# CPT(U) kairauskokeen perusteet

Juha Selänpää
Tampereen teknillinen yliopisto

9.5.2016

# 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
- $s_u$ 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

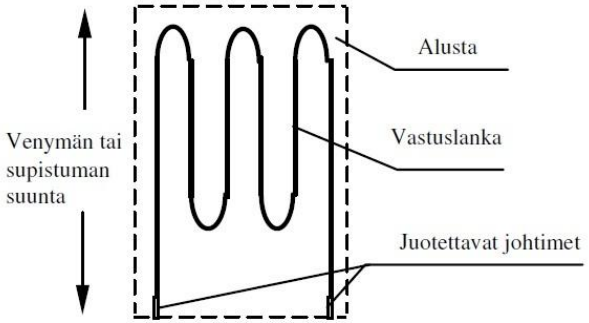
# Ohjeet

- CPTU- kairauskokeessa noudatettavien ohjeiden pätevyysjärjestys Liikenneviraston hankkeissa:

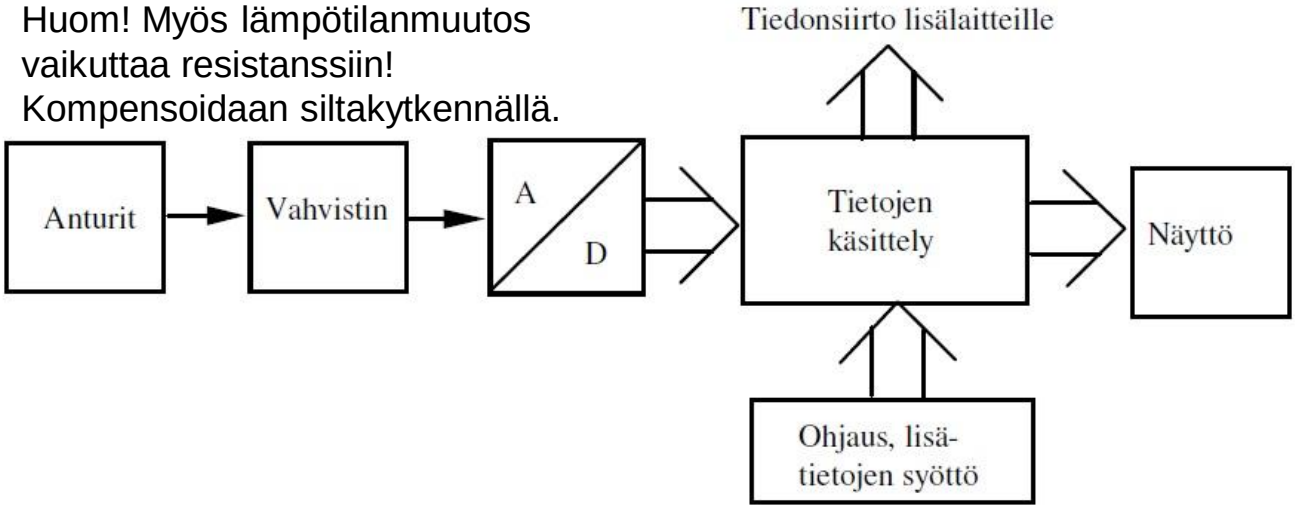
1. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Liikennevirasto 2015
2. EN ISO 22476-1:2012 Geotekninen tutkimus ja testaus. Kenttäkokeet. Osa 1: Sähköinen puristinkairauskoe
3. SGY Kairausopas VI, SGY 2001, soveltuvin osin

# Mittauslaitteiston toiminta (yleisesti)

- Voimanmittaus venymäliuskan avulla perustuu **resistanssin muutokseen vastuslangan poikkipinta-alan muuttuessa**
  - Venymäliuskan puristuu kasaan samalla, kun kappale mihin se on kiinnitetty, puristuu kasaan
  - Langan puristuessa kasaan, sen poikkipinta-ala muuttuu
  - Huom! Myös lämpötilanmuutos vaikuttaa resistanssiin! Kompensoidaan siltakytkennällä.




Kuvalähde: Vaasan ammattikorkeakoulun luentokalvot



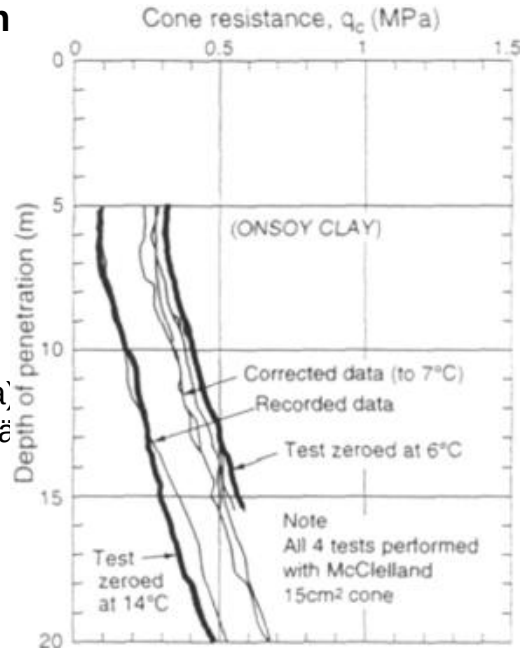

Kuvalähde: Vaasan ammattikorkeakoulun luentokalvot

# Mittaustekniikka

- 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.

