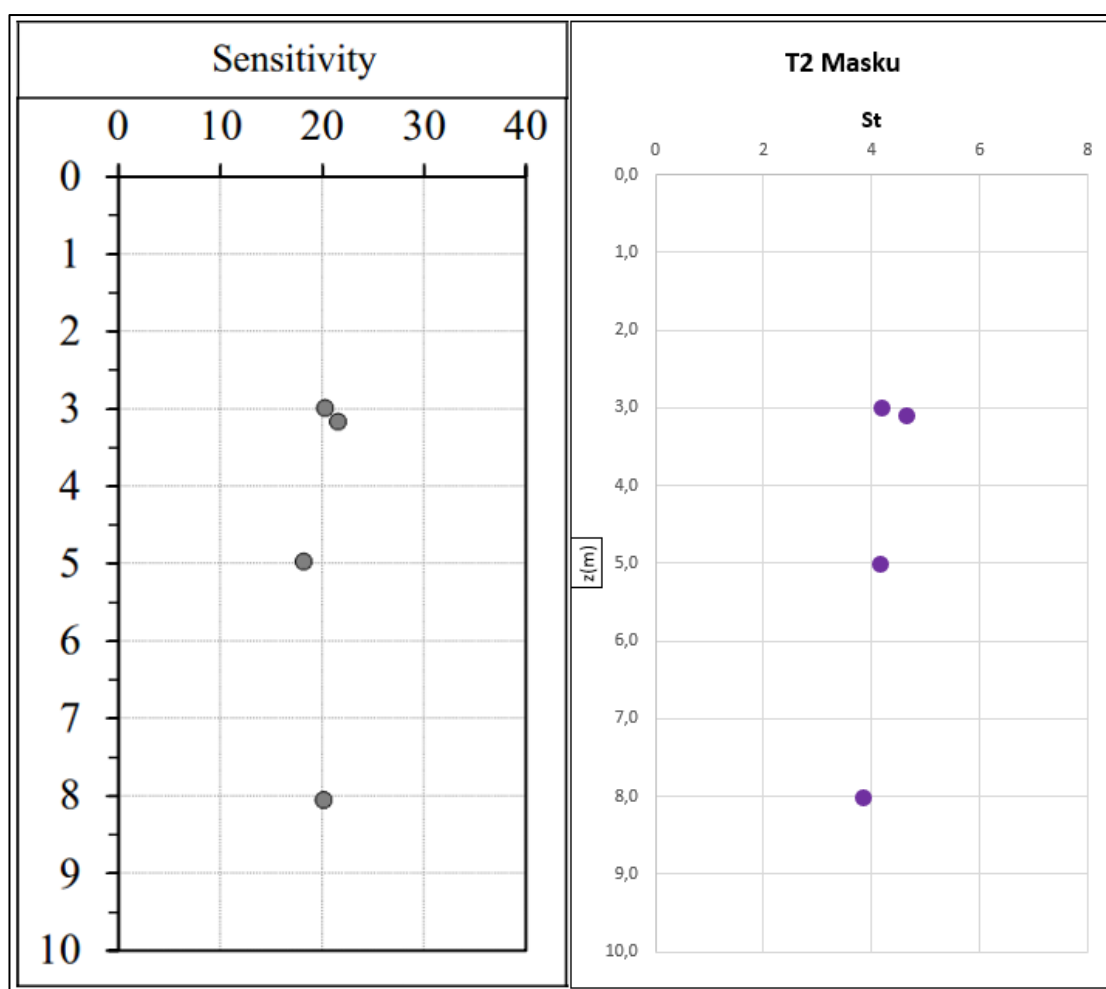
PERNIÖ		CPTu arvioit		
Syvyys [m]	Laboratorio M_0 [Mpa]	V_s [m/s]	Laskettu M_0 [Mpa]	Kalibroitu M_0 [Mpa]
3,14	1,10	58,20	1,27	1,11
3,16	1,00	58,29	1,27	1,11
3,92	1,40	60,65	1,38	1,20
6,36	1,50	70,23	1,85	1,61
6,38	1,80	70,27	1,85	1,61
6,74	1,90	73,84	2,04	1,78
6,76	1,90	73,07	2,00	1,74

Tulkintaohjelmistossa käytettiin tilavuuspainolle γ arvoa $14,5 \text{ kN/m}^3$ ja kärkekertoimelle arvot 14–15. Tulkintaohjelmistosta arvioitujen tulokset leikkausaallonnopeudelle, vastasivat hyvin mitattuja arvoja. Perniön kohteessa niiden perusteella kalibroidut tulokset vastasivat ödometrikokeesta saatuja arvoja. Paimiossa, Siipossa ja Maskussa kokoonpuristuvuusmoduulin arvioiminen onnistui kohtuullisen hyvin mutta Lempäälässä huonosti. Tämä saattoi johtua siitä, että kohteessa käytettiin ensimmäistä kertaa uutta näytteenottolaitetta (Selänpää 2022, 114.).

Liitteessä 6 on esitetty kaikista kohteista saadut eri testimenetelmillä kokoonpurrustuvuusmoduulin suuruuden arvioinnissa.

Sensiitiivisyys St

Tulkintaohjelmisto arvioi saven sensitiivisyyttä kaavalla 28. Tulkintaohjelmistosta saadut tulokset kairauksesta T2 Maskussa kuviossa 37 eivät vastaa vertailuaineiston (Di Buò, 2020) tuloksia. Myös muissa kohteissa arviot sensitiivisyydestä oli vastaavia, kun kuviossa 37 on esitetty. Kaavaa pitäisi muokata vastaamaan suomalaiselle savelle sopivaksi (Di Buò keskustelu). Normalisoidun kitkasuhteen F_r tarkastelussa ilmi tullut poikkeama tulostäyrissä (kuvio 24) vaikuttaa sensitiivisyyden arviointiin kaavan 28 mukaisesti pienentäen arviota enemmän.



KUVIO 37. Vasemmalla laborioritokset sensitiivisyydestä Maskussa (Di Buò, 2020) sekä tulkintaohjelmiston vastaava tulos

Robertson on suositellut, että sensitiivisyyden ja häirityn suljetun leikkauslujuuden arvoja käytetään vain ohjeellisina arvoina. (CPT-guide 2015, 38.)

Kitkakulma ϕ'

Tulkintaohjelmisto yliarvioi kitkakulman ϕ' . Selänpää on esittänyt kohteille arvioituja arvoja kitkakulmalle perustuen korrelaatioon Wood (1990). Taulukossa 13 on esitetty korrelaatioon perustuvat arvot ja tulkintaohjelmiston arvioimat arvot vastaavalla syvyydellä. (Selänpää 2022, 173.)

TAULUKKO 13. Kitkakulman ϕ' arviot (Selänpää 2022, 173.) ja CPeT-IT arviot

	Kitkakulma ϕ'	CPeT-IT ϕ'
Masku, 5 m	23,8	34,7
Paimio, 3,3 m	34,0	32,7
Paimio, 6,3 m	31,8	26,9
Perniö, 3,2 m	33,7	28,1
Sipoo, 2,9 m	35,8	25,7

Yksinkertainen tapa arvioida normaalikonsolidoituneen ja hieman ylikonsolidoituneen saven ja siltin ($c' = 0$) kitkakulmaa, NTH menetelmä, joka arvioi kitkakulmaa ϕ' korreloiden huokospainesuhteeseen B_q .

$$0,1 \leq B_q \leq 1,0$$

$$20^\circ \leq \phi' \leq 40^\circ$$

Tulkintaohjelmisto arvioi kitkakulmaa ϕ' kaavan 53 mukaan.

$$\phi' = 29,5^\circ \cdot B_q^{0,121} [0,256 + 0,336 \cdot B_q + \log Q_t], \quad (53)$$

Nämä kaikki menetelmät arvioivat kuitenkin kitkakulman ϕ' suomalaiselle savelle liian suureksi. Hienorakeisen maan kitkakulmalle ϕ' luotettavin määrittely saadaan laadukkaasta häiriintymättömän näytteenoton laboratoriotutkimuksista.

8 POHDINTA

Tavoitteet saavutettiin valitun CPeT-IT-tulkintaohjelmiston osalta. Soveltuvuus käytettäväksi CPTu-kairausten tulkintoihin yrityksessä todennettiin ja ohjelmisto otettiin yrityksen käyttöön. Voidaan todeta, että lähes kaikki vaaditut ominaisuudet löytyivät tulkintaohjelmistosta. Tarkasteluun valikoituneet tulkintaohjelmistot olisivat todennäköisesti täyttäneet tarkkuus- ja luotettavuusvaatimukset mutta selvä puute oli ohjelmistojen käytettävyyssongelmat. Oleellinen vaatimus oli löytää selkeä ja käyttäjäystävällinen tulkintaohjelmisto, joka helpottaisi CPTu-tulkinnan ymmärtämistä ja lisäisi CPTu- kairausten ohjelmointia pohjatutkimusohjelmiin.

Opinnäytetyötä tehdessä ja CPTu-kairaukseen perehtyessä kävi selväksi, ettei tulkinnan tekeminen voi onnistua, jos ei ymmärrä CPTu-kairausta. Tästä syystä kerrotaan CPTu- kairauksen tekemisestä ja siihen liittyvistä esivalmisteluista laajasti. CPTu-kairaus on menetelmänä hyvä ja erittäin tarkka. Laadukkaiden tulosten saamiseksi kairauksesta on kiinnitettävä erityisesti huomiota sekä kairauksen esivalmisteluihin että itse kairauksen tekemiseen. Konkreettiset havainnot kahdella eri kohteella, nostivat esiin asioita, joihin pitäisi puuttua.

Tulkintaohjelmiston tarkkuuden ja luotettavuuden tarkastelussa vertailtiin tulkintaohjelmiston antamia tuloksia FINCONE hankkeen tuloksiin. Hankkeessa kehitettiin CPTu-kairausta ja näytteenottoa pehmeissä savissa. CPeT-IT-ohjelmiston käytettävyyttä testattiin viemällä kairauksesta saatua raakadataa ohjelmistoon. Tutustuttiin tulkintaohjelmiston eri ominaisuuksiin ja toimintoihin. Ohjelmistosta saadaan kahdenlaisia tuloksia, laskettuja tuloksia mitatuista arvoista sekä useita arvioituja geoteknisiä parametreja. CPeT-IT-ohjelmistoa käyttämällä keskityttiin tarkastelemaan maaperän käyttäytymistyyppi-luokitusta sekä ja näiden kuvaajien määrittelyyn käytettävien lisäparametrien tarkkuutta. Vertailuaineistoon perustuen tarkasteltiin saven suljettua leikkauslujuutta, sensitiivisyyttä, ylikonsolidaatioastetta ja kokoonpuristuvuusmoduulia sekä kitkakulmaa. Saven suljettua leikkauslujuutta ja ylikonsolidaatioastetta tarkasteltiin kuitenkin tarkemmin. FINCONE hankkeen yhteydessä tehdyn väitöskirjatutkimuksen ja sen tuloksena saatuja korrelaatioyhtälöitä käytettiin tulkintaohjelmiston kanssa, jonka tuloksena saatiin suomalaiselle savityypille kalibroidut tulokset.

Asia mitä ei voi liikaa korostaa on se, että tulkintaohjelmiston tulkinnot ovat arvioita parametreista eivätkä ne ole sellaisenaan käytettäviä laskentoihin. Edelleen tarvitaan osaamista tulkintojen arvioimiseksi, geosuunnittelijan on ymmärrettävä tulkintaa. Tässä opinnäytetyössä käytetyt korrelaatioyhtälöt perustuvat määrätyn tyyppiselle savelle ja eivät sovi käytettäväksi kuin vastaavantyyppisiin saviin.

Se mitä jäi puuttumaan tulkintaohjelmistosta, oli laadunvarmistus. Tulkintaohjelmisto ei tunnista huonolaatuista mittausdataa. Tulkintaohjelmistossa ei myöskään ole eurostandardin mukaista käyttöluokkaluokitusta eikä siinä siten käsitellä luettuja nollalukema-arvoja lainkaan. Tulkintaohjelmisto ei lue infraformaatin mukaista tiedostoa vaan sitä on muokattava.

Tulkinnan tekemisen prosessia voidaan kehittää näiden esitettyjen puutteiden osalta. Raakadata on muokattava taulukkolaskentaohjelmalla tulkintaohjelmistolle ohjelmistoon sopivaksi. Taulukkolaskentaohjelmassa luodaan jokaiselle kohteessa tehdylle kairaukselle oma pohja, mihin raakadata tuodaan. Kun kairaukset ovat omalla pohjalla ja mitatut suureet määrättyissä sarakkeissa, on tiedostojen vienti CPeT-IT-ohjelmistoon helpompaa. Tähän samaan taulukkolaskenta pohjaan luodaan myös kairauksen laadunvarmistus, joka käsittelee CPTu-kairauksen nollalukema-arvot, käyttöluokat ja kokonaisvirheen. Laadunvarmistuksessa olisi myös huomioitava huokospaineen vaste ja negatiiviset arvot.

Kairausten käytännöissä on kuitenkin eroja, mikä tuli esille tämän opinnäytetyön tekemisen yhteydessä. Kairauksessa käytettävät laitteistot ovat erilaisia, joka vaikuttaa kairauksen tekemisen ohjeistukseen. Kairaajien ymmärtämättömyys ja välinpitämättömyys on myös selvästi ongelma, mihin pitäisi ehdottomasti puuttua kairausten laadun parantamiseksi. Kairaajilla ei ehkä ole riittävää tietämystä asioihin mitä CPTu-kairauksessa pitäisi varmistaa ennen kairausta tai ottaa huomioon kairauksen aikana. Ongelman vähentämiseen maastossa voisi auttaa mittauspöytäkirja, jonka avulla varmistetaan kairauksen onnistuminen maastossa. Mittauspöytäkirjan avulla voidaan myös tehdä tulkintaa, perehdytyksen riittävyydestä kairauksen tekemiseen. Geosuunnittelijan on CPTu-kairausta ohjelmoidessa pohjatutkimusohjelmaan esitettävä selkeämmin mitä kairauksella ha-

lutaan selvittää ja se, miten haluttu tulos saavutetaan. Näiden ongelmien tunnistaminen ja niihin puuttuminen lisää kairausmenetelmän käyttöä tulevaisuudessa.

Pohjatutkimusmenetelmän valinnassa kannattaa kiinnittää huomiota kustannuksiin. CPTu-kairauksessa käytettävä laitteisto on hankintahinnaltaan kallis mutta kairausmenetelmä on kustannustehokas, johtuen kairausten teon nopeudesta ja toistettavuudesta maastossa. Kairausmenetelmää valitessa kannattaakin miettiä koko rakennushankkeen kokonaiskustannuksia. Tarkemman kairausmenetelmän valinta rakennushankkeessa voi pienentää pohjarakennuskustannuksia verrattuna epätarkempaan menetelmään.

Vaikka CPTu-kairausta käytetään tällä hetkellä eniten hienorakeisten maalajien tutkimuksiin, ovat tulevaisuuden näkymät CPTu-kairausten kehityksessä valoisat. Tampereen yliopisto ja Väylävirasto aloittavat FINCONE 2 tutkimuksen. Tämä uusi tutkimushanke keskittyy laajentamaan CPTu-kairauksen käyttömahdollisuuksia siltti -ja hiekkamaille.

LÄHTEET

CPT-guide, 2015. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Pdf-tiedosto. Viitattu 3.1.2022.

<https://cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CPT%20Guide%206th%202015.pdf>

Di Buò, B. 2020. Evaluation of the Preconsolidation Stress and Deformation Characteristics of Finnish Clays based on Piezocone Testing. Tampereen yliopisto. Väitöskirja. Viitattu 5.3.2022

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1468-2>

Di Buò, B., D'Ignazio, M., Selänpää, J., Länsivaara, T., Mayne, P. W. 2020. Yield stress evaluation of Finnish clays based on analytical CPTu models Can. Geotech. J. Accepted. Pdf-tiedosto. Viitattu 5.3.2021

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202109247252>

D'Ignazio & Lehtonen 2021. Using SHANSEP for verification of unreliable piezocone data in clays. Pdf-tiedosto. Viitattu 5.3.2021

https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/133465/D_Ignazio_2021_IOP_Conf_Ser_Earth_Environ_Sci_710_012011.pdf

D'Ignazio, M., Phoon, K. K., Tan, S. A., Länsivaara, T. T. 2016. Correlations for undrained shear strength of Finnish soft clays Can. Geotech. J. 53(10) 1628–1645. Pdf-tiedosto. Viitattu 5.3.2021.

https://www.researchgate.net/publication/303958085_Correlations_for_undrained_shear_strength_of_Finnish_soft_clays

Gregg Drilling & Testing. 2013. CPTu dissipation tests – theory to practice. Verkkosivu. Viitattu 3.1.2022

<http://www.greggdrilling.com/webinars/CPTu-dissipation-tests-theory-and-practice/>

Kairausopas VI. Suomen geoteknillinen yhdistys Ry, 2001. Pdf-tiedosto. Viitattu 15.11.2021.

<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/kairausopas-6-CPTu-puristinkairaus-puristin-heijarikairaus.pdf>

Liikennevirasto 25/2015, 2015. CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. Pdf-tiedosto. Viitattu 15.11.2021.

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-25_CPTu-kairauskokeen_web.pdf

Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M. 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. London: Chapman & Hall.

Mayne, P.W. 2002. Interpretation of In-situ tests. Pdf-tiedosto. Viitattu 4.1.2022

<https://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/PiezoDissipation.pdf>

Sandven, R. 2010. Influence of test equipment and procedures on obtained accuracy in CPTU. Pdf-tiedosto. Viitattu 22.11.2021.

https://www.geoengineer.org/storage/publication/18453/publication_file/2692/KN1Sandven.pdf

Selänpää, J. 2021. CPTu kairauskoe, FINCONE hanke Väylävirasto & Tampereen yliopisto. Pdf-tiedosto. Viitattu 30.11.2021.

<https://sgy.fi/wp-content/uploads/2021/04/CPTu-koulutus-suunnittelijoille.pdf>

Selänpää, J. 2022 Derivation of CPTu Cone Factors for Undrained Shear Strength and OCR in Finnish Clays. Tampereen yliopisto. Väitöskirja. Pdf-tiedosto. Viitattu 11.3.2022

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/134994/978-952-03-2156-7.pdf>

SFS-EN ISO 22476-1+AC. Suomen standardoimisliitto SFS, 2013. Pdf-tiedosto. Viitattu 15.11.2021. Pääsy rajoitettu.

<https://online.sfs.fi/>

SGI. Statens Geotekniska institutet, 2015. CPT-sondering, utrustning – utförande – utvärdering En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Pdf-tiedosto. Viitattu 22.11.2021.

