CPT(U)-kairauskokeen perusteet

Juha Selänpää
Tampereen teknillinen yliopisto

18.11.2015

Termistö

- CPT Sähköinen puristinkairauskoe
- CPTU Sähköinen puristinkairauskoe huokosvedenpainemittauksella
- f_s Mitattu vaippakitka (vaippavastus)
- (f_t Korjattu vaippakitka)
- q_c Mitattu kärkivastus
- (q_T Korjattu kärkivastus)
- l Tunkeutumispituus
- z Tunkeutumissyvyys
- su Suljettu leikkauslujuus
- SBT Maalajiluokitus CPTU tuloksien perusteella (Soil Behaviour Type)
- u_2 Välittömästi kartion takaa mitattu huokosvedenpaine
- u_o Vallitseva huokosvedenpaine
- α Kaltevuus pystysuoran akselin suhteen

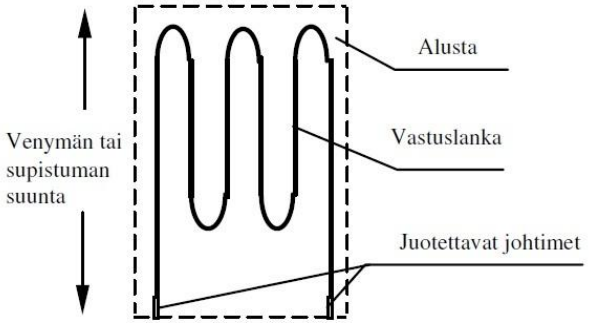
Ohjeet

- CPTU- kairauskokeessa noudatettavien ohjeiden pätevyysjärjestys:

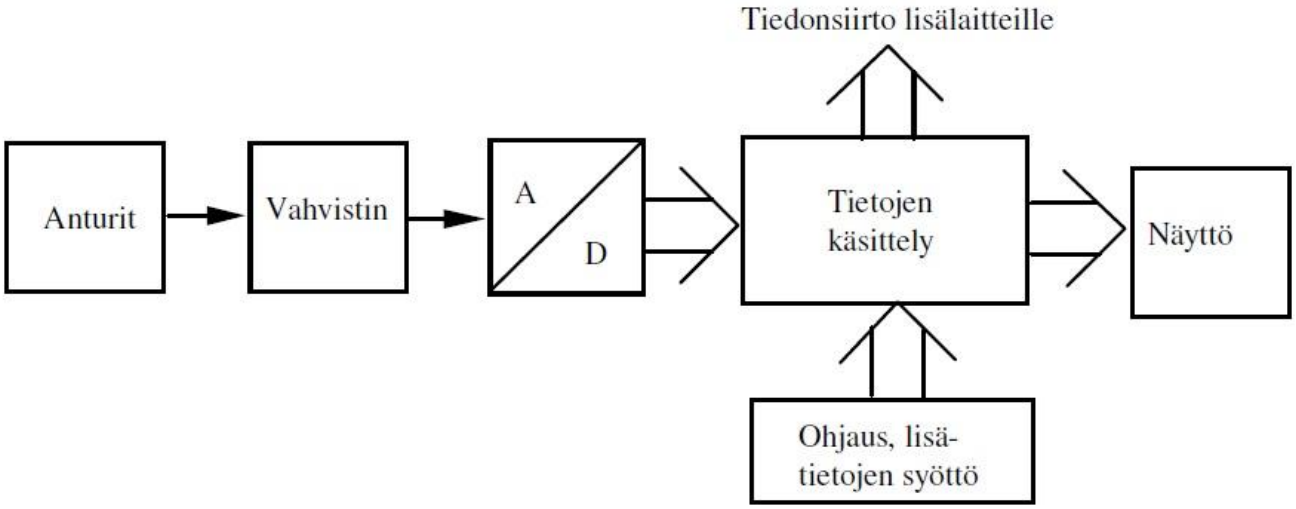
1. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Liikennevirasto 2015
2. EN ISO 22476-1:2012 Geotekninen tutkimus ja testaus. Kenttäkokeet. Osa 1: Sähköinen puristinkairauskoe
3. SGY Kairausopas VI, SGY 2001, soveltuvin osin

Mittauslaitteiston toiminta (yleisesti)

- Voimanmittaus venymäliuskan avulla perustuu metallin resistanssin muutokseen kappaleen muodonmuuttuessa
  - Huom! Myös lämpötilanmuutos vaikuttaa resistanssiin! Kompensoidaan siltakytkennällä.



Kuvalähde: Vaasan ammattikorkeakoulun luentokalvot



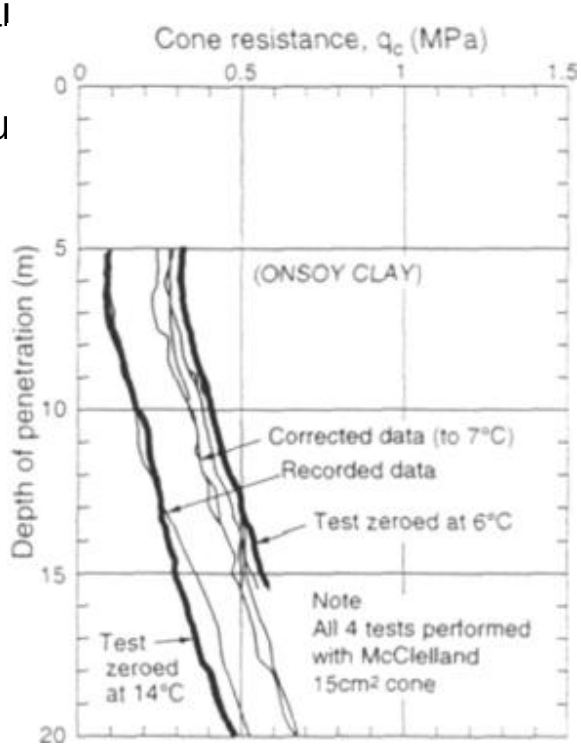
Kuvalähde: Vaasan ammattikorkeakoulun luentokalvot