<https://sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i15.pdf>

Väylävirasto 14/2018. Penkereiden stabiliteetin laskentaohje. Pdf-tiedosto. Viitattu 11.3.2022

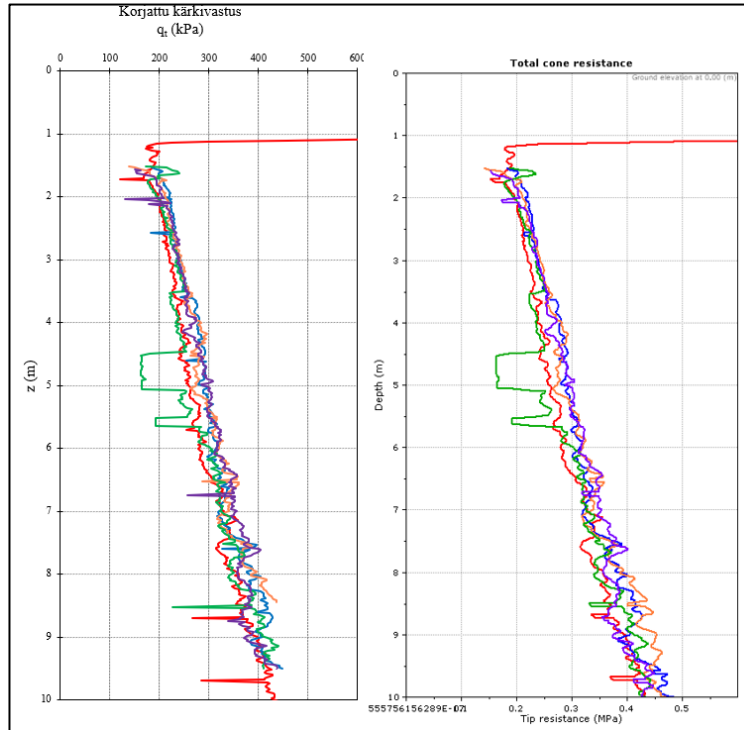
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-14_penkereiden_stabiliteetin_web.pdf

LIITTEET

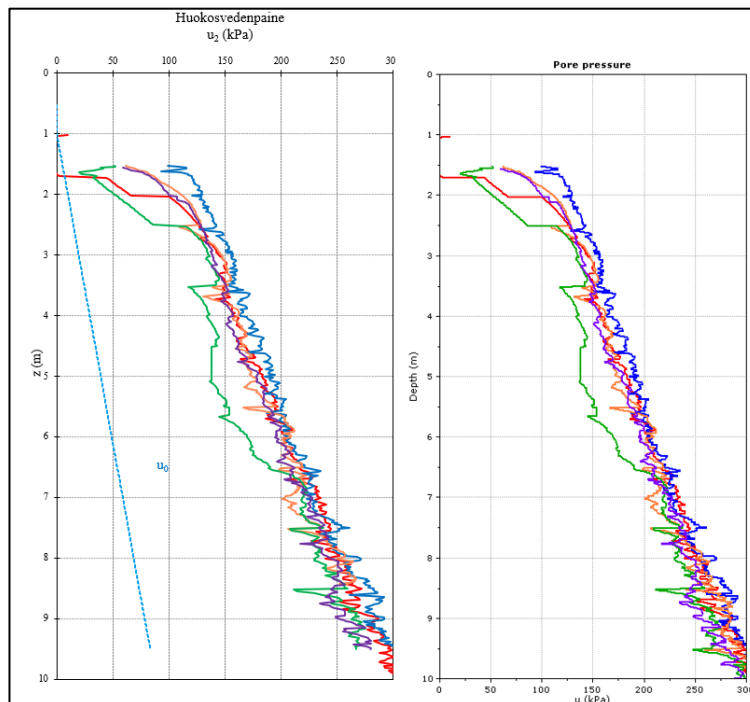
Liite 1. Masku

Korjattu kärkivastus q_t ja huokosvedenpaine u_2

1 (6)



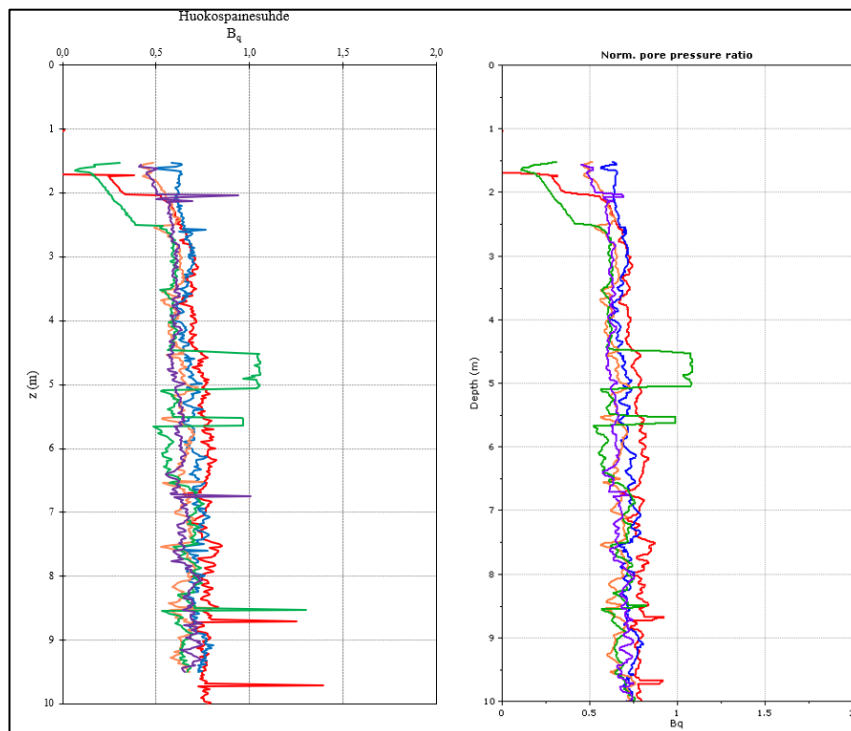
Vasemmalla korjatun kärkivastuksen q_t käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston vastaavat käyrät.



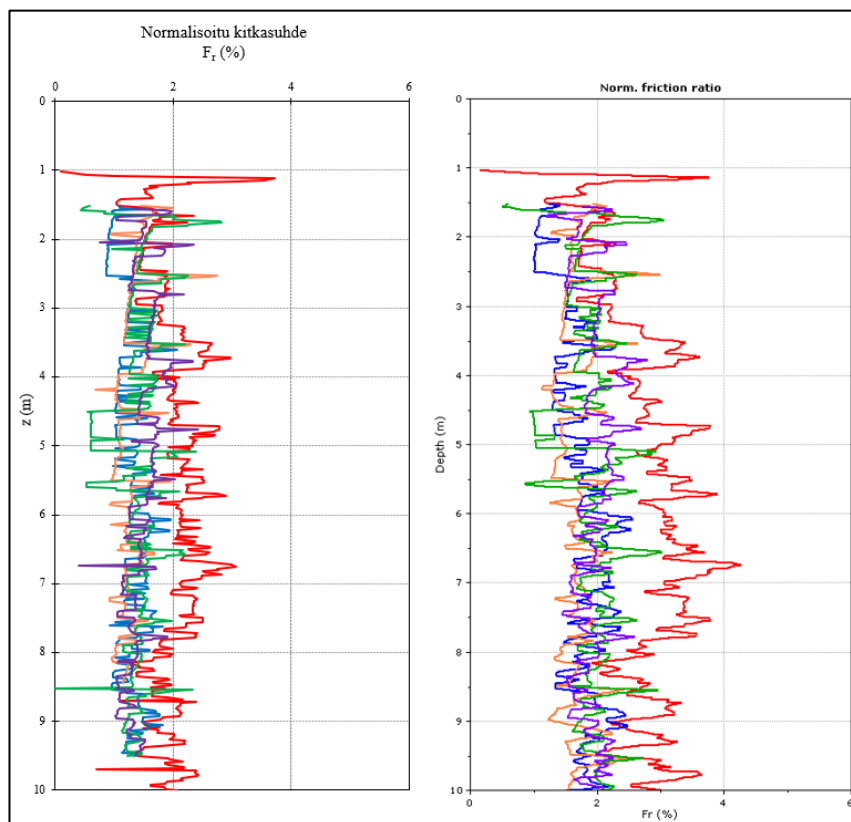
Vasemmalla mitatun huokospaineen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostkäyrät.

Huokospainesuhde B_q ja normalisoitu kitkasuhde F_r

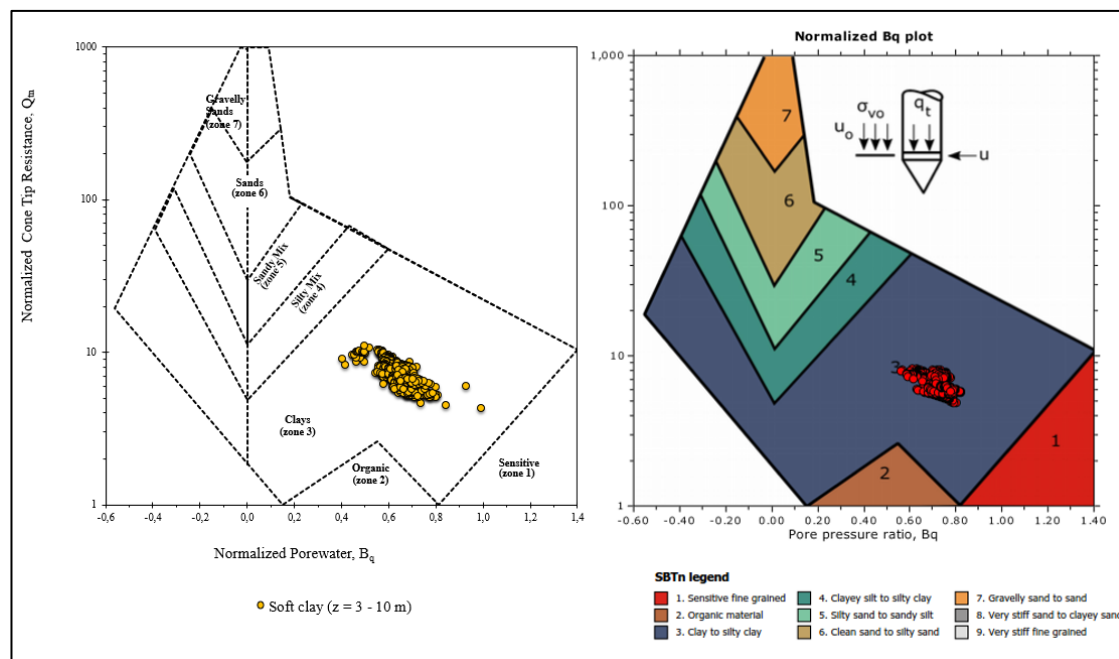
2 (6)



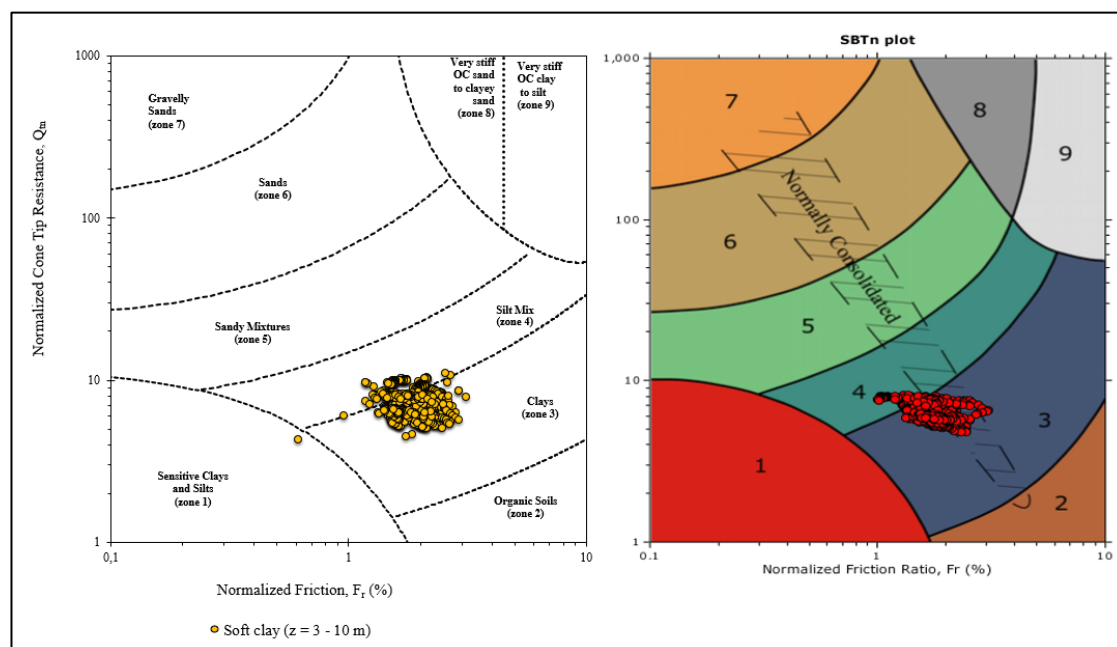
Vasemmalla huokospainesuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



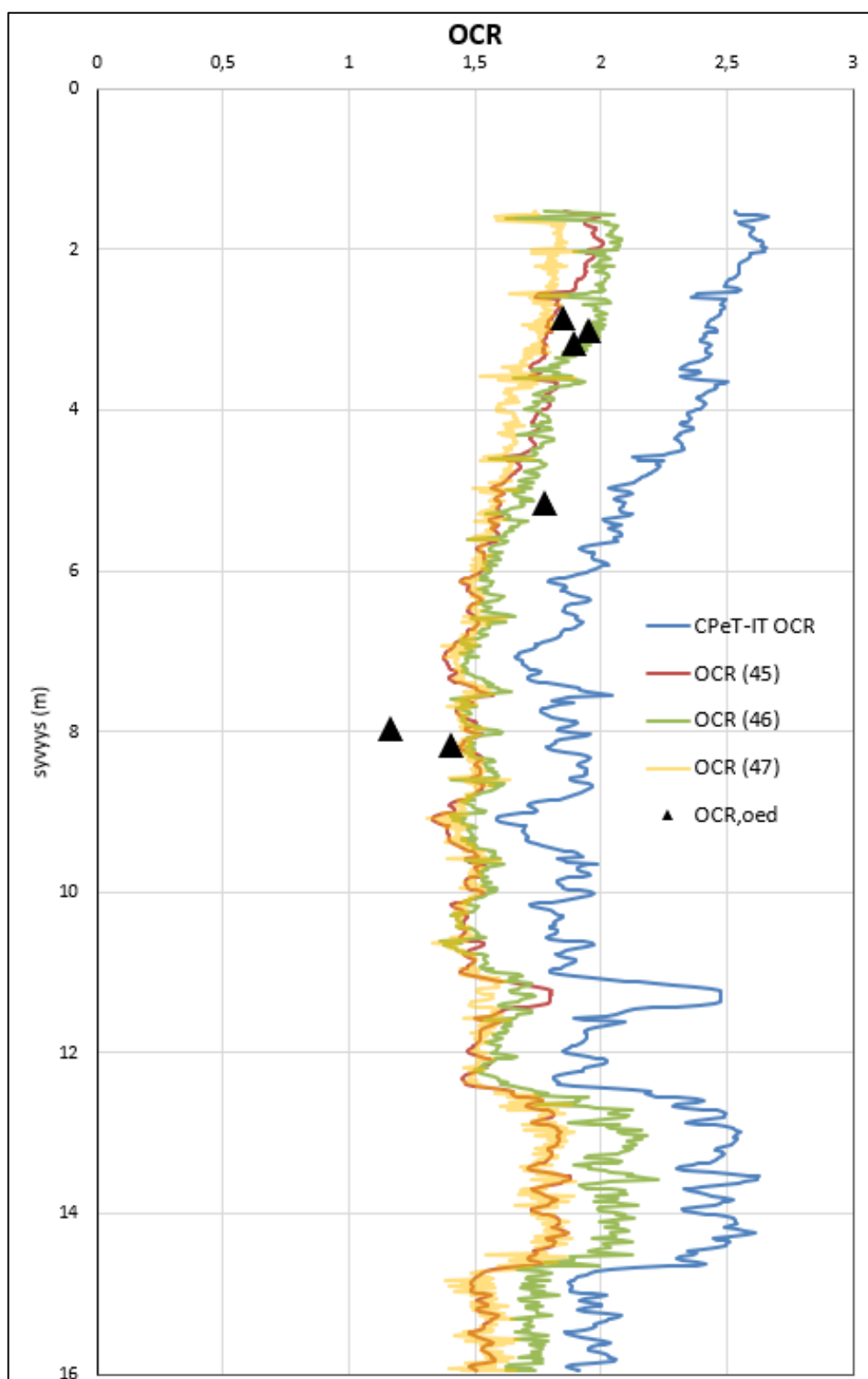
Vasemmalla normalisoidun kitkasuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja huokospainesuhteen B_q avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Maskussa tehdyistä kairauksista.



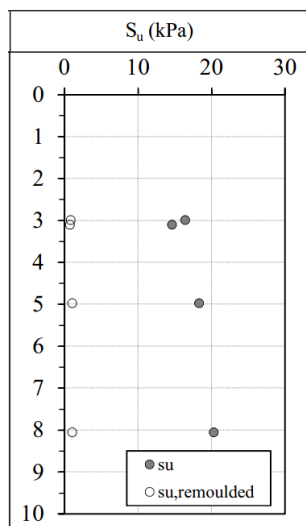
Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja kitkasuhteen F_r avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Maskussa tehdyistä kairauksista.



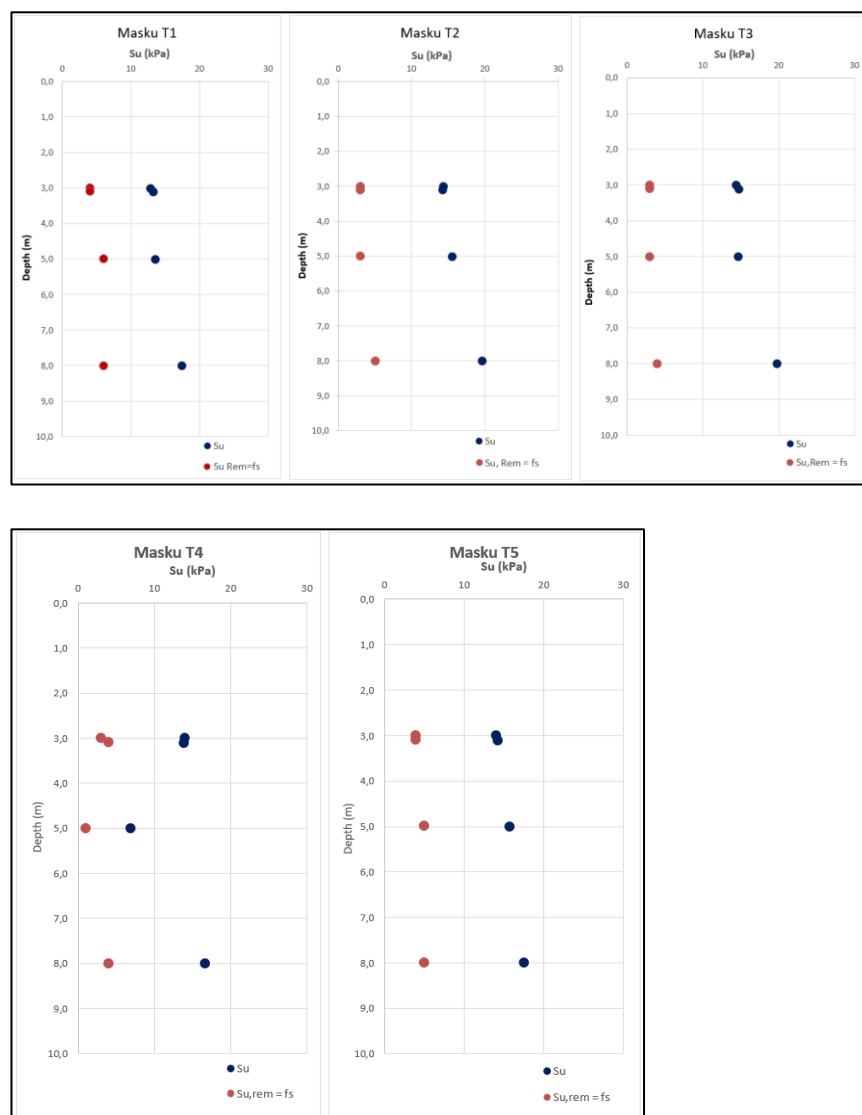
Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset ödometrikokeesta (Selänpää, 2022) sekä tulkintaohjelmiston käyrä ja käytettyjen korrelaatioyhtälöiden käyrät.

Suljettu leikkauslujuus

5 (6)



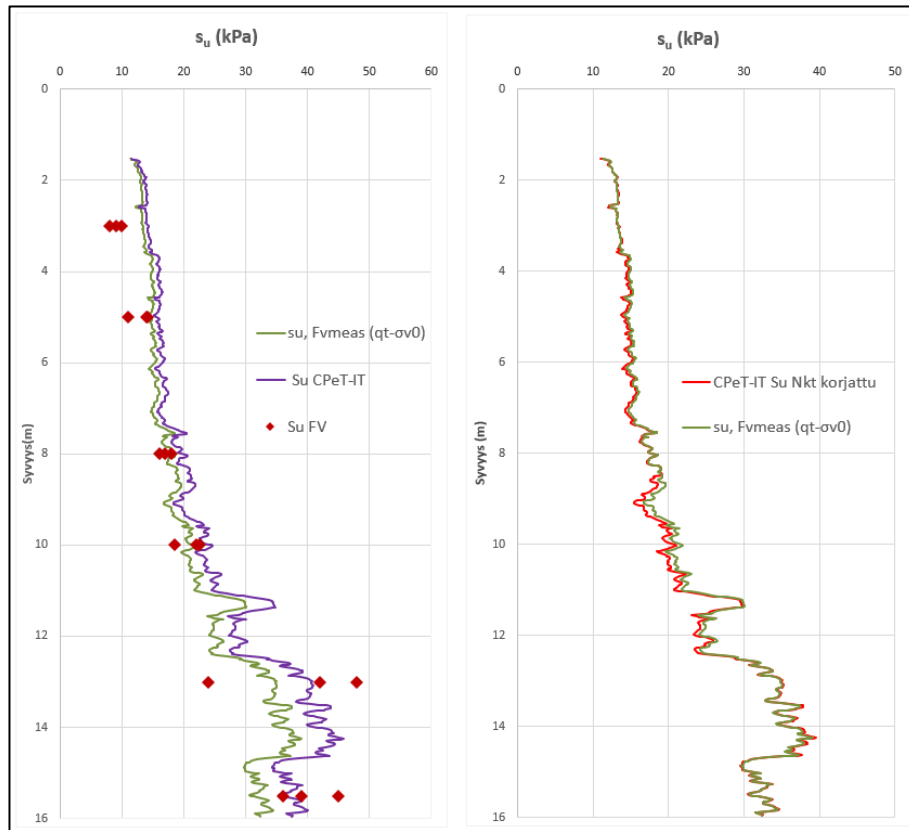
Suljettu leikkauslujuus kartiokokeesta laboratoriossa (Di Buò, 2020)



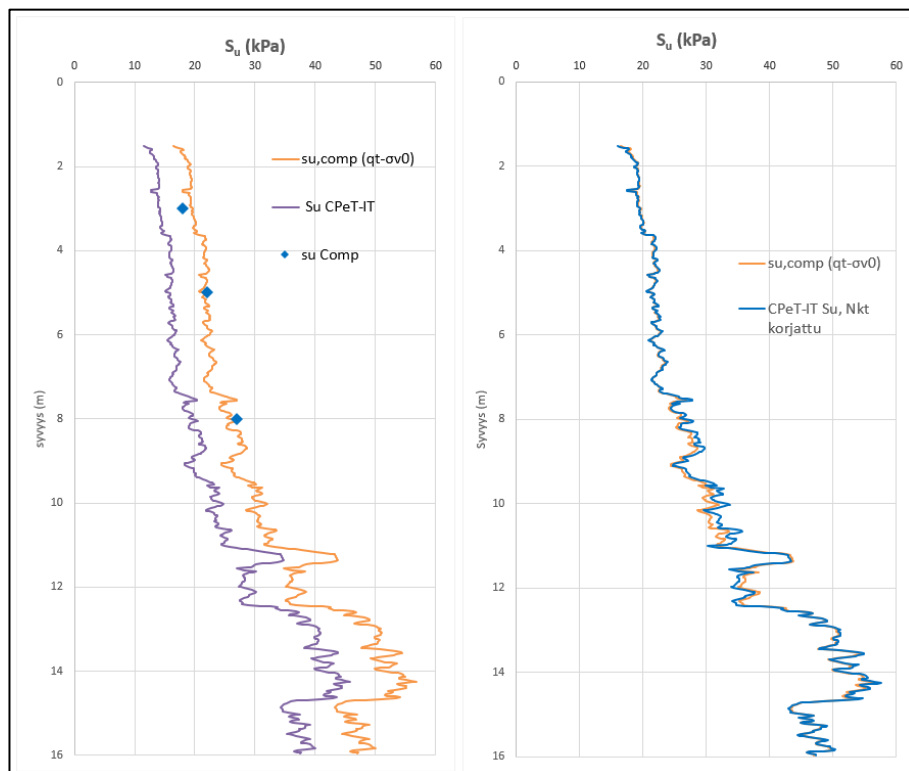
Suljettu leikkauslujuus S_u ja häiritty suljettu leikkauslujuus $S_{u,rem}$ eli vaippakitka f_s . Pisteet CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta näytteenottoa vastaavalta syvyydeltä.

Tuloskäyrät korrelaatio yhtälöille $s_{u,FVmeas}$ ja $s_{u,Comp}$

6 (6)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$ ja siipikairaus-tulokset (Selänpää, 2022)

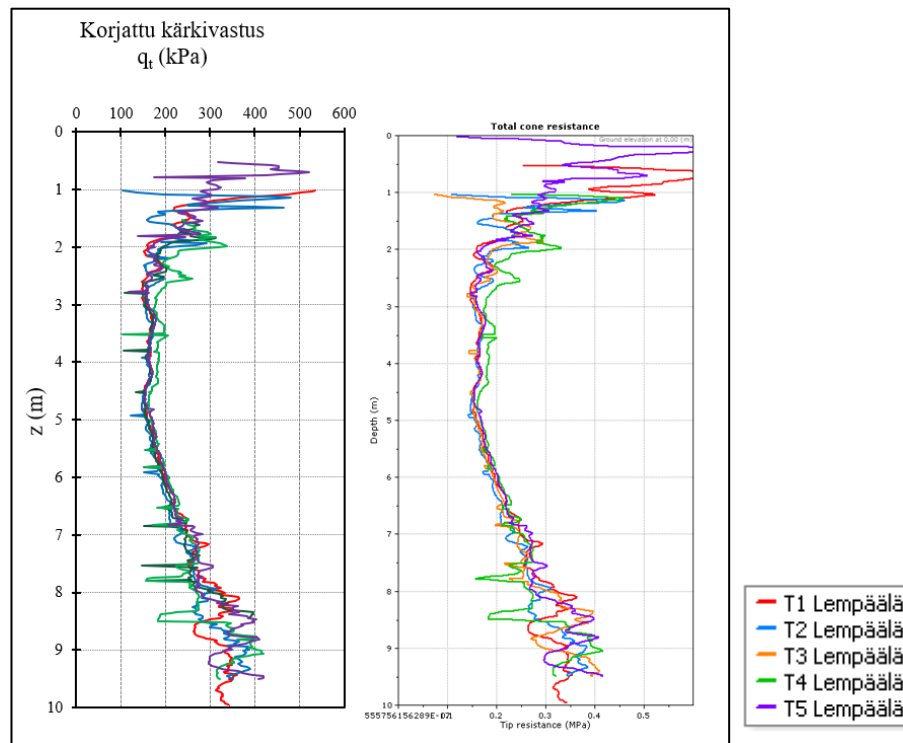


Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,Comp}$ ja puristusko-keen tulokset (Selänpää, 2022)

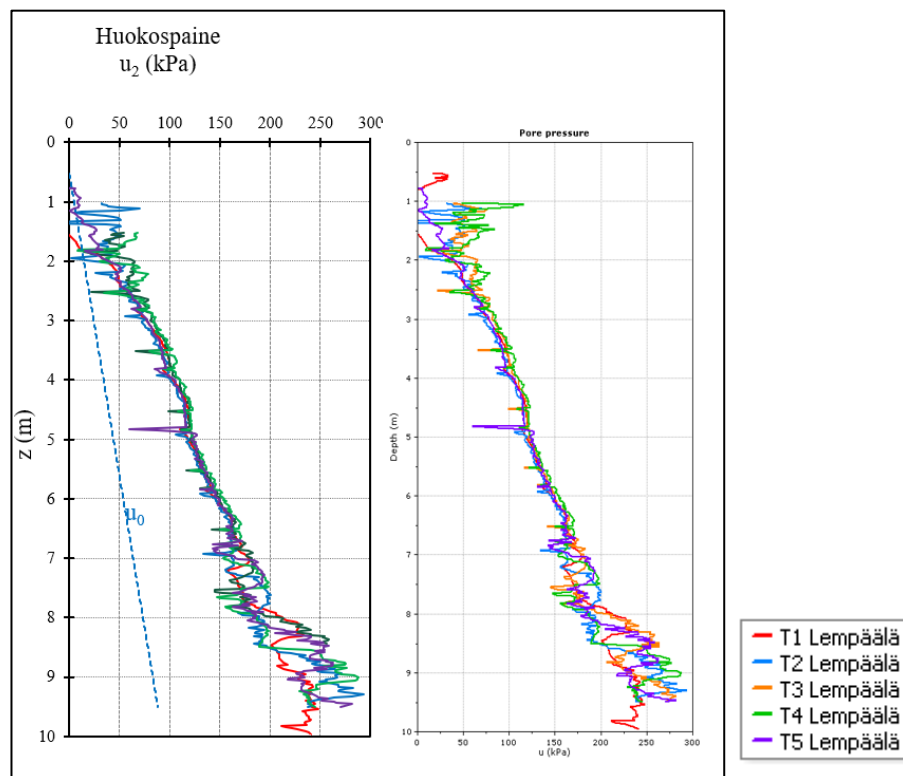
Liite 2. Lempäälä

Korjattu kärkivastus q_t ja huokosvedenpaine u_2

1 (6)



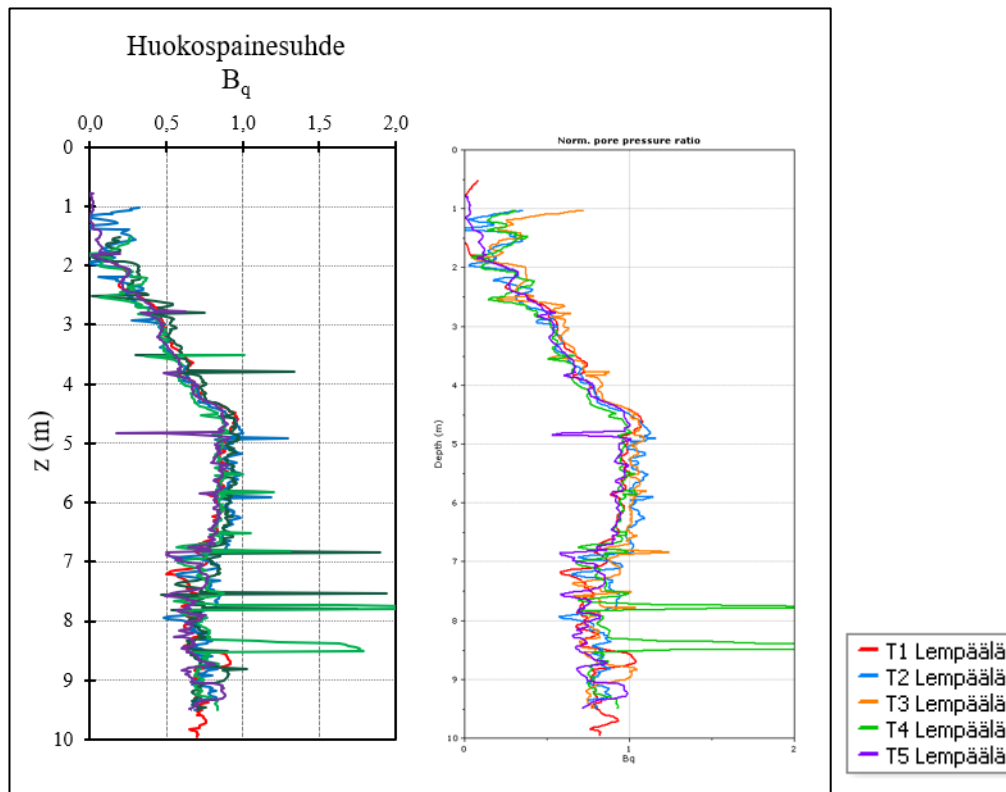
Vasemmalla korjatun kärkivastuksen q_t käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston vastaavat käyrät.



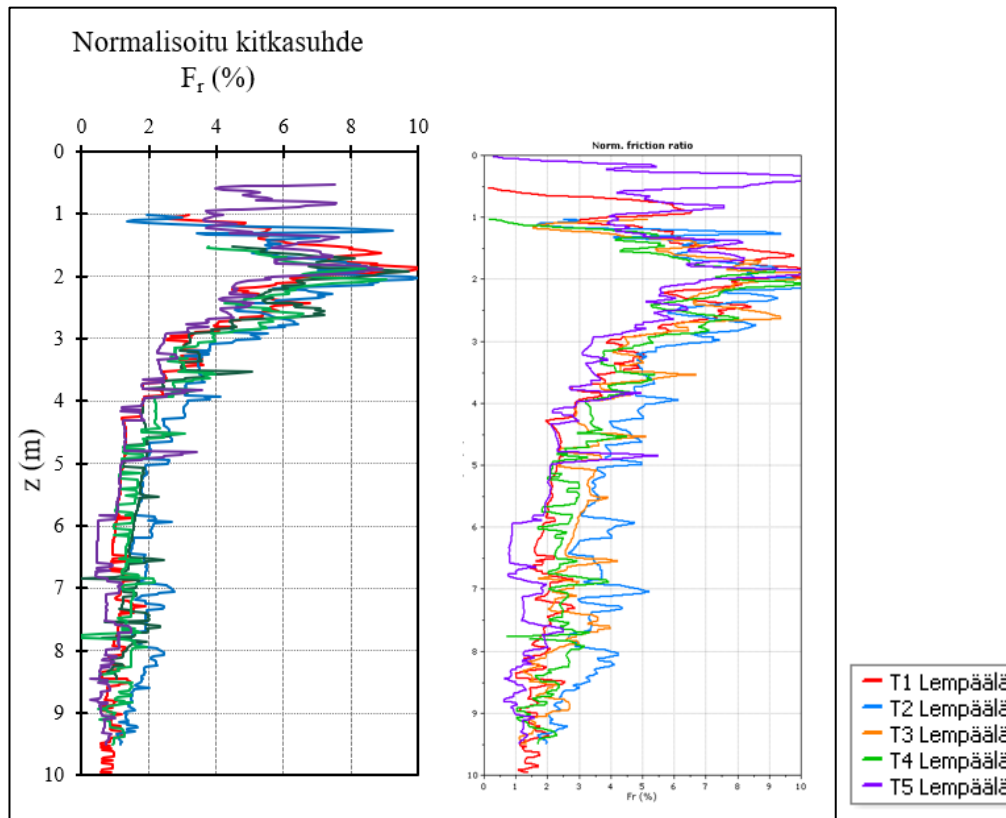
Vasemmalla mitatun huokospaineen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostkäyrät.

Huokospainesuhde B_q ja normalisoitu kitkasuhde F_r

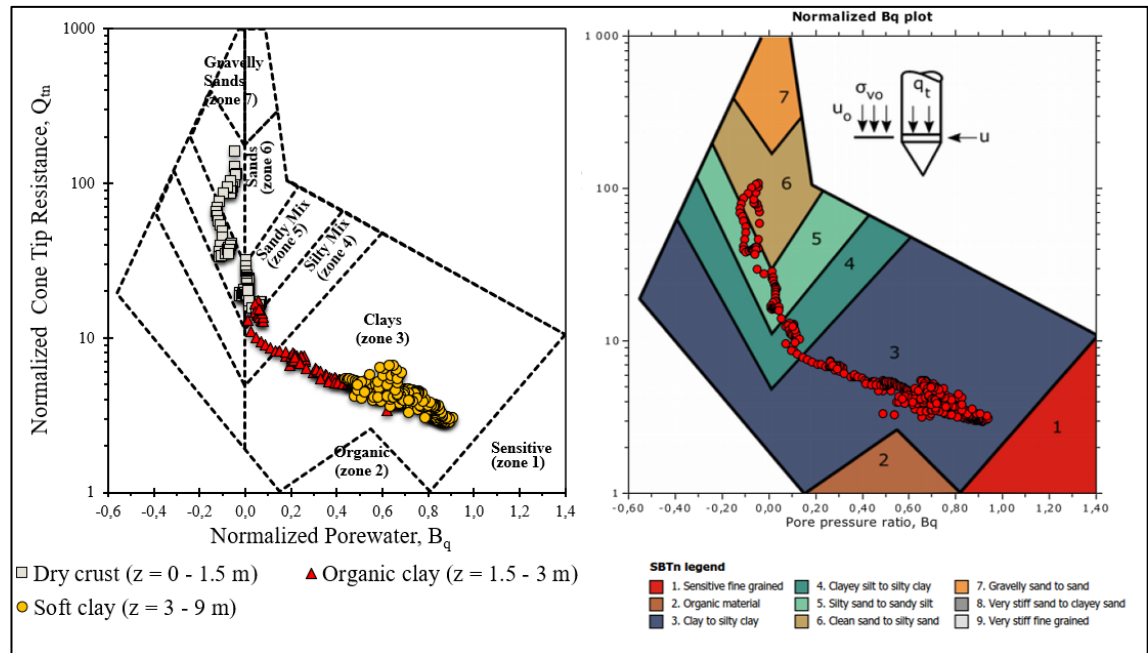
2 (6)



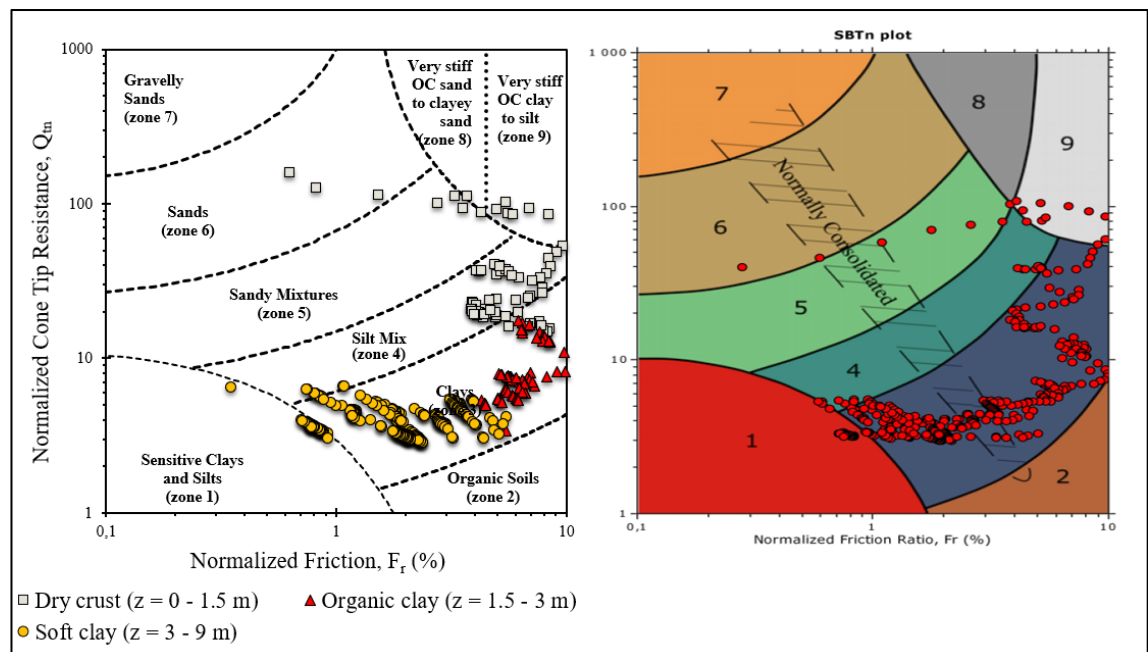
Vasemmalla huokospainesuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulospäyrät



Vasemmalla normalisoidun kitkasuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulospäyrät.