Yleistä

- Mitattava kuormitusvoima ohjataan kappaleen läpi, mihin voima-anturi on kiinnitetty. CPTU-kärjessä esim. kärkikartioon kohdistuva tunkeumavastuksesta aiheutuva voima johtuu kärjen sisällä olevaan sylinterimäiseen metallivarteen. Kuormitusvoima aiheuttaa metallivarteen elastisia muodonmuutoksia, mitkä aiheuttavat myös voima-anturiin pientä puristumaa. Voima-anturi koostuu useimmiten siltakytketyistä venymäliuskoista, joiden sähkönjohtavuus muuttuu, kun liuskassa olevien johteiden poikkileikkaus muuttuu venymisestä/puristumisesta. Tästä syntyvä jännite-ero on suuruudeltaan millivoltteja ja tämän takia se vaatiikin usein vahvistimen vahvistamaan signaalia. Vahvistettu signaali muutetaan analogisesta digitaaliseksi muotoon. Mittausasteikko on jaettu muuntimen resoluution mukaiseen määrään jännitetasoja. Resoluution perusteella määräytyy laitteiston erottelukyky. A/D-muunnoksen jälkeen signaalin käsittelyllä poistetaan tarvittaessa häiriöitä ja muutetaan signaali ymmärrettävään muotoon. Tämä tapahtuu kalibrointikertoimen avulla, kun tunnetaan sähkönjohtavuuden muutoksen ja voiman riippuvuus. Tällöin myös mitattu voima muutetaan vastaamaan jännitystä eli voiman vaikutusta pinta-alaa kohden.

Yleistä

- CPTU-kärjen rakenteesta ja käytetyistä antureista riippuen kuormituksen ja lämpötilavaikutusten näkyminen jännitteessä voi olla joko jännitettä lisäävä tai pienentävä.
- Esimerkkinä kuitenkin kuparisesta johtimesta valmistettu venymäliuska, mikä mittaa kappaleeseen kohdistuvaa puristusvoimaa:
  - Kuormitus kasvaa -> johtimen poikkipinta-ala kasvaa -> resistiivisyys pienenee -> jännite pienenee
  - Lämpötilan muutos kappaleessa vaikuttaa kahdella tapaa: 1.) lämpötilan kohoaminen lämpölaajentaa kappaletta, jolloin kappaleeseen kiinnitetty venymäliuskan poikkipinta-ala pienenee (venymäliuskaan kohdistuu vetoa) ja jännite kasvaa 2.) lämpötilan kohoaminen vaikuttaa venymäliuskan sekä venymäliuskan kytketyiden johtojen resistiivisyyteen resistiivisyyttä suurentamalla (jännite kasvaa)
- Kuvassa alkunollalukemien jälkeen lämpötila muuttunut 7 astetta pienemmäksi tai yhden asteen suuremmaksi. Lämpötilan muutos pienemmäksi näkyy tuloksissa liian pieninä kärkivastuksen arvoina.
  - Kuvan esimerkki vanhan aikaisella kärjellä, mikä ei ole lämpötilakompensoitu. Kompensointi vähentää lämpötilavaikutusta.



Kuvalähde: Lunne et al. 1997

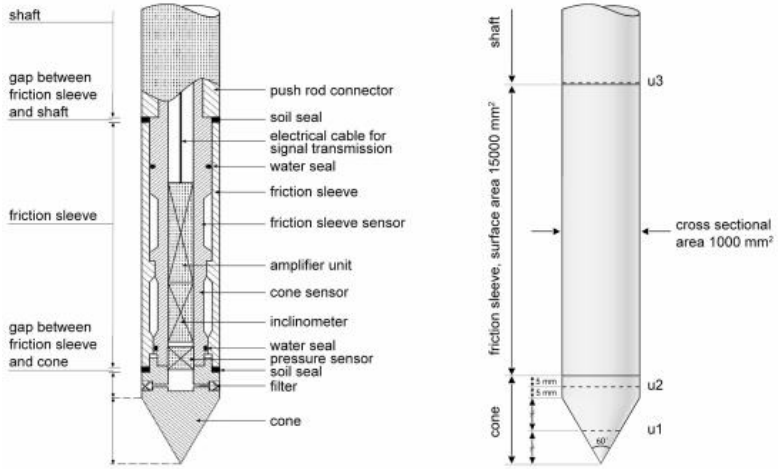
Yleistä

- CPTU kairauskokeessa maahan puristetaan kartion muotoisella kärjellä varustettua mittauskärkeä
  - Puristusnopeus 20 mm/s (±5mm)
  - Mahdollisimman pystysuoraan epäkeskeisen kuormituksen välttämiseksi
- Puristuksen aikana mitataan kärkikartioon kohdistuvaa vastusta (q_c), vaippahylsyn ja maan välistä kitkaa (f_s) ja puristuksen vaikutuksesta kehittynyttä huokospainetta (u_2) sekä tunkeutumispituutta (l).
  - Lisäksi vaaditaan lähes aina kaltevuuden (α) mittaus
  - Yleensä parametrit mitataan vähintään 2 cm välein, jolloin saadaan lähes jatkuva profiili
- Standardikärjessä huokospaineen mittaus tapahtuu kärkikartionsylinterijatkosta (tällöin huokospainetta kutsutaan u_2:ksi)