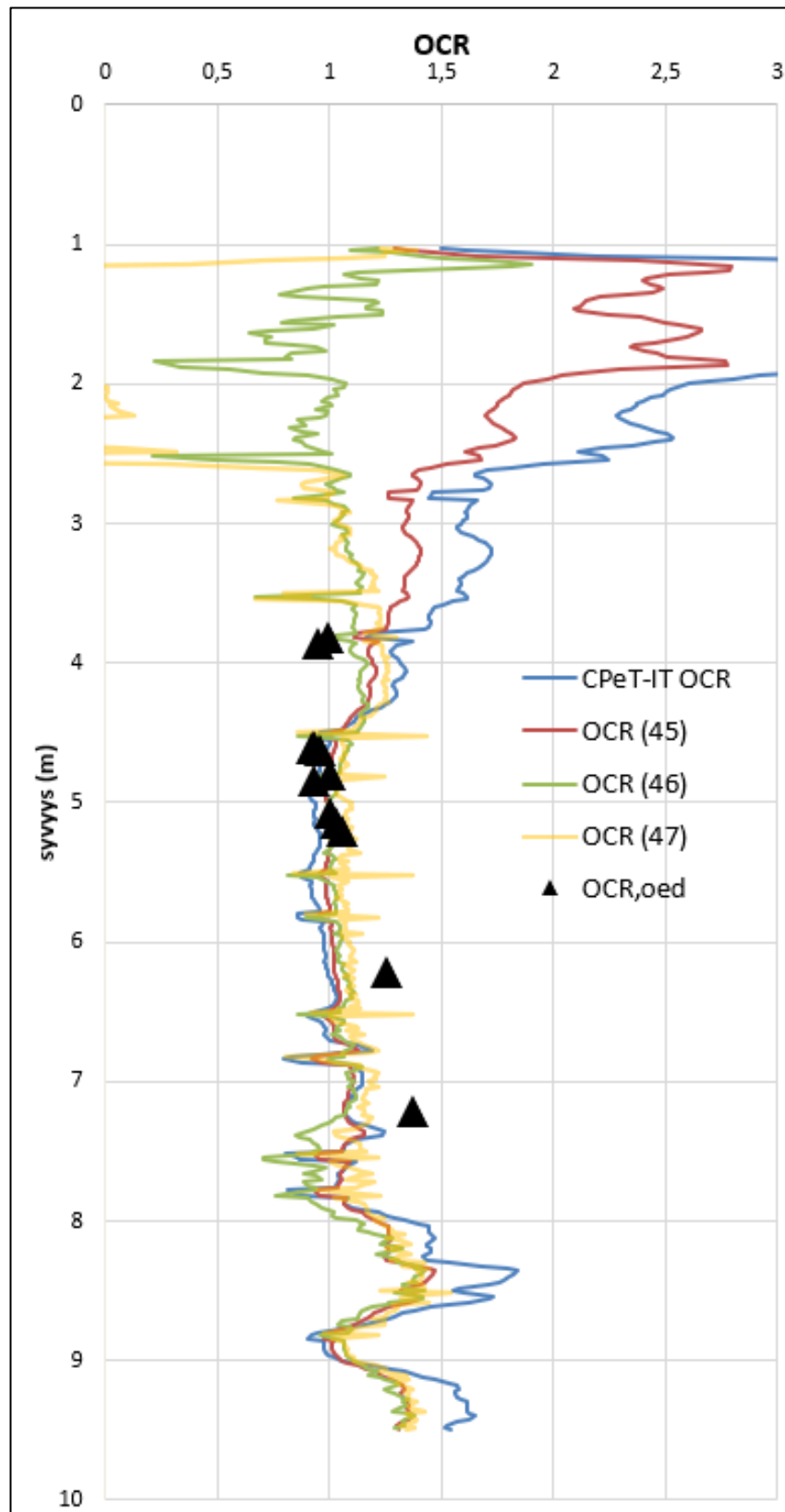


Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja huokospainesuhteen B_q avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla on edustavin tulos Lempäälässä tehdyistä kairauksista CPeT-IT tulkintaohjelmistosta.



Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja kitkasuhteen F_r avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla on edustavin tulos Lempäälässä tehdyistä kairauksista CPeT-IT tulkintaohjelmistosta.

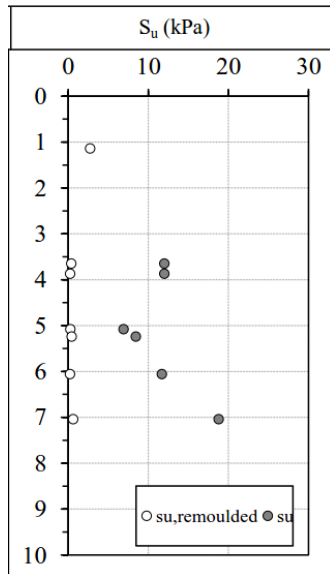
Ylikonsolidaatioaste OCR



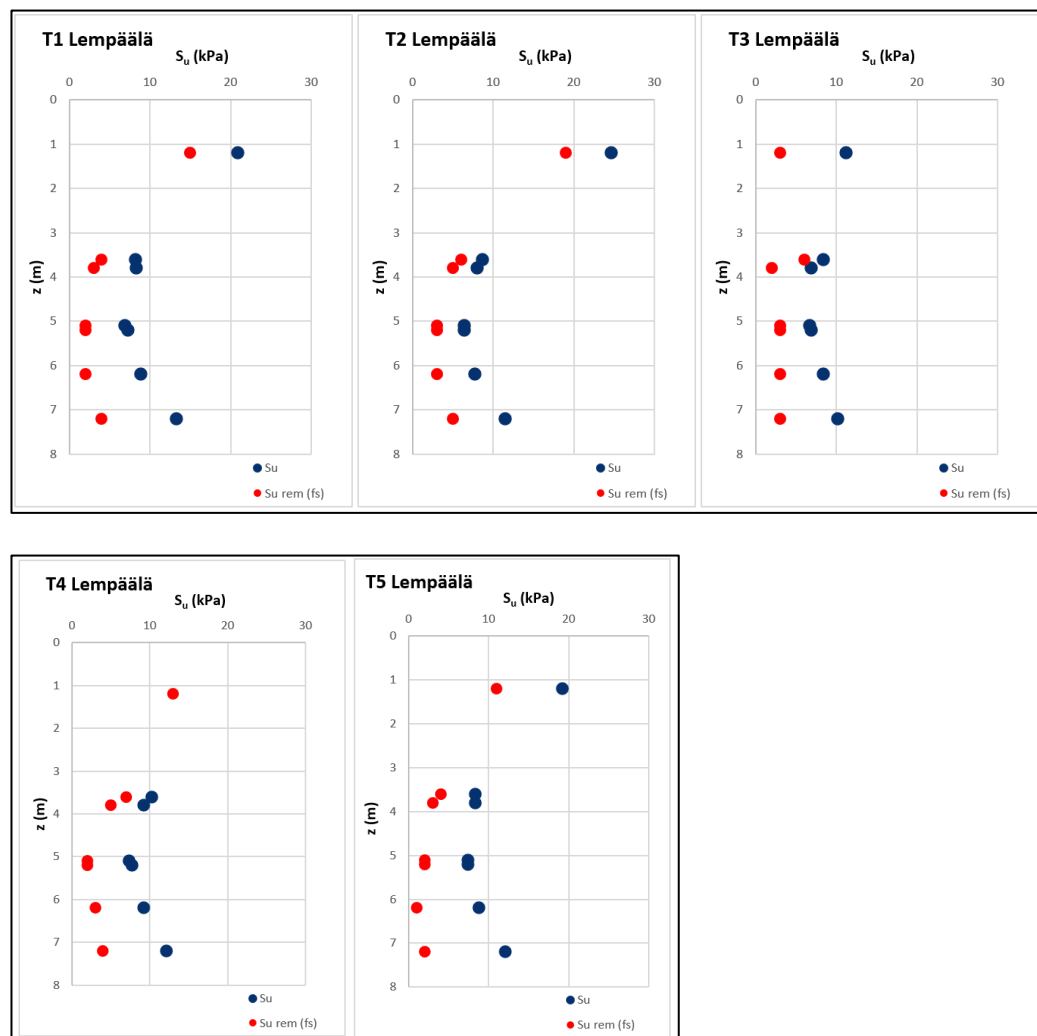
Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset ödometrikokeesta (Selänpää, 2022) sekä tulkintaohjelmiston käyrä ja käytettyjen korrelaatioyhtälöiden käyrät.

Suljettu leikkauslujuus

5 (6)



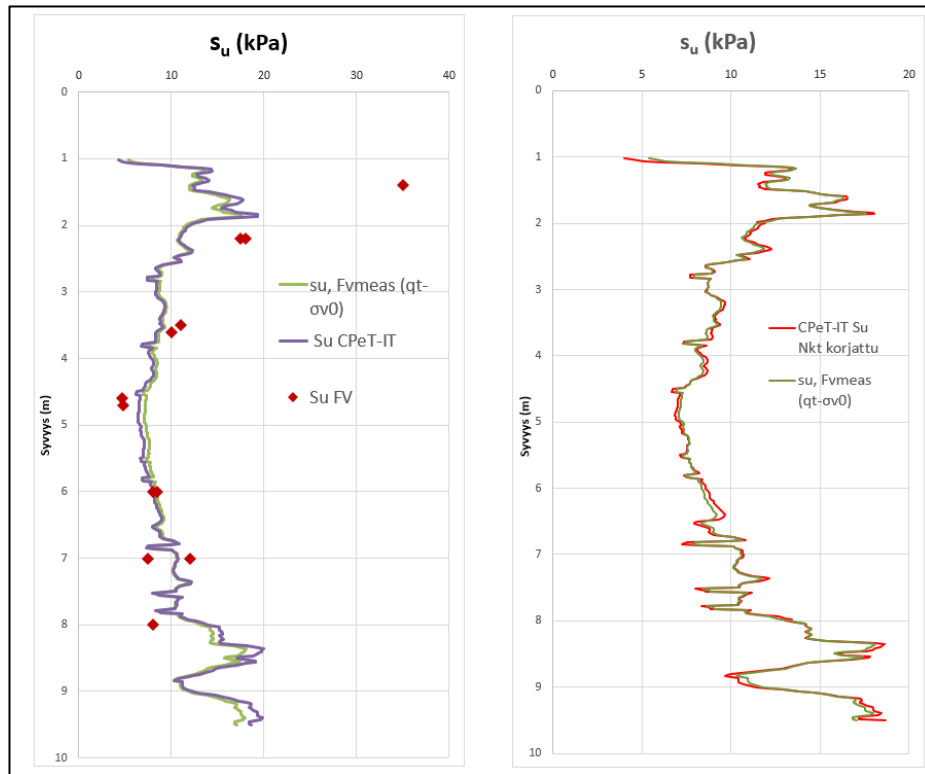
Suljettu leikkauslujuus kartiokokeesta laboratoriossa (Di Buò, 2020)



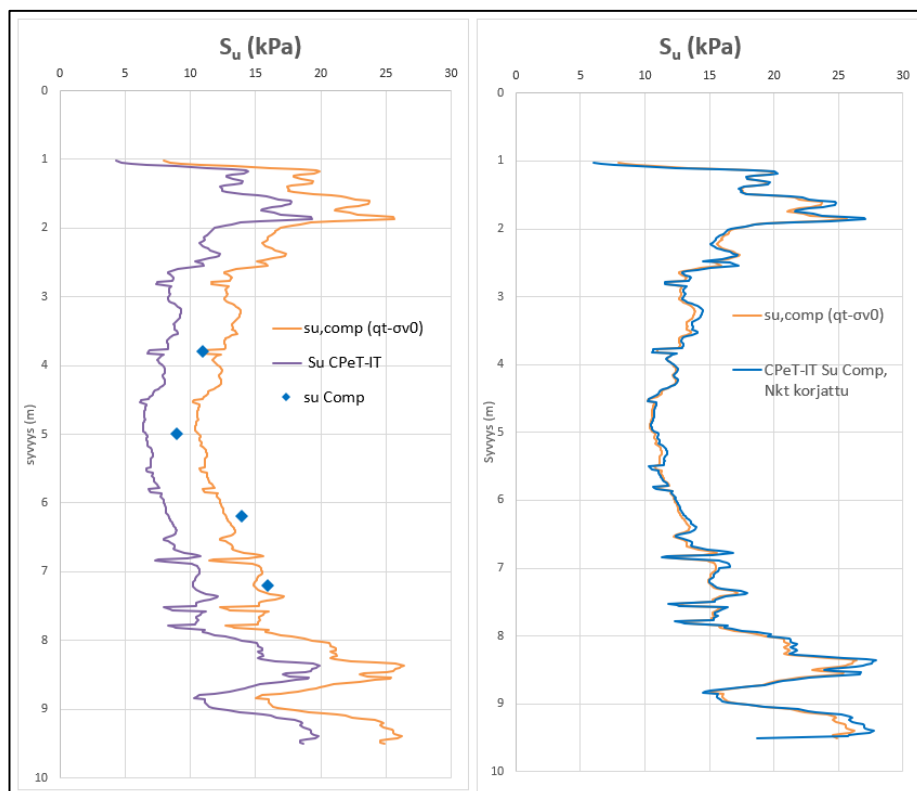
Suljettu leikkauslujuus s_u ja häiritty suljettu leikkauslujuus $s_{u\text{ rem}}$ eli vaippakitka f_s .
 Pisteet CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta näytteenottoa vastaavalla syvyydellä.

Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$

6 (6)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$ ja siipikairaus-tulokset (Selänpää, 2022)

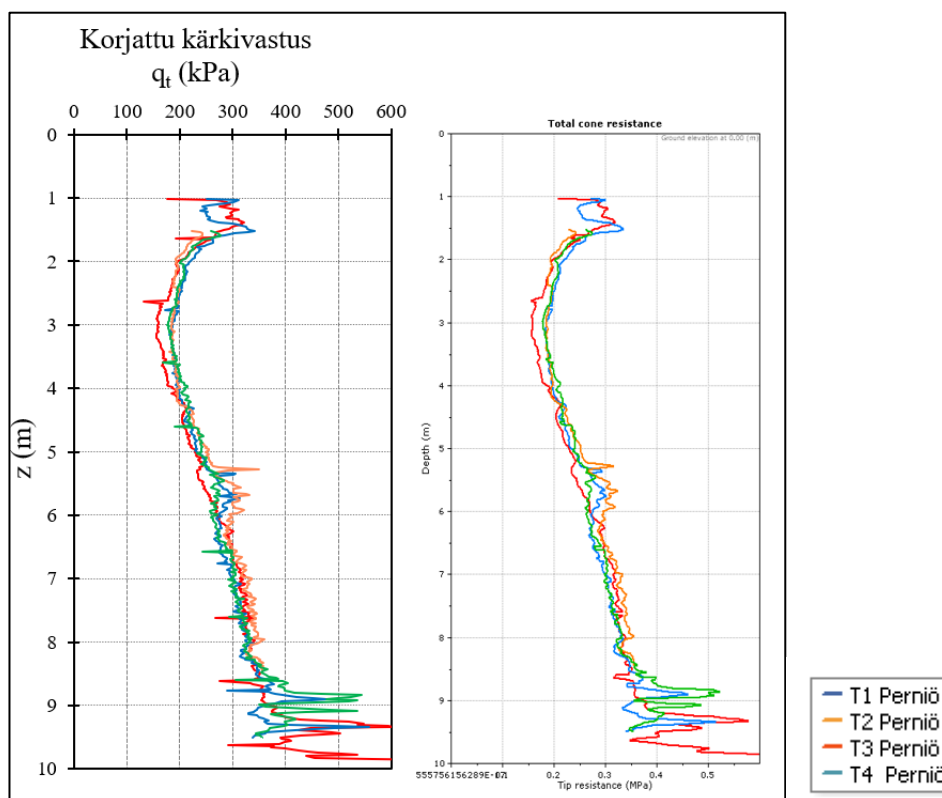


Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,Comp}$ ja puristusko-keen tulokset (Selänpää, 2022)

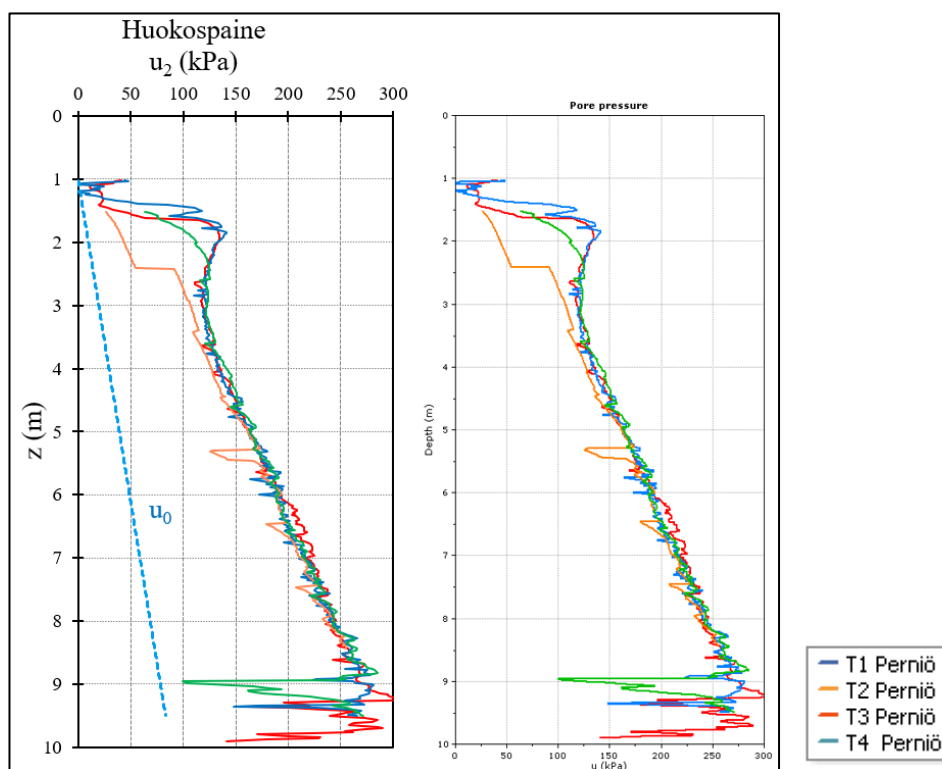
Liite 3. Perniö

Korjattu kärkivastus q_t ja huokosvedenpaine u_2

1 (6)



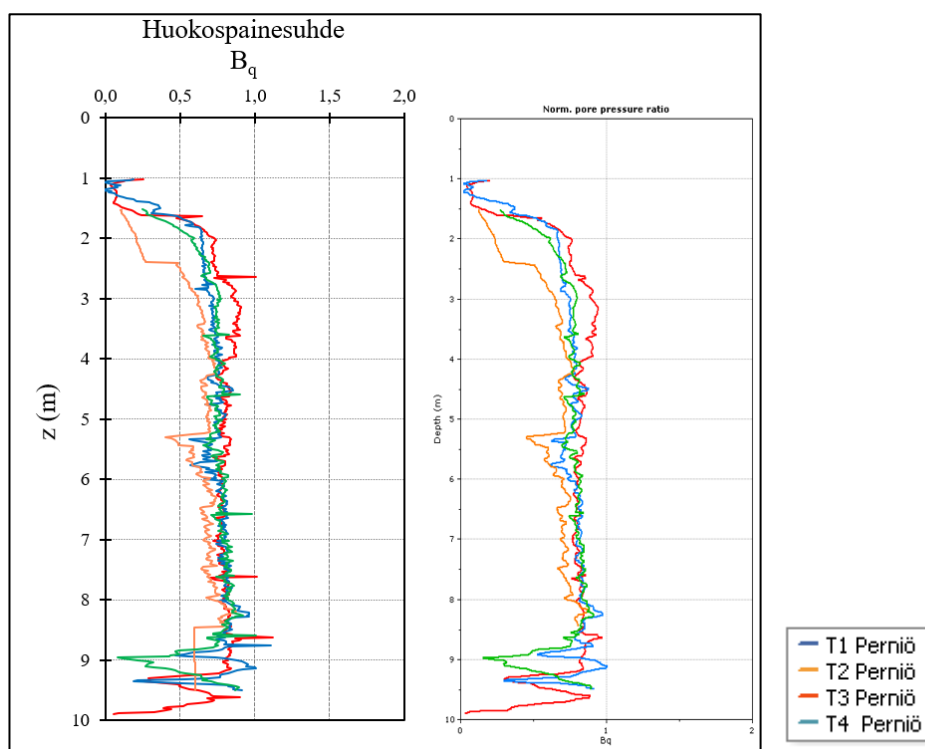
Vasemmalla korjatun kärkivastuksen q_t käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston vastaavat käyrät.



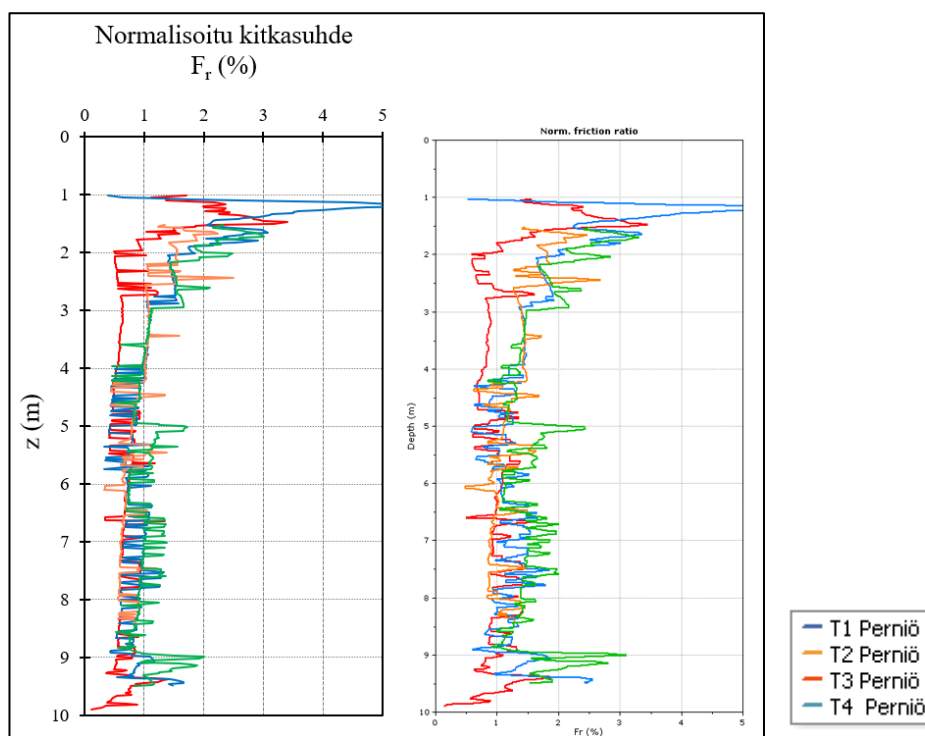
Vasemmalla mitatun huokospaineen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostkäyrät.

Huokospainesuhde B_q ja normalisoitu kitkasuhde F_r

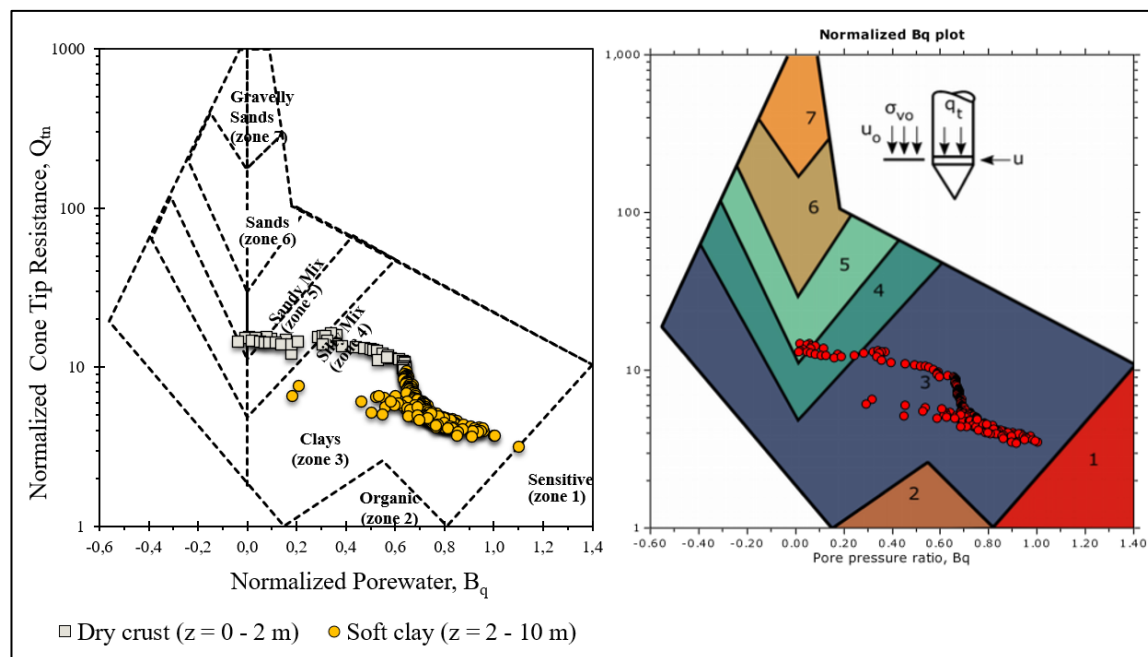
2 (6)



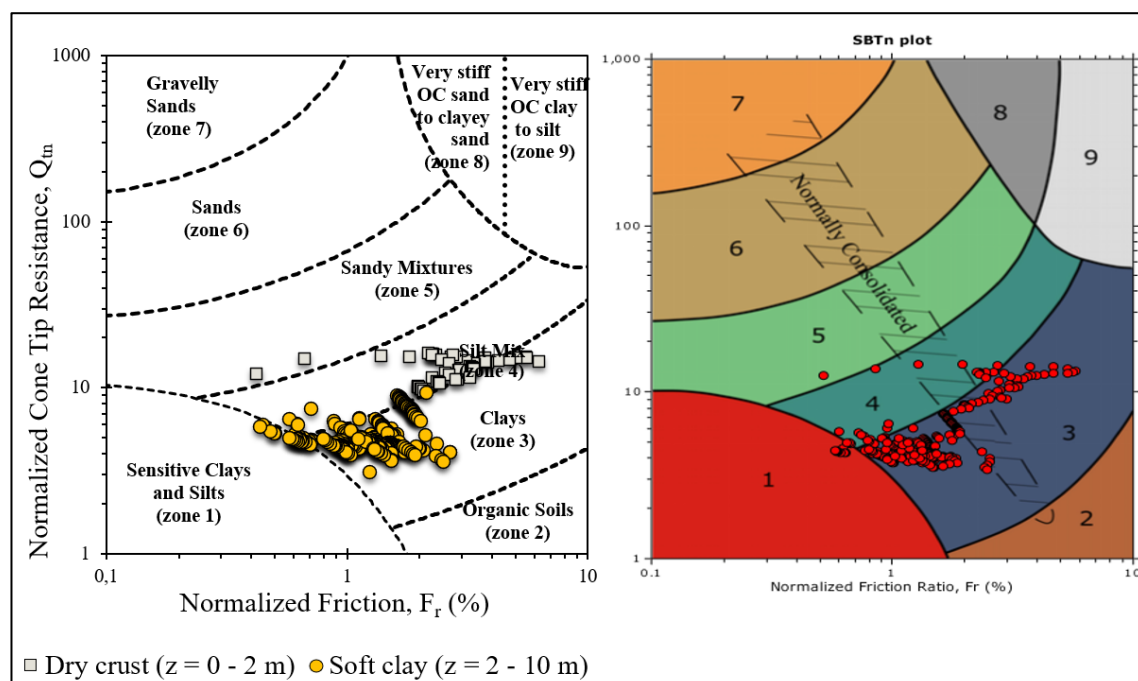
Vasemmalla huokospainesuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



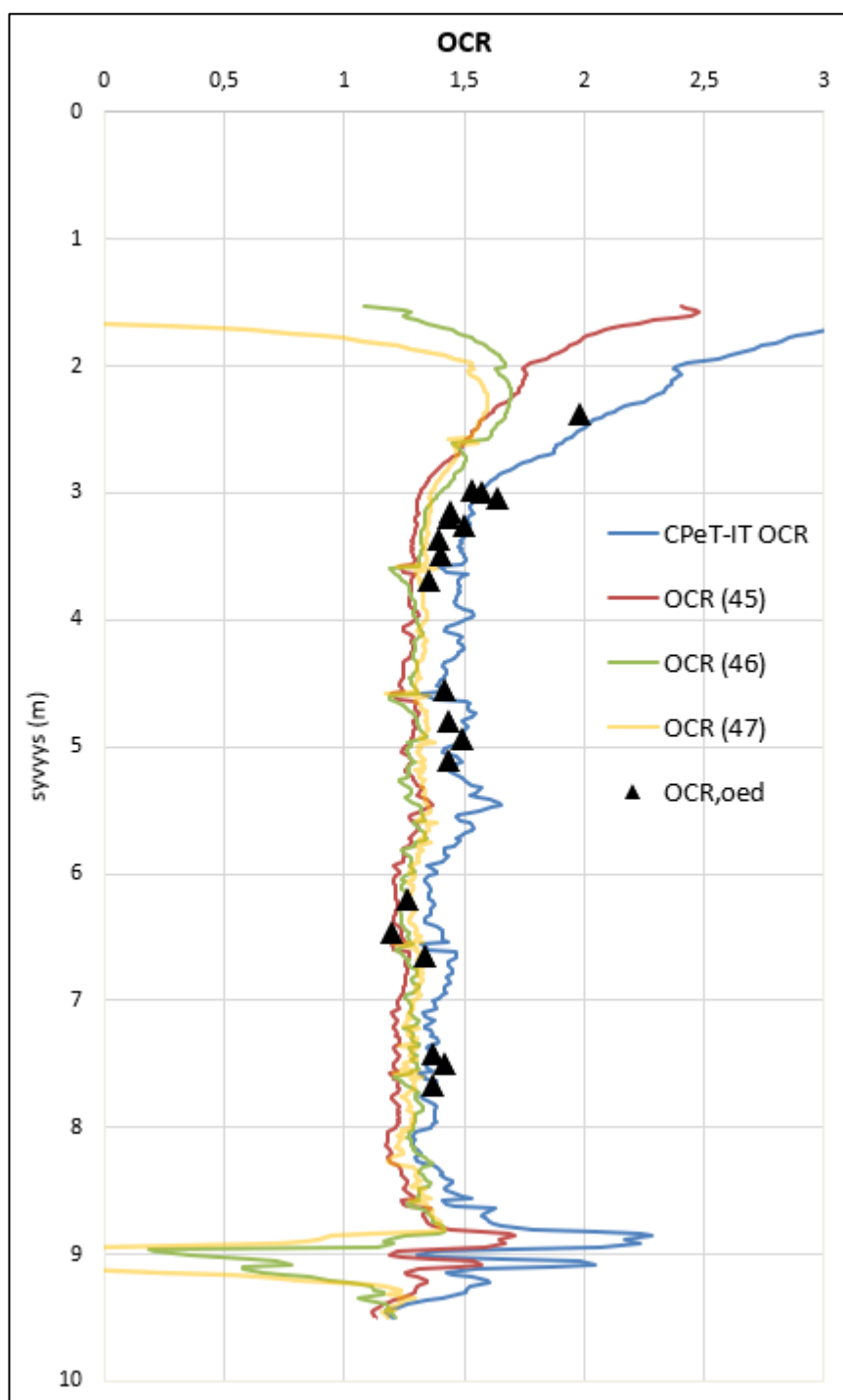
Vasemmalla normalisoidun kitkasuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärki-vastuksen Q_t ja huokospainesuhteen B_q avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Perniössä tehdyistä kairauksista.



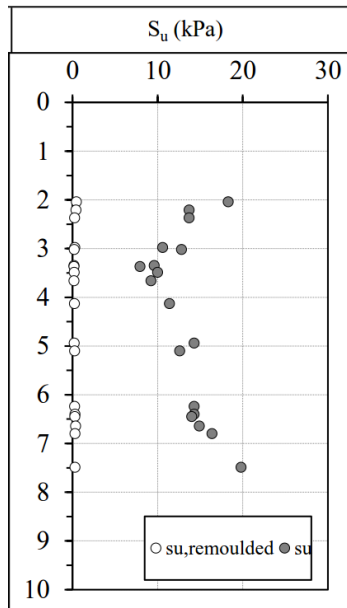
Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärki-vastuksen Q_t ja kitkasuhteen F_r avulla. Kaikkien kairausten tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Perniössä tehdyistä kairauksista.



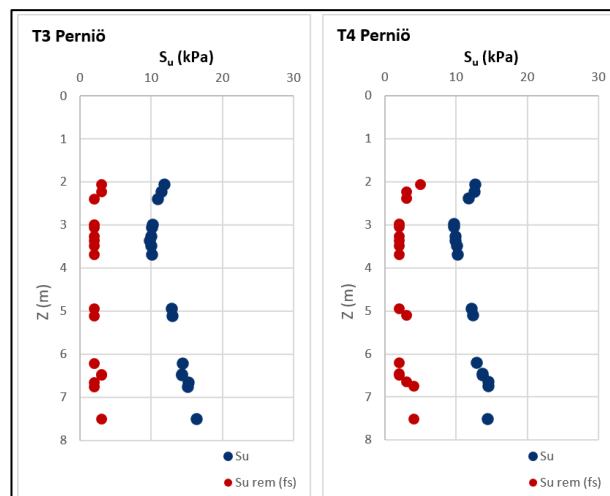
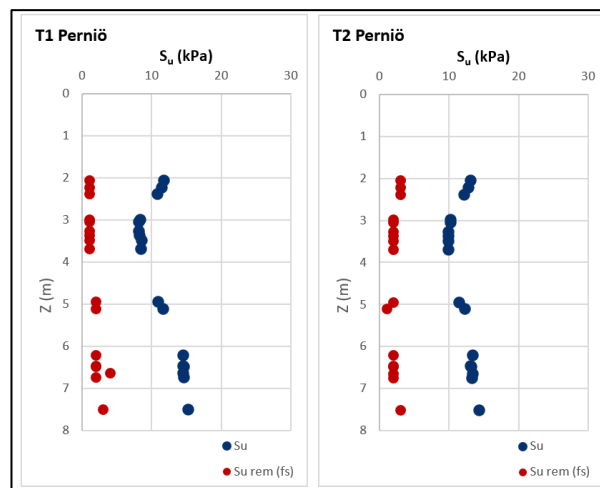
Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset ödometrikokeesta (Selänpää, 2022) sekä tulkintaohjelmiston käyrä ja käytettyjen korrelaatioyhtälöiden käyrät.

Suljettu leikkauslujuus

5 (6)



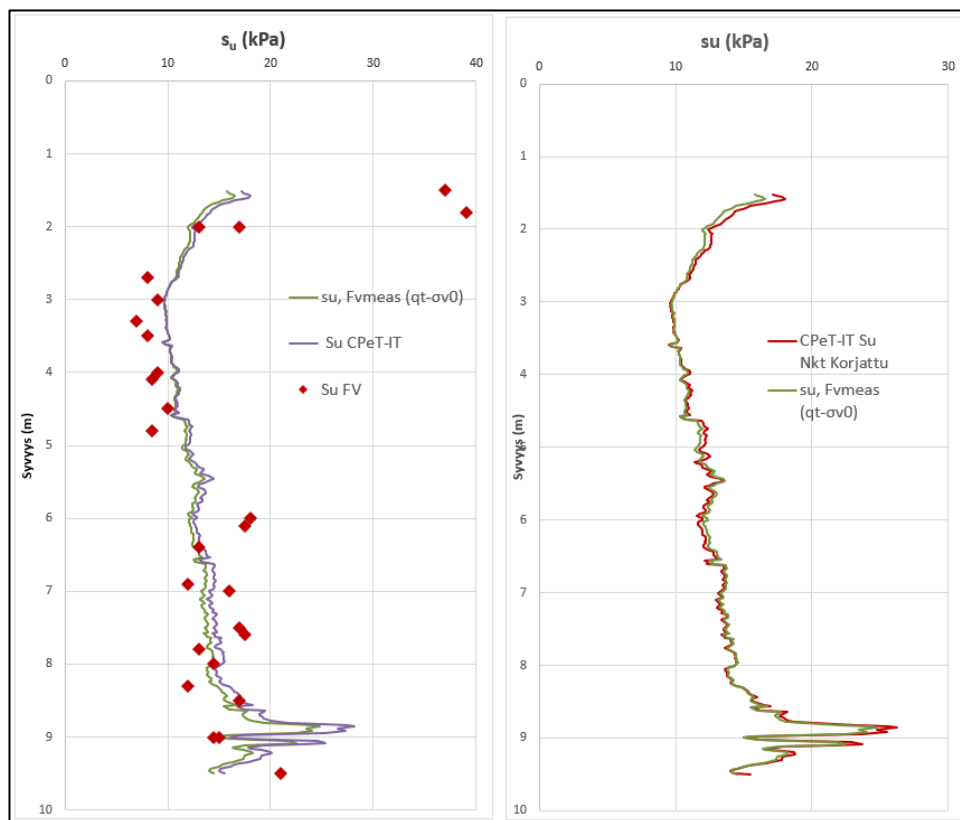
Suljettu leikkauslujuus kartiokokeesta laboratoriossa (Di Buò, 2020)



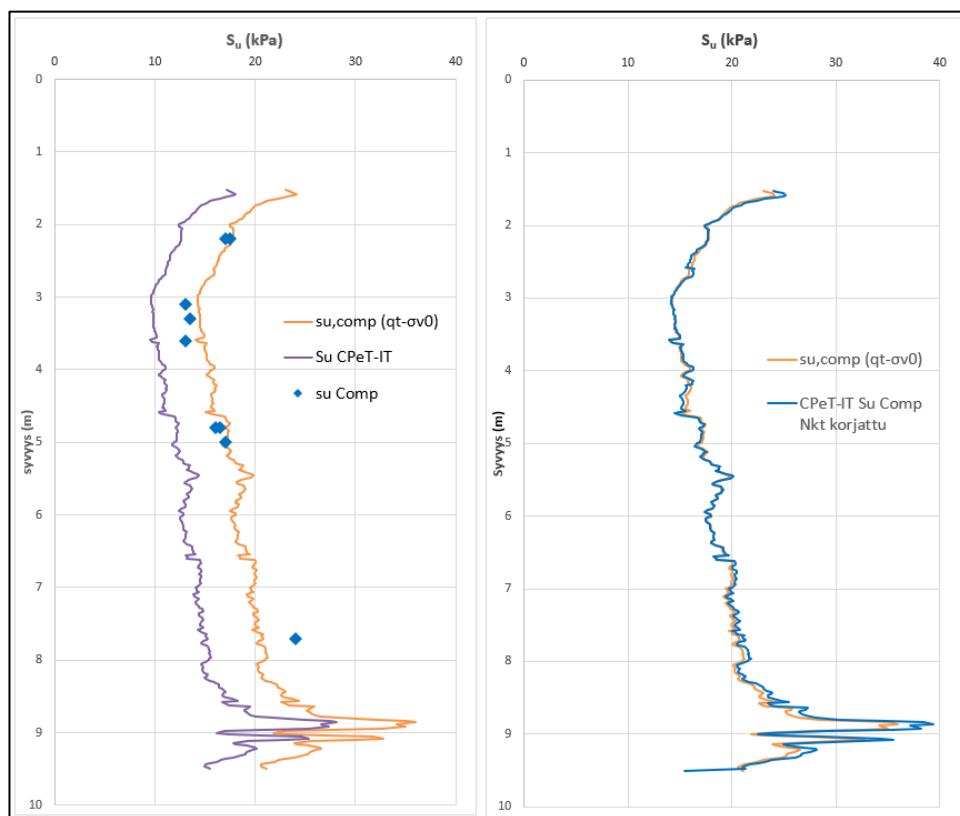
Suljettu leikkauslujuus s_u ja häiritty suljettu leikkauslujuus $s_{u rem}$ eli vaippakitka f_s .
Pisteet CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta näytteenottoa vastaavalta syvyydeltä.