Kuvalähde: Geotech manual

Yleistä

- Kärkivastus q_c = Kartion tunkeutumisvastus. Kärkeä alaspäin puristettaessa kärkikartio syrjäyttää maata sivuilleen, mistä aiheutuu vastusta. Mitataan kartioon kohdistuvaa vertikaalista voimaa (muutetaan jännitykseksi), mikä muodostuu maan raerungosta ja huokospaineesta
- Vaippavastus f_s = Maan ja kitkahylsyn välinen kitkavastus. Mitataan vertikaalista voimaa, mikä muutetaan vastaamaan jännitystä. Hylsyn kitkaan vaikuttaa maan muuttunut jännitystila kartion tunkeutumisesta johtuen (savessa maa edelleen plastisessa tilassa). Vaippavastus rakeiden aiheuttamaa kitkaa.
- Huokospaine u_2 = Mitattu huokospaine koostuu luonnollisesta huokosvedenpaineesta u_0 sekä kartion tunkeutumisesta johtuvasta huokosylipaineesta Δu_2 (muodostuu keskiarvoisen jännityksen muutoksesta sekä myötäämisestä johtuvasta huokospaineen kasvusta normaalikonsolidoituneella maalla)
  - Δu_2 on lähes nolla hyvin vettä johtavissa maissa, kuten puhtaassa hiekassa



Kuvalähde: Peuchen&Terwindt 2014

Kärjen rakenne ja mitat

Kärjen halkaisija d_c sylinterijatkon kohdalta:
$35{,}3 \leq d_c \leq 36$ mm
Poikkipinta-ala 1000mm^2
Kartio-osan nimelliskulma 60° (sallitaan ±5°)

Vaippahylsyn halkaisija d_2 :
$d_2 \geq d_c$; $d_2 < (d_c + 0{,}35)$; $d_2 < 36{,}1$ mm
Hylsyn korkeus $132{,}5 < l_s \leq 135{,}0$ mm
Hylsyn nimellispinta-ala 15 000 mm^2

Huokospaineen mittaus kohdasta u_2
Suotimen halkaisija d_{fil}:
$d_2 - 0{,}2$ mm $\leq d_{fil} \leq d_2$
$d_c \leq d_{fil} \leq (d_c + 0{,}2)$ mm

Hyödyllisiä arvoja standardikärjelle

	Jännitys, MPa	Jännitys, kPa	Voima, N	Voima, kN	Massa, kg
Kärkivastus (kärkikartioon kohdistuva tunkeumavastus)	0,1	100	100	0,1	10
Kärkivastus	0,2	200	200	0,2	20
Kärkivastus	1	1 000	1 000	1	100
Kärkivastus, usein herkän kärjen maksimiarvo	10	10 000	10 000	10	1 000=1t
Kärkivastus, usein suurikapasiteettisen kärjen maksimiarvo	100	100 000	100 000	100	10 000=10t
Vaippavastus (vaippahylsyn ja maan välinen kitkavastus)	0,001	1	15	0,015	1,5
Vaippavastus	0,002	2	30	0,03	3
Vaippavastus	0,1	100	1 500	1,5	150
Vaippavastus, usein herkän kärjen maksimiarvo	0,5	500	7 500	7,5	750
Vaippavastus, usein suurikapasiteettisen kärjen maksimiarvo	1	1 000	15 000	15	1 500

	Jännitys, MPa	Jännitys, kPa	Vastaa syvyyttä vapaasta virtaamattomasta vedenpinnasta, m
Huokospaine	0,01	10	1
Huokospaine	0,02	20	*2*
Huokospaine	0,1	100	10

Kärkikartion poikkipinta-ala 10 cm^2, vaippahylsyn pinta-ala 150 cm^2

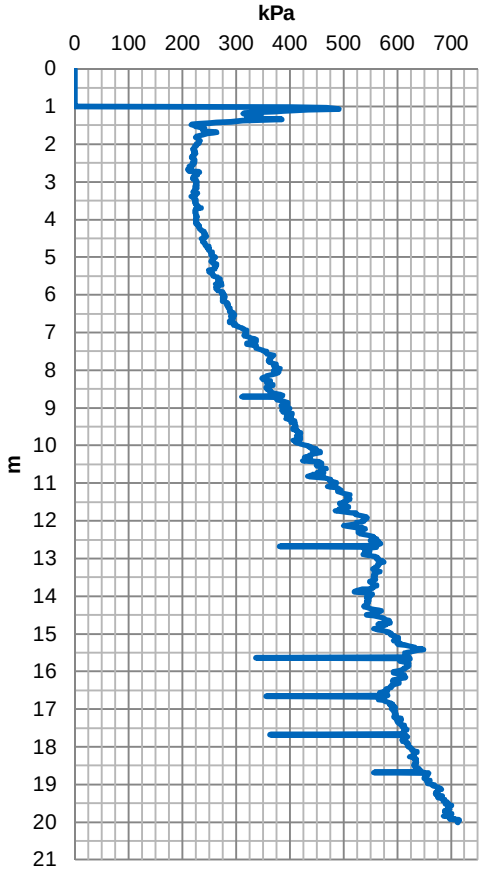
Esim. jos kaikki vaunun puristusvoima kohdistuu kärkivastukseen, herkän kärjen maksimikuormitus arvon saavuttamiseksi vaunun vastapaino puristukselle oltava 1 000 kg. Suurikapasiteettista kärjellä vastaavasti vaunun massa oltava 10 000 kg ja puristusvoima 100 kN, mikä nykyisellä kalustolla harvemmin saavutetaan.