Tuloskäyrät korrelaatio yhtälöille $s_{u,FVmeas}$ ja $s_{u,Comp}$

6 (6)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$ ja siipikairaus-tulokset (Selänpää, 2022)

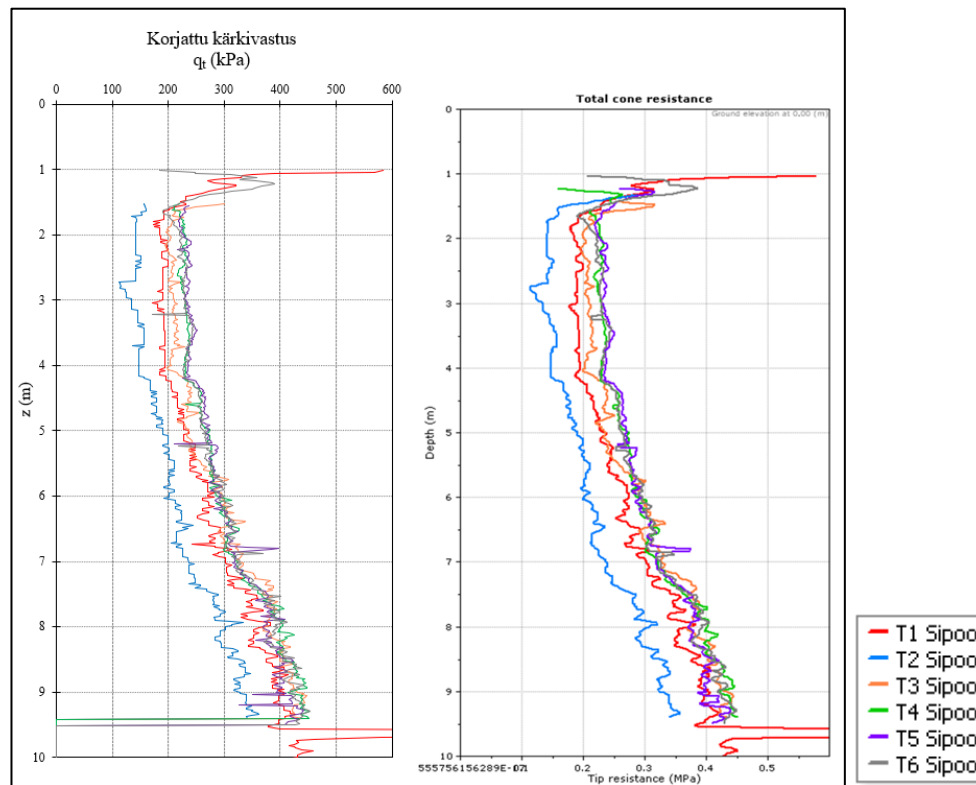


Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,Comp}$ ja puristusko-keen tulokset (Selänpää, 2022)

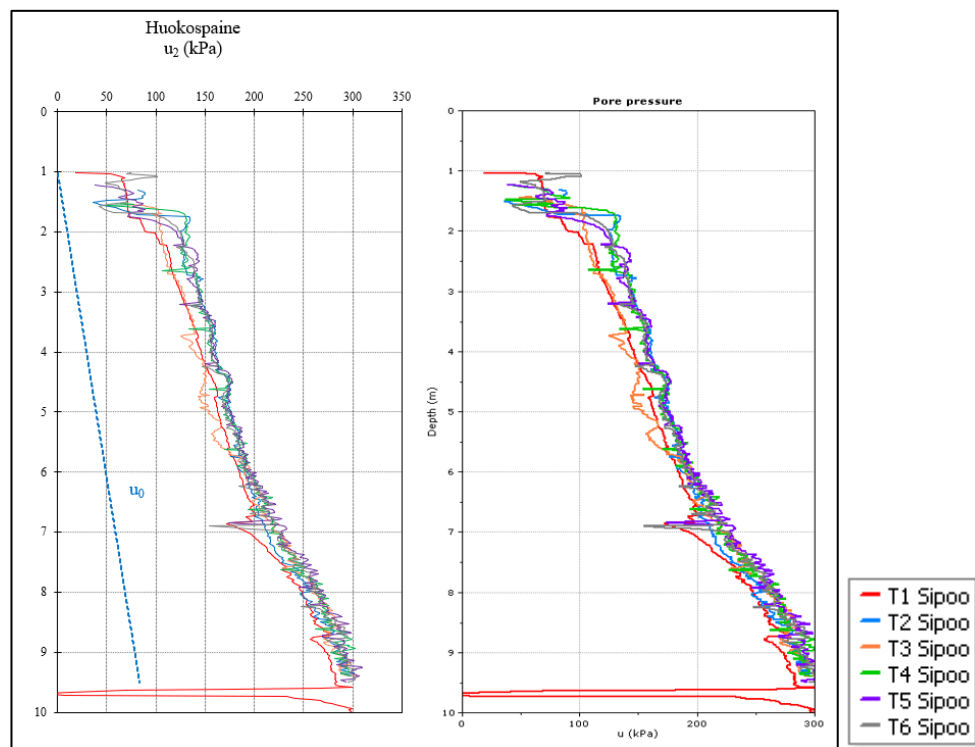
Liite 4. Sipoo

Korjattu kärkivastus q_t ja huokosvedenpaine u_2

1 (6)



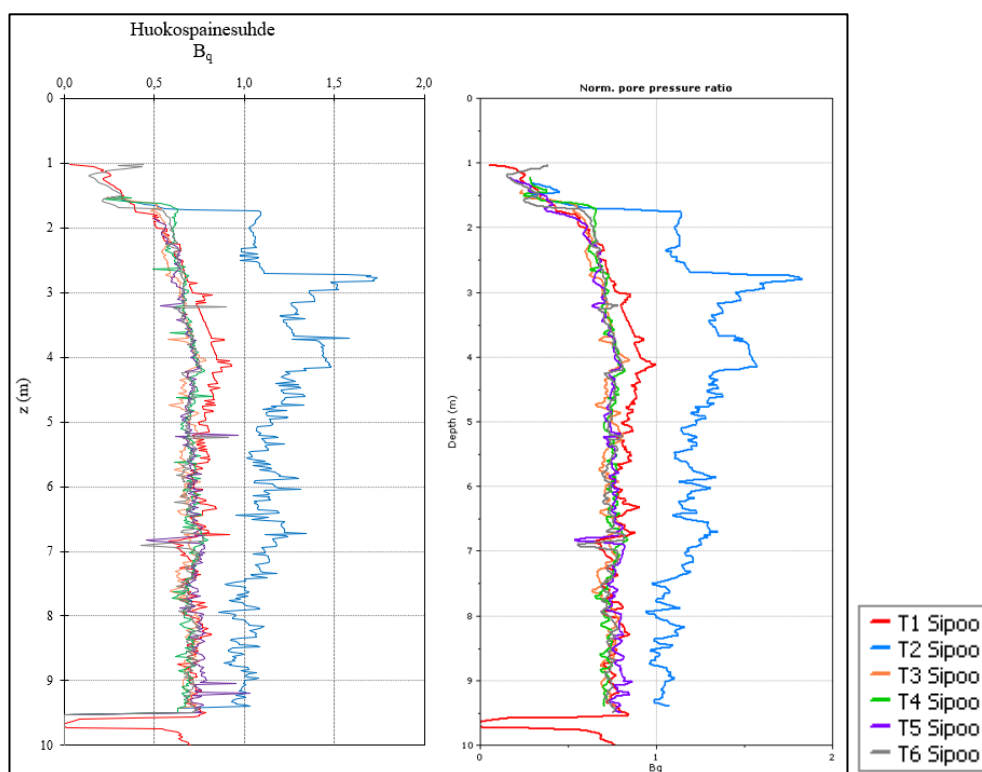
Vasemmalla korjatun kärkivastuksen q_t käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston vastaavat käyrät.



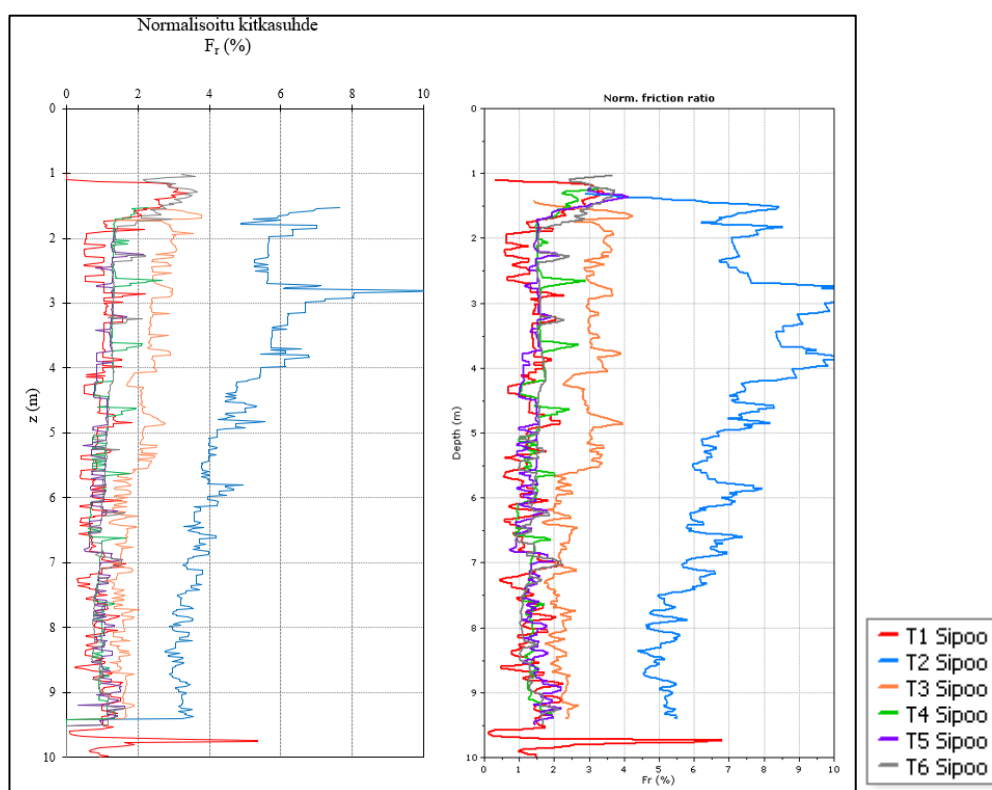
Vasemmalla mitatun huokospaineen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostkäyrät.

Huokospainesuhde B_q ja normalisoitu kitkasuhde F_r

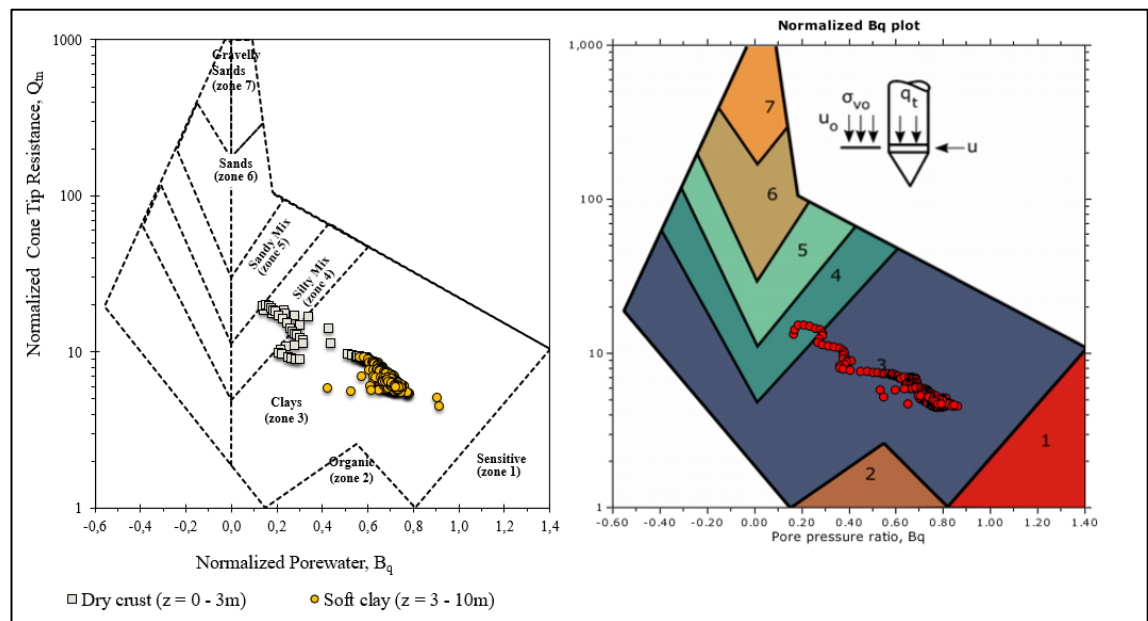
2 (6)



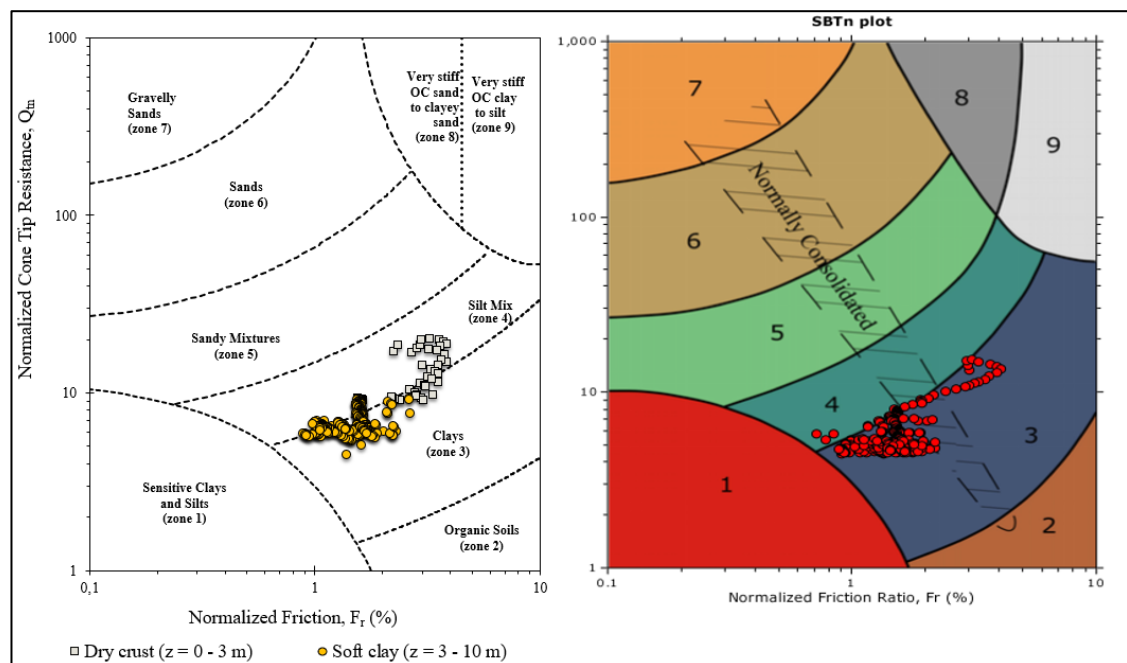
Vasemmalla huokospainesuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostuskäyrät.



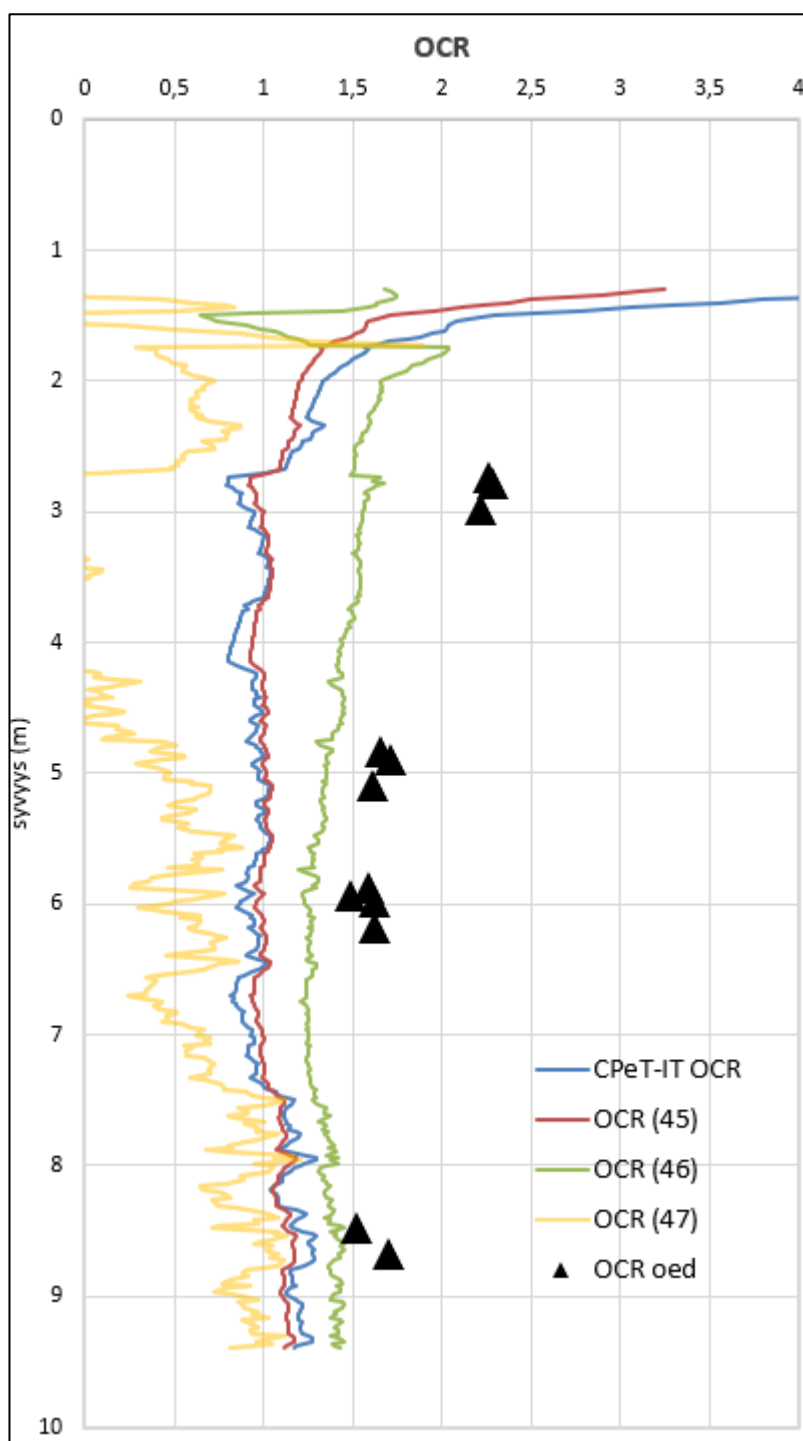
Vasemmalla normalisoidun kitkasuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostuskäyrät.



Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja huokospainesuhteen B_q avulla. Kaikkien kairauksen tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Sipoossa tehdyistä kairauksista.



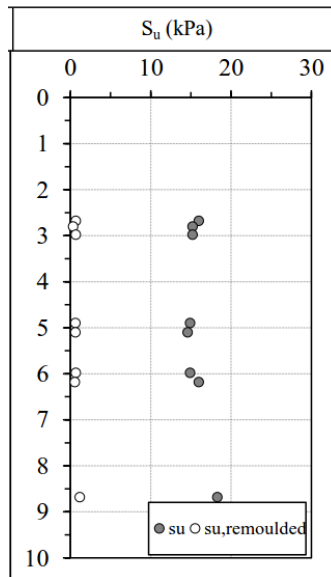
Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja kitkasuhteen F_r avulla. Kaikkien kairauksen tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Sipoossa tehdyistä kairauksista.