Mitattu huokospaine muodostuu luonnollisesta vedenpaineesta sekä kärjen tunkeutumisesta maahan muodostuneesta huokosylipaineesta. Huokosylipaine tasaantuu luonnolliseen vedenpaineeseen, mikäli kärki pidetään riittävän kauan paikallaan.

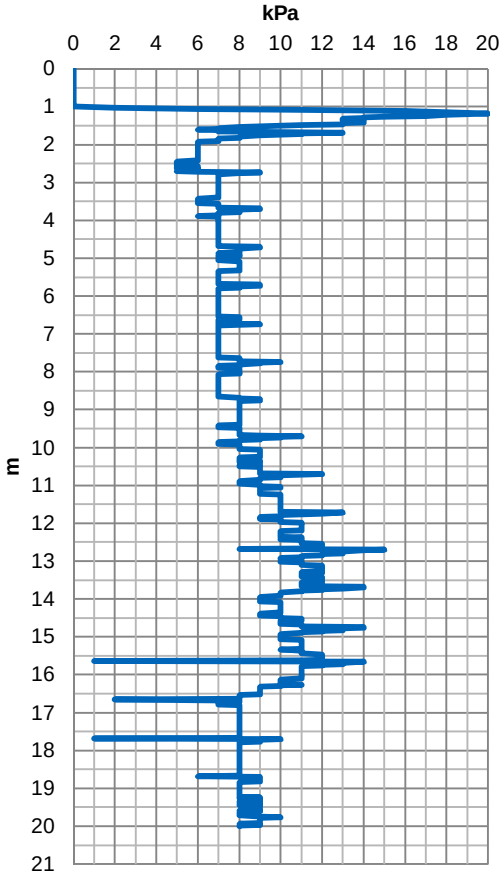
Esim. pohjaveden ollessa -1 m (metrin syvyydellä) luonnollinen huokosvedenpaine on virtaamattomassa tilassa 10 kPa. Kärjen tunkeutumisesta tälle syvyydelle aiheutuu ylipaine, minkä takia CPTU mittauksessa tallennettu arvo on tätä suurempi tasalaatuisessa maassa. Huokospaineen ylipaineen tasaannuttua huokospaineen arvo kuitenkin näyttäisi 10 kPa

CPTU diagrammi

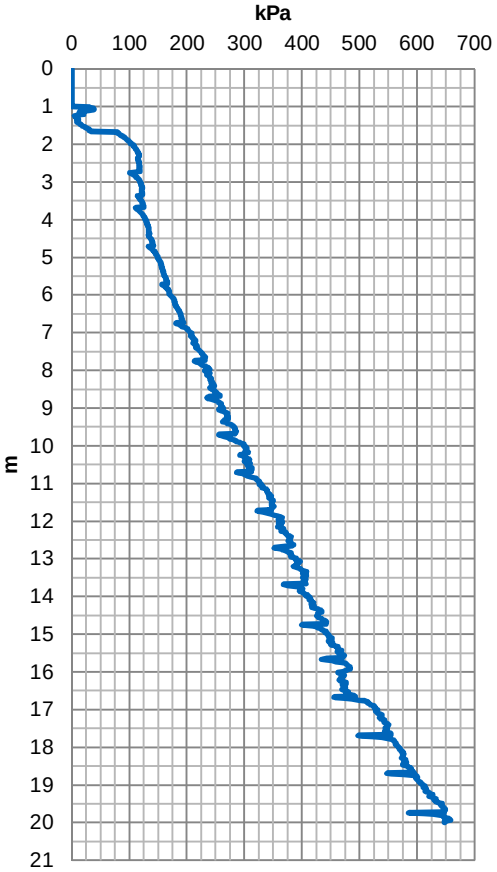
Kärkivastus q_c



Vaippavastus f_s



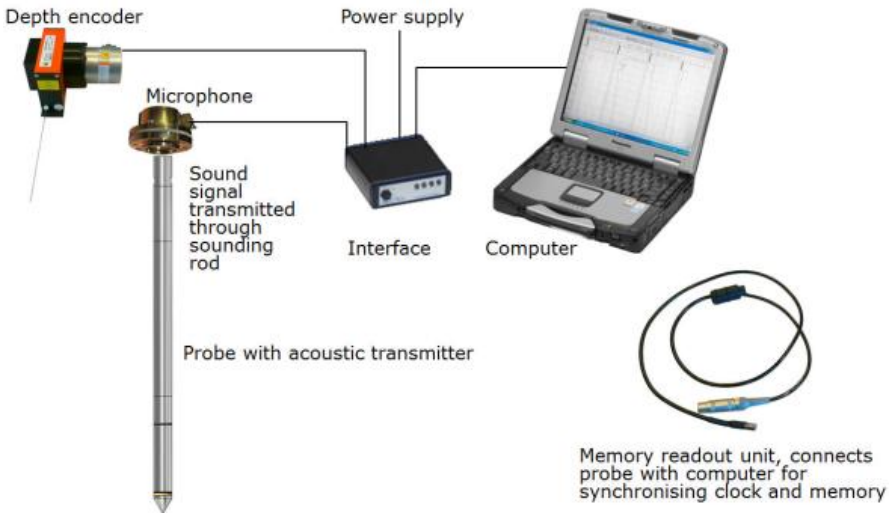
Huokosvedenpaine u_2



Laitteisto

- CPTU kairauskokeessa tarvittavat laitteistot:
  - Puristinlaitteisto (kairavaunu)
    - Kykenevä puristamaan tasaisella nopeudella ja omattava riittävä vastavoima puristukselle, joko painonsa avulla tai ankkuroimalla
  - Syvyyden mittaus
    - Mittausväli vähintään 20 mm (50 mm)
  - Tiedonsiirto
    - Akustisesti, radioaalloilla, johdolla, muistiin tallentaen
  - Virtalähde
  - Tiedonkeruulaitteisto
    - Kerää tiedot yhteen
  - Kenttätietokone
  - CPTU kärki
    - Rasva- tai huokossuotimellinen

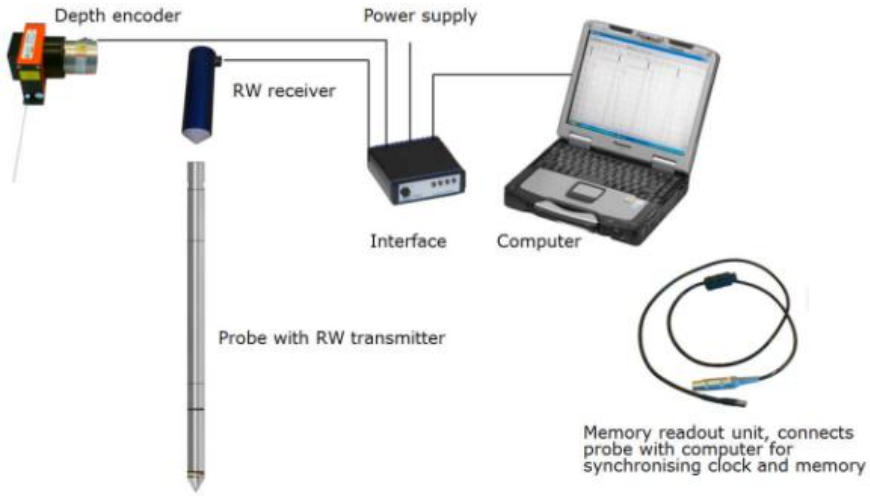
Laitteisto



Tiedonsiirto akustisesti

- Lähetin ja vastaanotin
- Reaaliaikainen näkymä
- Kärki tarvitsee akun toimiakseen

Kuvalähde: Geotech manual

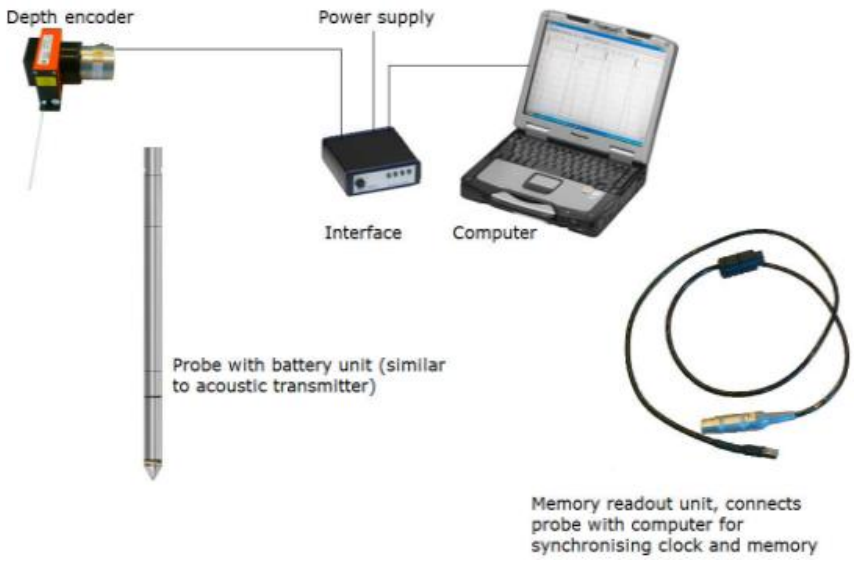


Tiedonsiirto radioaalloilla

- Lähetin ja vastaanotin
- Reaaliaikainen näkymä
- Kärki tarvitsee akun toimiakseen