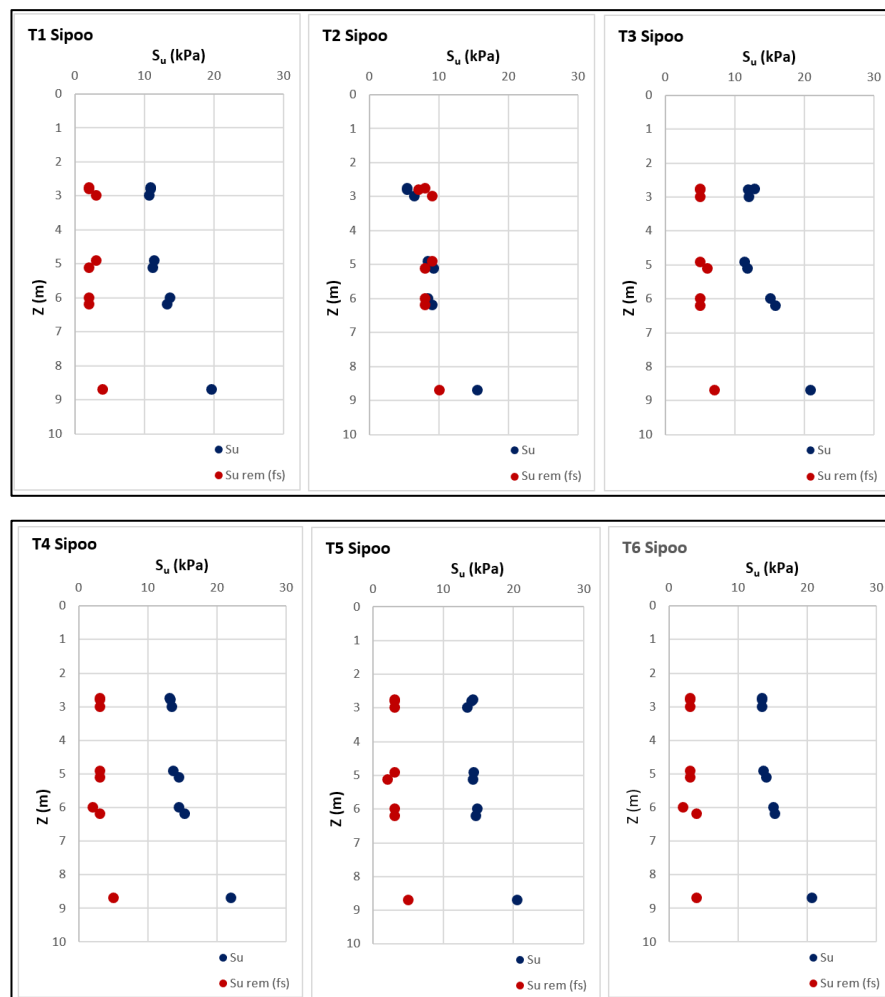
Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset ödometrikokeesta (Selänpää, 2022) sekä tulkintaohjelmiston käyrä ja käytettyjen korrelaatioyhtälöiden käyrät.

Suljettu leikkauslujuus

5 (6)



Suljettu leikkauslujuus kartiokokeesta laboratorioissa (Di Buò, 2020)

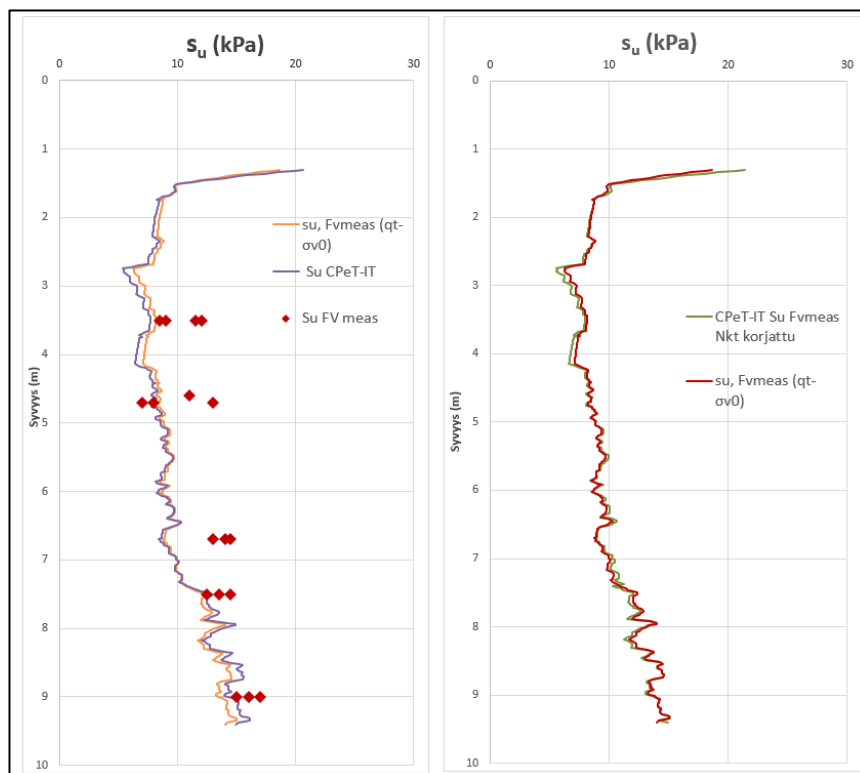


Suljettu leikkauslujuus s_u ja häiritty suljettu leikkauslujuus $s_{u\text{ rem}}$ eli vaippakitka f_s .

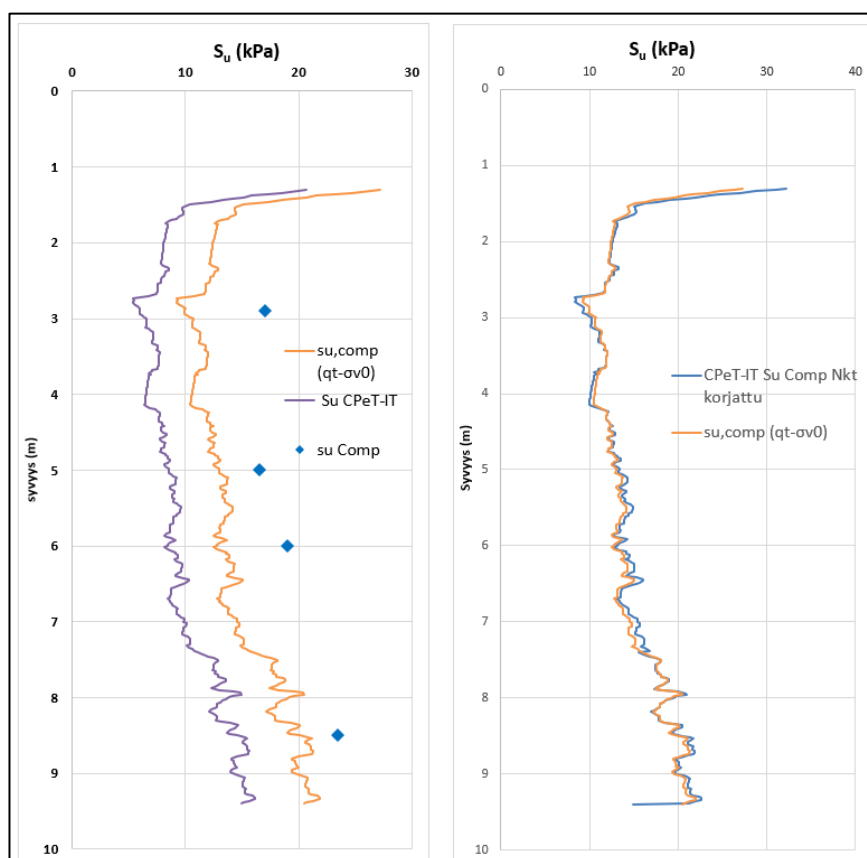
Pisteet CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta näytteenottoa vastaavalta syvyydeltä.

Tuloskäyrät korrelaatio yhtälöille $s_{u,FVmeas}$ ja $s_{u,Comp}$

6 (6)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$ ja siipikairaus-tulokset (Selänpää, 2022)

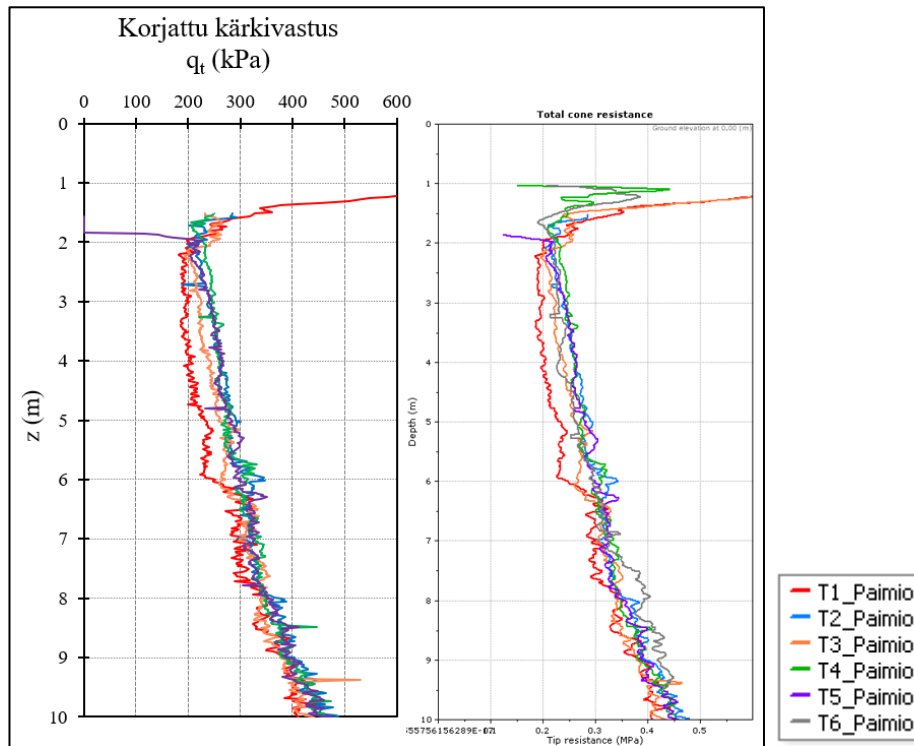


Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,Comp}$ ja puristusko-keen tulokset (Selänpää, 2022)

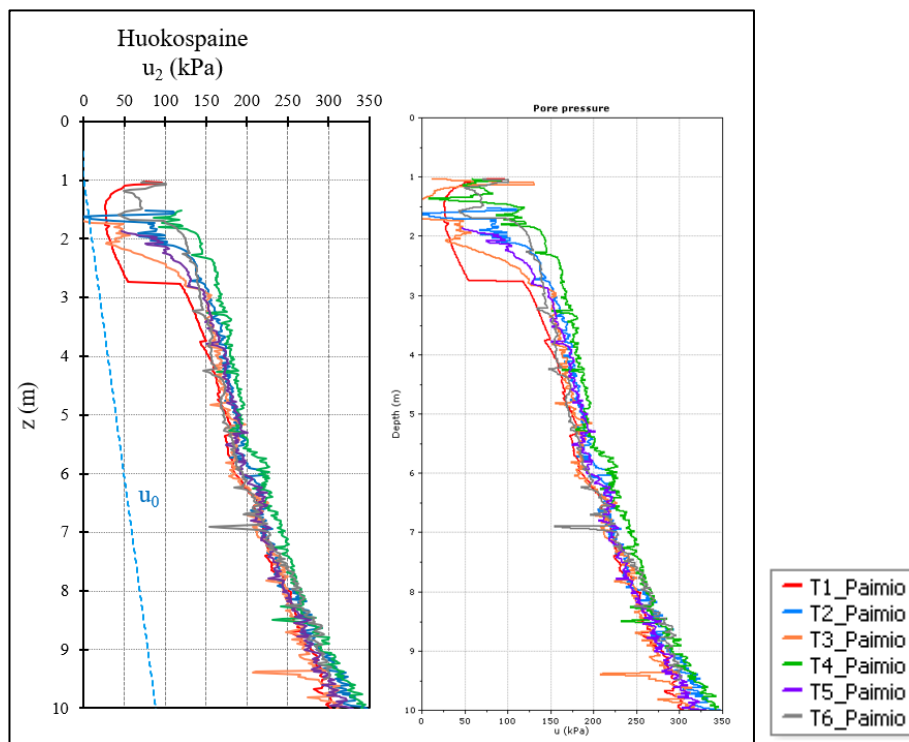
Liite 5. Paimio

Korjattu kärkivastus q_t ja huokosvedenpaine u_2

1 (6)



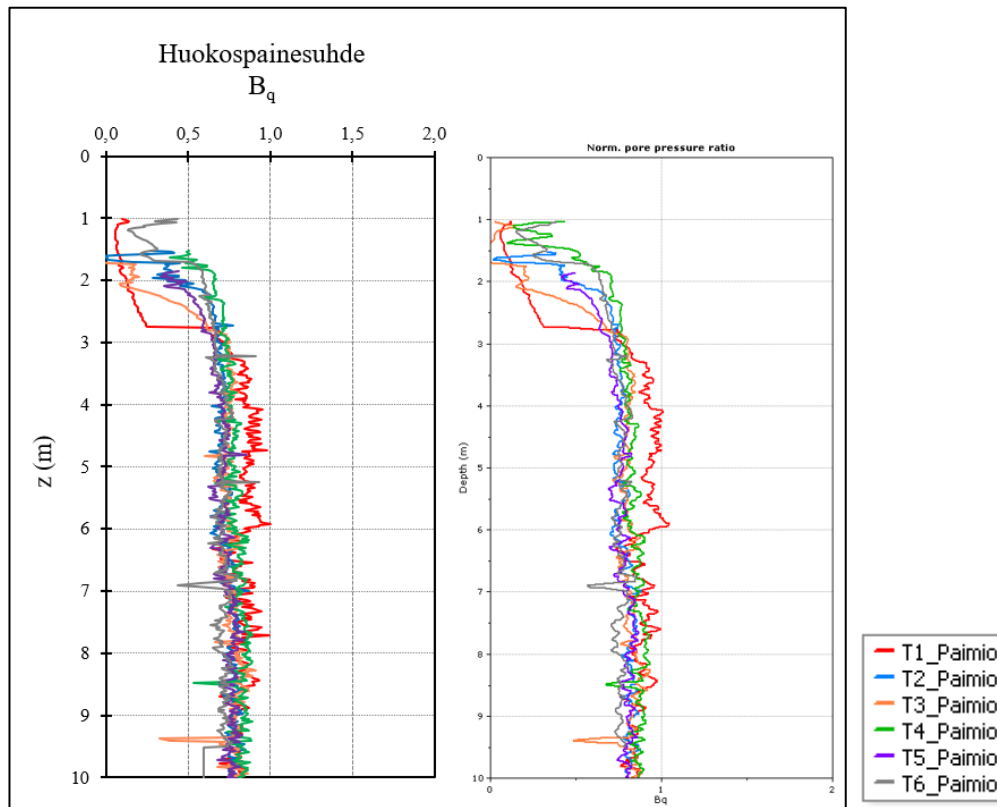
Vasemmalla korjatun kärkivastuksen q_t käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston vastaavat käyrät.



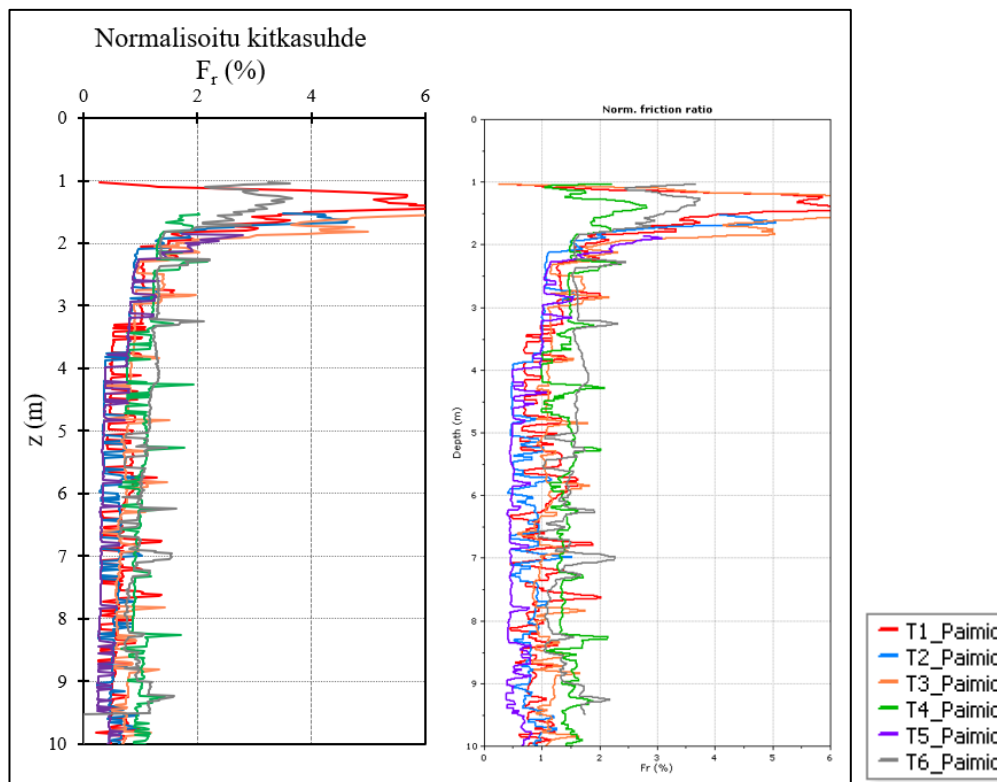
Vasemmalla mitatun huokospaineen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulostykäyrät.

Huokospainesuhde B_q ja normalisoitu kitkasuhde F_r

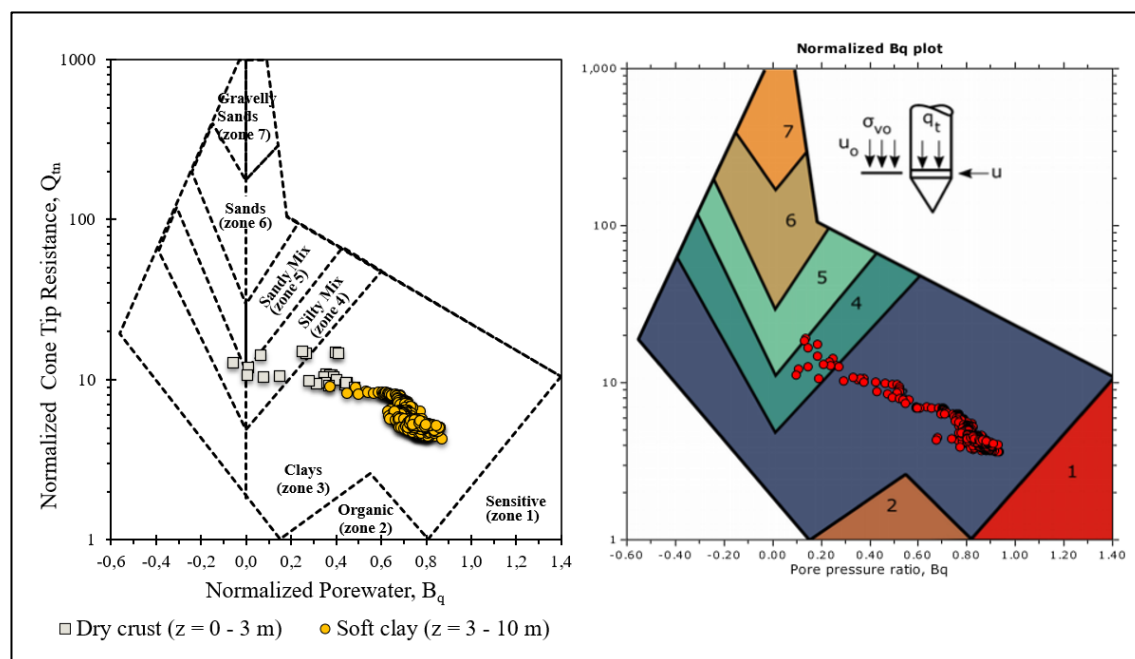
2 (6)



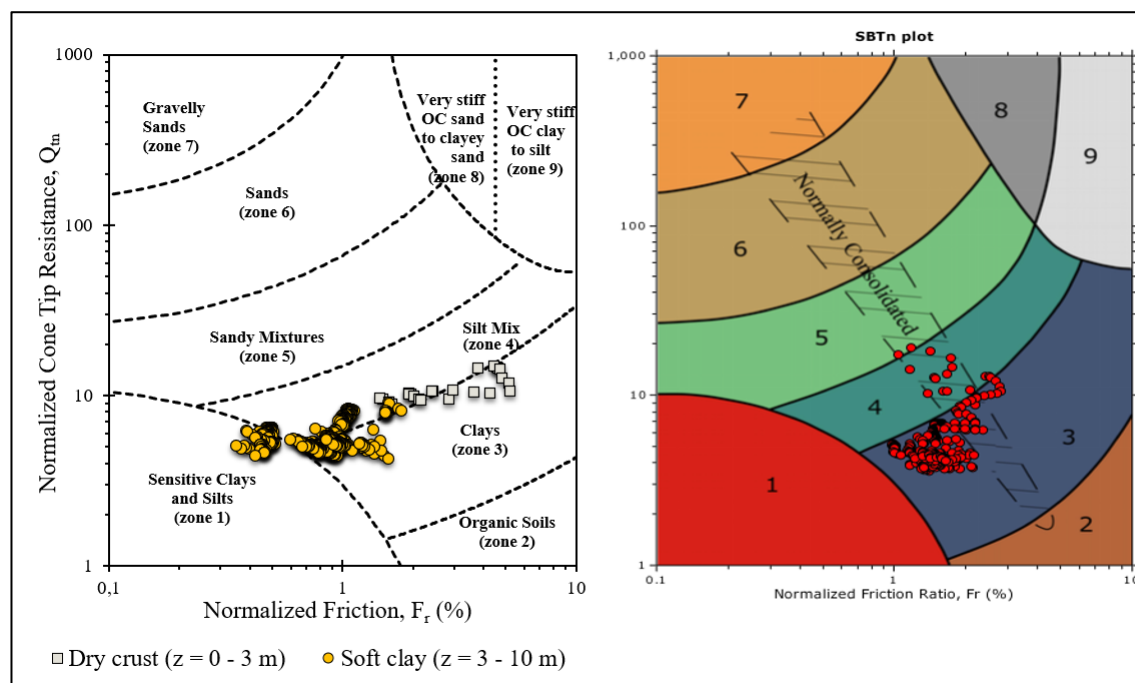
Vasemmalla huokospainesuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