Kuvalähde: Geotech manual

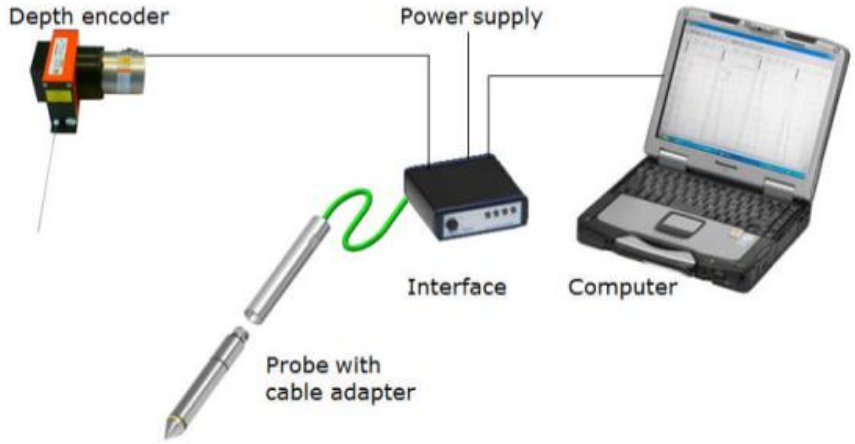
Laitteisto



Kärkeen tallentava

- Ei reaaliaikainen
- Mittaustieto puretaan kärjen ylösnoston jälkeen
- Kärki tarvitsee akun toimiakseen

Kuvalähde: Geotech manual



Tiedonsiirto kaapelilla

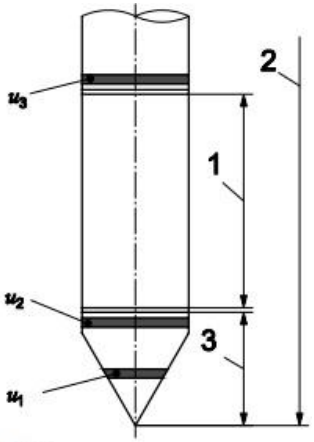
- Reaaliaikainen näkymä
- Voidaan käyttää mm. seismisten kokeiden tekoon lisämoduulin kanssa

Kuvalähde: Geotech manual

CPTU kärkiä

Kuvalähde: Mayne 2007

- Standardikärjen lisäksi valmistetaan poikkipinta-alaltaan eri kokoisia kärkiä mm. 1-40 cm^2 (standardikärki 10 cm^2)
- Huokospainemittaus voi tapahtua kärkikartion puolesta välistä (u_1), standardikärjen mukaisesti kärkikartion sylinterijatkosta (u_2) tai välittömästi kitkahylsyn yläpäästä (u_3)
  - Pehmeässä savessa mittausarvojen keskinäinen suuruus $u_1 > u_2 > u_3$



Selite

1 kitkahylsy
2 kairan kärkiosa
3 kärkikartio

Kuvalähde: ISO, E. 22476-1.2007

Rasva- ja huokossuodatin

- Filtterin tarkoitus on erottaa muodostunut huokosvedenpaine partikkelien välisestä paineesta
  - Suotimen tyypistä johtuen kärjen kyllästysmenetelmät eroavat toisistaan
  - Tulkinnan kannalta ei ole merkitystä kumpaa suodinta käytetty, kunhan käytetyt kyllästysaineet tarkoitukseen ja olosuhteisiin sopivat

Kuvalähde: Sandven 2010

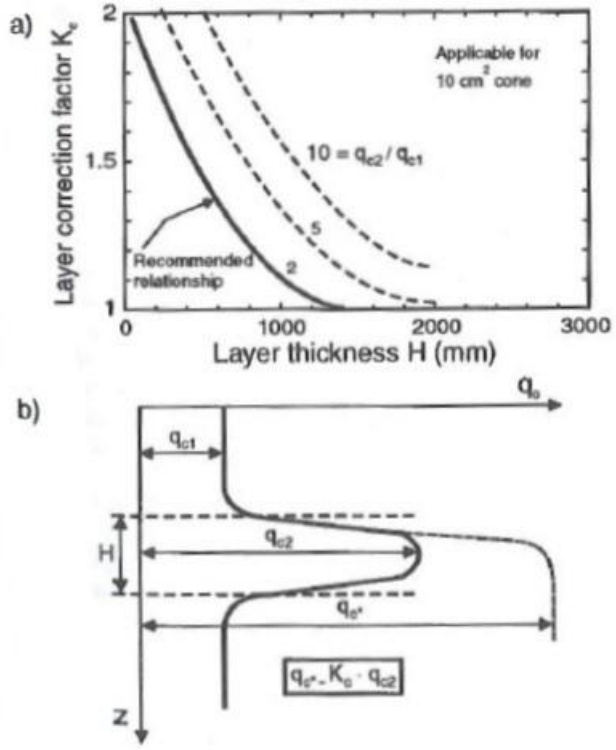
Mittausparametreihin vaikuttavat tekijät

- Kärkivastus
  - Suurempi mitä karkeampi maa-aines on kyseessä
  - Suurempi mitä tiiviimpi kitkamaa on
  - Pienempi mitä suurempi on maan sensitiivisyys
  - Suurempi mitä suurempi on koheesiomaan ylikonsolidaatioaste
- Vaippavastus
  - Suurempi mitä karkeampi maa-aines on kyseessä
  - Suurempi mitä tiiviimpi kitkamaa on
  - Pienempi mitä suurempi on maan sensitiivisyys
  - Suurempi mitä suurempi on koheesiomaan ylikonsolidaatioaste
- Huokospaine
  - Korkeampi mitä hienorakeisempi maa-aines on kyseessä
  - Suurempi mitä suurempi on koheesiomaan suljettu leikkauslujuus (norm.kons.)
  - Pienempi mitä suurempi on maan ylikonsolidaatioaste
  - Suurempi mitä suurempi on maalajin sensitiivisyys

(Lähde kairausopas 6)

Maan kerroksellisuuden vaikutus

- Kärkivastuksen arvoon vaikuttaa laajasti kärjen ympärillä oleva maa
  - Nähtävissä kärjen arvoissa kerroksellisessa maassa
  - Vaikutus on sitä suurempi, mitä suurempi on jäykkyyksien suhde kahden maakerroksen välillä
  - Kahden pehmeän kerroksen välissä oleva jäykkä kerros on oltava 0.4-0.7 m paksu, jotta voidaan olettaa mittauksen näyttävän täsmällisiä arvoja kerroksen keskellä
  - Vastaavasti pehmeä kerros jäykkien kerrosten välissä oltava 0.2-0.4 m paksu
  - Ohuemman kerrokset kyllä havaitaan, mutta arvot voivat vääristyä
  - Esim. Ohut hiekkakerros savikerrosten välissä voi vääristyneiden arvojen takia käyttäytyä enemmän siltin kaltaisesti



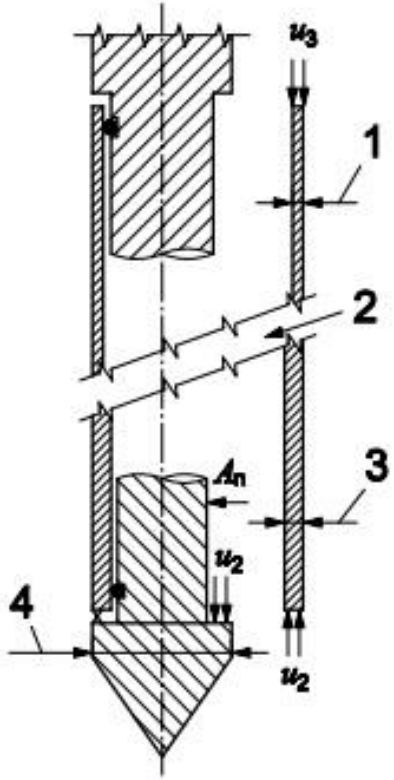
Kuvalähde: Lunne et al. 1997

Parametrien tallentuminen

- Koska kärkivastuksen, huokospaineen ja vaippavastuksen mittaukset tapahtuvat eri kohdista kärkeä, tällöin parametrien rekisteröityminen tapahtuu eri aikaan samalla syvyystasolla
  - Vaippakitka (f_s) mitataan keskiarvona 134 mm korkean hylsyn avulla
  - Huokospaine (u_2) välittyy mittaukseen 5 mm korkean filtteri läpi
    - Hyvin ohueiden kerrosten havannointi riippuu mittaustiheydestä ja kuinka nopeasti mittausjärjestelmä reagoi paineen vaihteluun

Parametrien riippuvuus

- Kärjen rakenteesta johtuen mitatut parametrin eivät ole täysin riippumattomia toisistaan
  - Riippuvuuden suuruus voi vaihdella kärkikartion ja kitkahylsyn mahdollisesta kulumisesta johtuen. Osin tämän takia kärjen sallitut mitat ja kuluminen tarkoin määritetty standardissa.
  - Saavuttaakseen oikeita arvoja kärkivastusta ja vaippavastusta voidaan korjata huokospainevaikutuksella hienojakoisissa maissa, missä huokosvedenpaineen arvot ovat suuria.
  - Vaippavastuksen osalta korjauksen tekeminen suositus eurostandardissa.



Selite

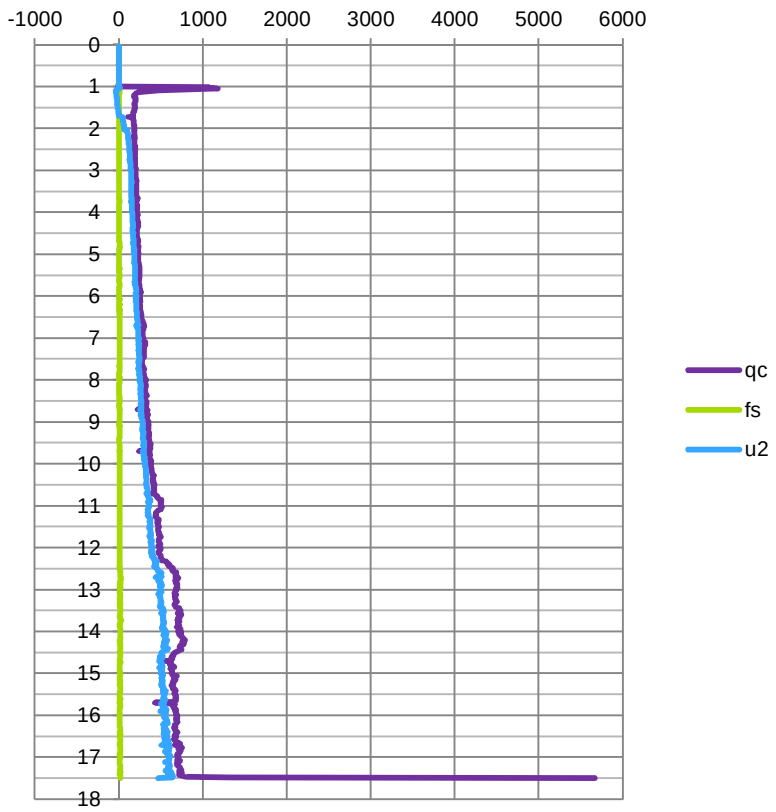
1 kitkahylsyn poikkipinta-ala (yläosan) A_{st}
2 kitkahylsyn pinta-ala A_s
3 kitkahylsyn poikkipinta-ala (alaosan) A_{sb}