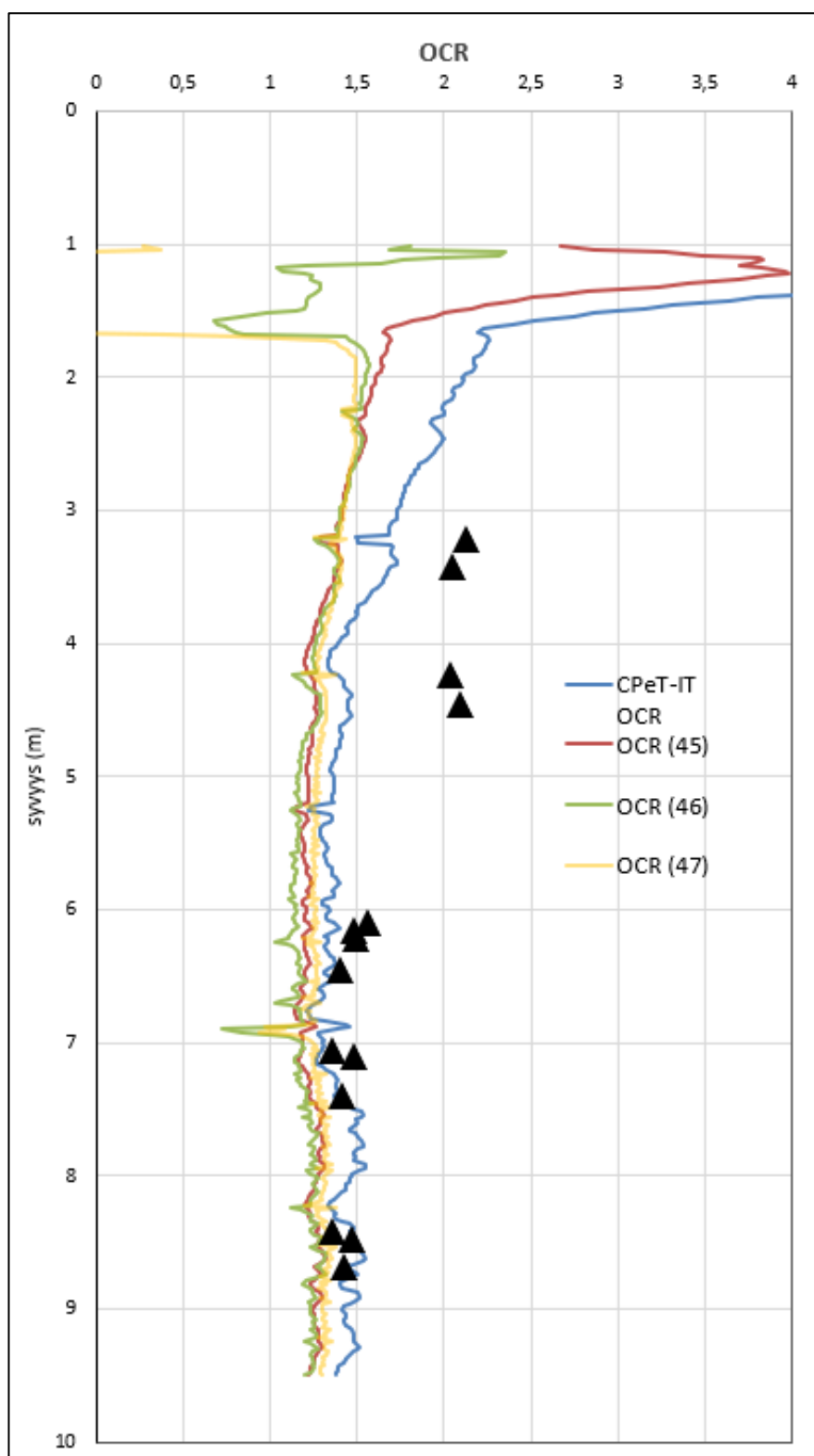
Vasemmalla normalisoidun kitkasuhteen käyrät (Di Buò, 2020) ja oikealla CPeT-IT-tulkintaohjelmiston tulokäyrät.



Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja huokospainesuhteen B_q avulla. Kaikkien kairauksen tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Paimiossa tehdyistä kairauksista.



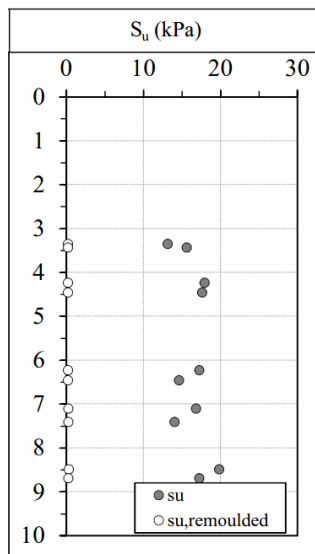
Vasemmalla vertailuaineiston (Di Buò, 2020) SBTn-kuvaaja normalisoidun kärkivastuksen Q_t ja kitkasuhteen F_r avulla. Kaikkien kairauksen tulos syvyydeltä 3–10 m. Oikealla CPeT-IT tulkintaohjelmistosta edustavin tulos Paimiossa tehdyistä kairauksista.



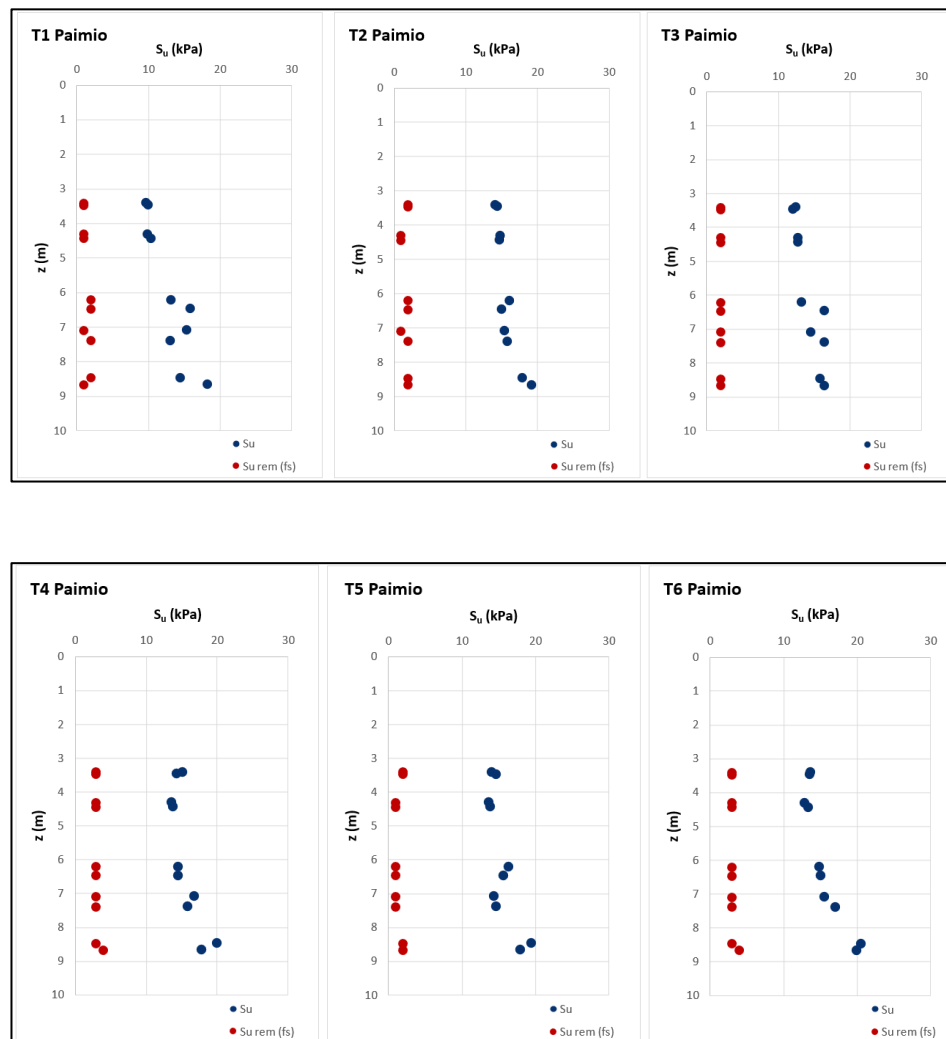
Ylikonsolidaatioasteen OCR tulokset ödometrikokeesta (Selänpää, 2022) sekä tulkintaohjelmiston käyrä ja käytettyjen korrelaatioyhtälöiden käyrät.

Suljettu leikkauslujuus

5 (6)



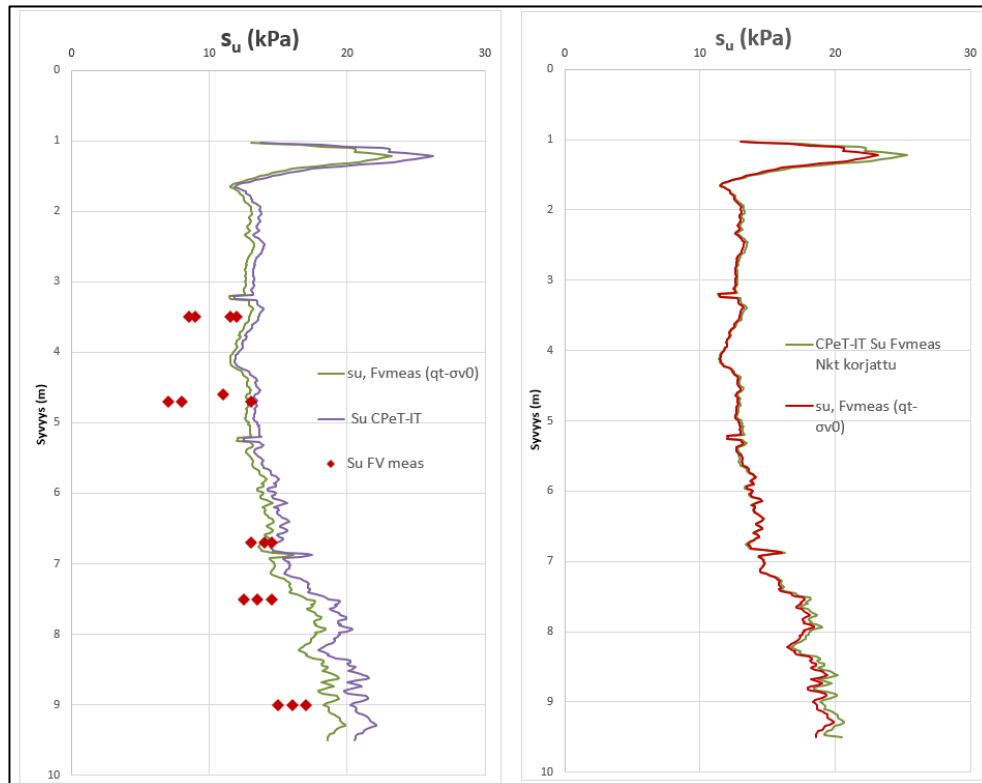
Suljettu leikkauslujuus kartiokokeesta laboratoriossa (Di Buò, 2020)



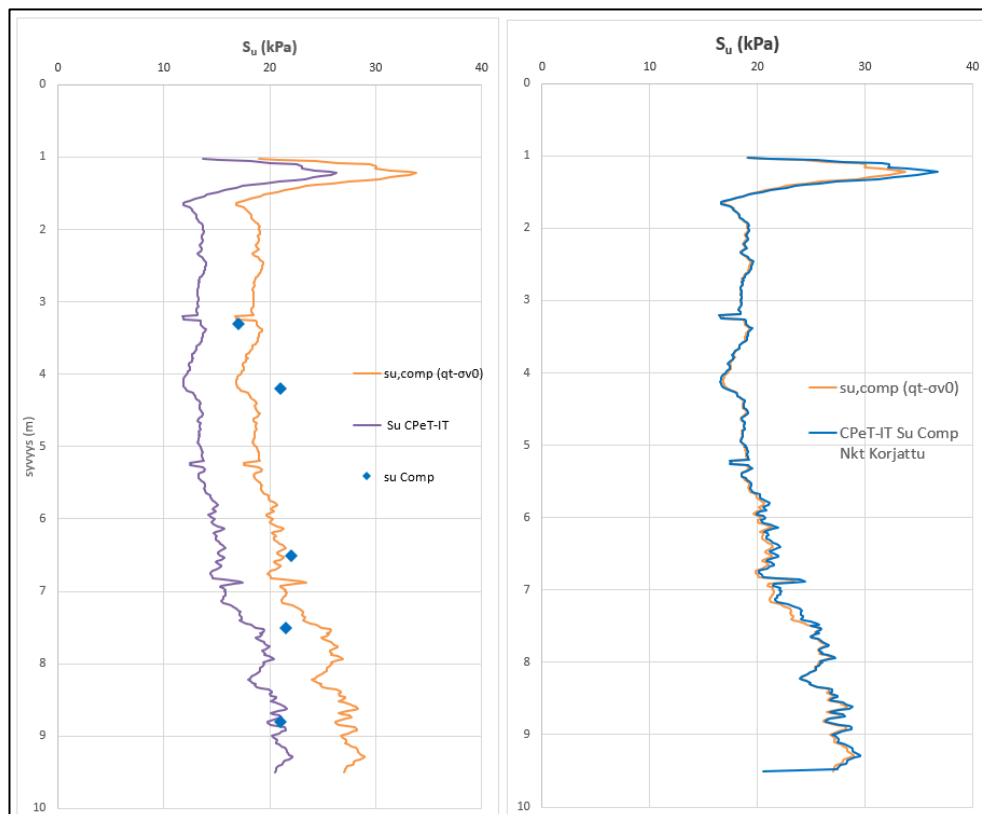
Suljettu leikkauslujuus s_u ja häiritty suljettu leikkauslujuus $s_{u\text{ rem}}$ eli vaippakitka f_s .
 Pisteet CPeT-IT-tulkintaohjelmistosta näytteenottoa vastaavalta syvyydeltä.

Tuloskäyrät korrelaatio yhtälöille $s_{u,FVmeas}$ ja $s_{u,Comp}$

6 (6)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,FVmeas}$ ja siipikairaus-tulokset (Selänpää, 2022)



Suljetun leikkauslujuuden kalibrointi korrelaatioyhtälöllä $s_{u,Comp}$ ja puristus-keen tulokset (Selänpää, 2022)

Liite 6. Kokoonpuristuvuusmoduuli

1 (2)

Kokoonpuristuvuusmoduulin M mittauksen tulokset CPTu ja laboratoriokokeet kohteittain ja käytetyt menetelmät (Di Buò, 2020) sekä CPeT-IT arvioima tulos.

PERNIO TUT 132						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	V _s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V _s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
2,31	0,80	51,31	0,99	0,86	60,88	1,21
2,98	0,85	59,88	1,34	1,17	57,73	1,09
2,99	0,90	59,88	1,34	1,17	57,80	1,09
3,25	0,90	60,82	1,39	1,21	58,55	1,12
3,36	0,80	60,82	1,39	1,21	58,77	1,13
3,68	0,80	71,21	1,90	1,65	59,75	1,16
4,55	1,20	63,37	1,51	1,31	62,25	1,26
4,80	1,10	47,48	0,85	0,74	63,42	1,31
6,20	1,40	70,16	1,85	1,61	66,66	1,45
6,64	1,40	71,08	1,89	1,65	72,80	1,73
PERNIO Miniblock						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	V _s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V _s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
3,15	1,10	60,82	1,39	1,21	58,20	1,11
3,15	1,00	60,82	1,39	1,21	58,29	1,11
3,92	1,40	71,21	1,90	1,65	60,65	1,20
6,36	1,50	70,16	1,85	1,61	70,23	1,61
6,37	1,80	70,16	1,85	1,61	70,27	1,61
6,74	1,90	71,08	1,89	1,65	73,84	1,78
6,75	1,90	71,08	1,89	1,65	73,07	1,74
PERNIO Aalto86						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	V _s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V _s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
4,18	1,10	63,37	1,51	1,31	60,12	1,18
4,90	1,30	47,48	0,85	0,74	63,72	1,32

MASKU TUT 132						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	V _s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V _s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
2,84	1,20	48,19	0,87	0,76	62,59	1,28
2,99	1,50	48,19	0,87	0,76	63,01	1,30
5,15	1,70	71,65	1,93	1,67	67,33	1,48
5,15	1,60	71,65	1,93	1,67	67,59	1,49
7,96	1,30	85,75	2,76	2,40	75,62	1,87

2 (2)

Kokoonpuristuvuusmoduulin M mittauksen tulokset CPTu ja laboratoriokohteet kohteittain ja käytetyt menetelmät (Di Buò, 2020) sekä CPeT-IT arvioima tulos.

LEMPÄÄLÄ TUT 132						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	CPTu V_s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V_s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
3,86	0,30	39,62	0,59	0,51	62,20	1,26
4,80	0,50	47,48	0,85	0,74	57,27	1,07
4,84	0,60	47,48	0,85	0,74	59,25	1,15
5,08	0,65	53,74	1,08	0,94	60,06	1,18

PAIMIO TUT 132						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	CPTu V_s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V_s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
3,22	1,30	59,77	1,34	1,17	66,98	1,46
4,24	1,50	62,63	1,47	1,28	68,80	1,54
6,22	1,80	68,20	1,74	1,52	76,22	1,90
7,10	2,00	77,66	2,26	1,97	77,33	1,95
8,42	1,90	78,94	2,34	2,03	81,31	2,16
8,48	2,00	78,94	2,34	2,03	81,71	2,18

PAIMIO ST1:50						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	CPTu V_s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V_s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
3,48	1,40	59,77	1,34	1,17	67,91	1,50
4,32	1,10	62,63	1,47	1,28	69,30	1,57
6,40	2,40	68,20	1,74	1,52	75,25	1,85
6,48	1,50	68,20	1,74	1,52	73,97	1,78
7,38	1,70	77,66	2,26	1,97	77,97	1,98

SIPOO TUT 132						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	CPTu V_s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V_s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
2,78	1,50	64,19	1,55	1,34	64,79	1,37
4,84	1,20	65,31	1,60	1,39	68,89	1,55
4,90	1,20	72,07	1,95	1,69	68,96	1,55
5,10	1,20	72,07	1,95	1,69	67,50	1,49
5,88	1,50	60,23	1,36	1,18	71,68	1,68
5,94	1,40	60,23	1,36	1,18	71,42	1,66
5,98	1,40	60,23	1,36	1,18	71,75	1,68

SIPOO ST1:50						
Syvyys [m]	Laboratorio M [MPa]	CPTu V_s [m/s]	Laskettu M [MPa]	Kalibroitu M [MPa]	CPeT-IT V_s [m/s]	CPeT-IT arv. Kalibroitu [MPa]
2,90	1,20	64,19	1,55	1,34	65,01	1,38
3,06	1,30	64,19	1,55	1,34	65,37	1,39
6,10	1,50	60,23	1,36	1,18	72,25	1,70
6,16	1,45	60,23	1,36	1,18	72,49	1,71