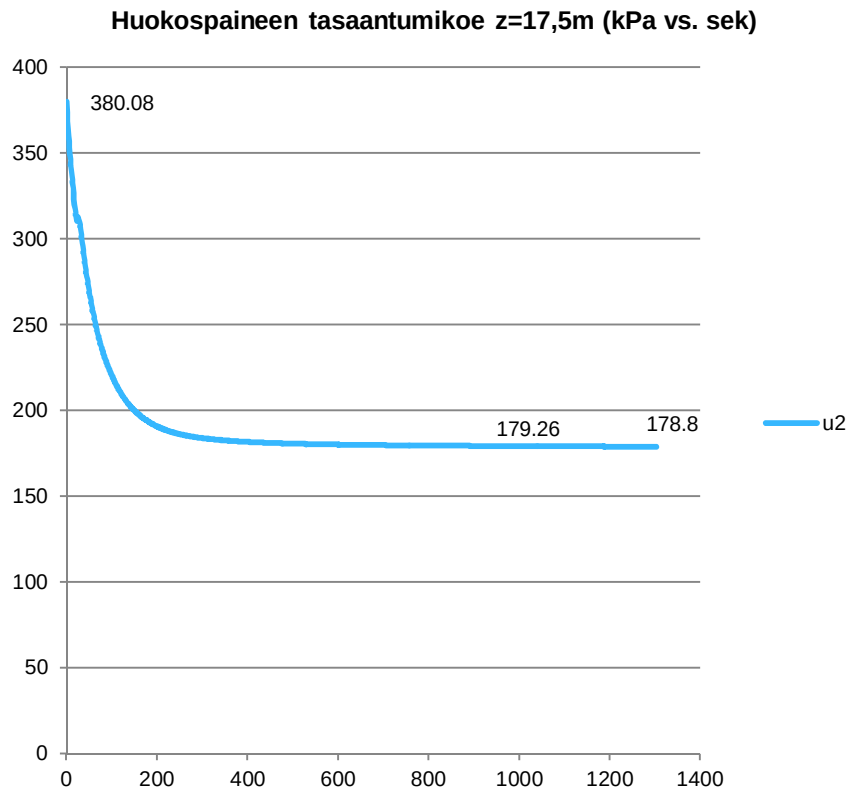
Kuvalähde: ISO, E. 22476-1.2007

Huokospaineen tasaantumiskoe

- Huokospaineen tasaantumiskoe antaa arvokasta tietoa luonnollisesta vedenpaineesta (u_0)
  - Pohjavedenpinnan tasoa tarvitaan apuna osassa tulkinnoissa, kuten suljetun leikkauslujuuden tulkinta huokosylipaineesta (u_2 - u_0)
  - On suositeltavaa tehdä huokospaineen tasaantumiskoe kairauksen päättyessä hyvin vettä johtavaan kerrokseen
    - Ajallisesti huokospaineen tasaantumiseen ei mene kauaa
    - Toisinaan läpäistäessä hyvin vettä johtavia kerroksia u_2 lähes sama kuin u_0
- Huokospaineen tasaantumiskokeessa huokospainetta mitataan ajansuhteen

Huokospaineen tasaantumiskoe





- Tulosten perusteella luonnollinen pohjavedenpinnantaso noin 38 cm maanpinnan yläpuolella (paineellista pohjavettä)
  - Mittaus tehty 14.9.2015 eli syksyn aikaan, kun syyssateet jo osittain alkaneet

Lähteet

- Peuchen, J. & Terwindt, J. 2014 Keynote 1: Introduction to CPT accuracy, Proc. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing. www.cpt14.com
- Geotech manual: Users manual, CPT Geotech nova Saatavilla: http://www.geotech.eu/index.php/products/cptu
- Vaasan ammattikorkeakoulun luentokalvot. Saatavilla: http://www.cc.puv.fi/~ot/ISA0501_Automaatiotekniikan%20perusteet/3-Mittaustekniikka/3g%20Voiman%20mittaus.pdf
- Kairausopas VI 2001 - CPTU/puristinkairaus - puristin-heijarikairaus. Versio 1.00 - 7.6.2001. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Nummela: Nummelan Kopiopalvelu Oy. s.97
- Sandven, R. 2010. Influence of test equipment and procedures on obtained accuracy in CPTU, Proceedings, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, 26 pp.
- Campanella, R. G., & Howie, J. A. (2008). Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data. *Geotechnical Research Group, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia*.
- Robertson, P. K. (2010, May). Estimating in-situ Soil Permeability from CPT& CPTu. In *Memorias del 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, California State Polytechnic University Pomona, CA. http://www. cpt10. com/PDF_Files/2-51Robehc. pdf*.
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. 1997. Cone penetration testing. Geotechnical Practice.
- Mayne, P. W. (2007). Cone penetration testing state-of-practice. *Transportation Research Board. Synthesis Study. NCHRP Project*, 20-05.
- ISO, E. 22476-1.2007. Geotechnical investigation and testing-field testing–part, 1
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. 1997. Cone penetration testing. Geotechnical Practice.