# Lämpötilan ja kuormituksen vaikutus antureihin

- CPTU-kärjen rakenteesta ja käytetyistä antureista riippuen kuormituksen ja lämpötilavaikutusten näkyminen jännitteessä voi olla joko **jännitettä lisäävä tai pienentävä**.
  - Mittaus voi tapahtua myös **virran muutoksesta, jolloin lämpötilan vaikutus on käänteinen jännityksen muutokseen**
- Esimerkkinä kuitenkin kuparisesta johtimesta valmistettu venymäliuska, mikä mittaa kappaleeseen kohdistuvaa puristusvoimaa jännitteen muutoksesta:
  - 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

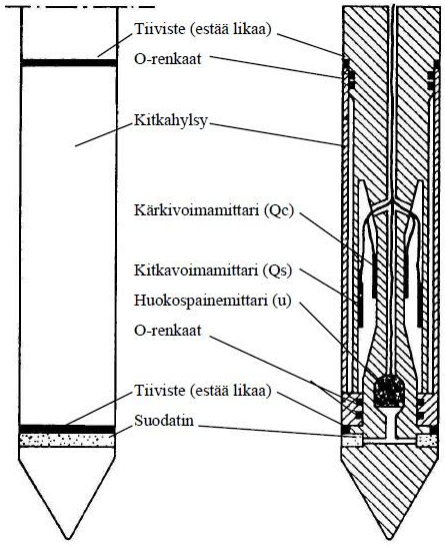
# Soveltuvuus

- Sopii pehmeiden maiden ja löysien kitkamaiden tutkimiseen
  - **Maakerrokset**
  - **Lujuusominaisuudet**

- Rajoitteet:
  - Käytettävän kärjen mittausalue **(kuinka paljon kuormaa kestää)**
  - Puristinlaitteiston kapasiteetti **(tankoja EI saa lyödä!)**

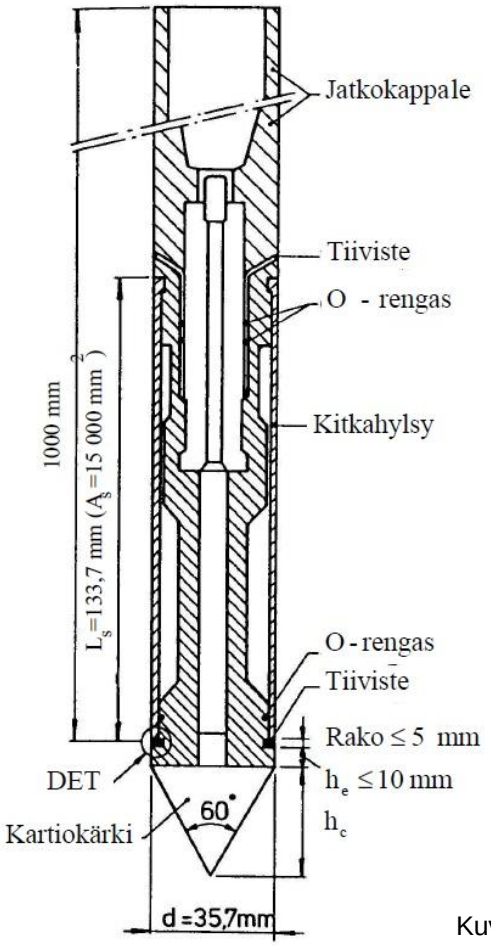
# Mitatut kuormitusarvot CPTU kairauskokeessa

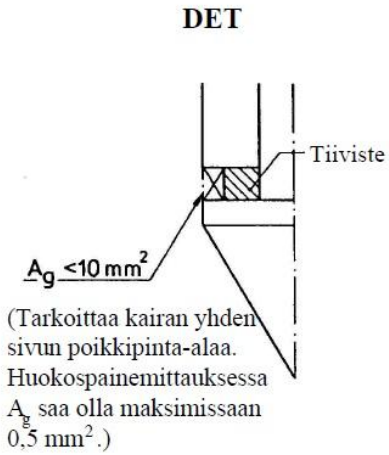
- **Kärkivastus** $q_c$ = Kartion tunkeutumisvastus. Kärkeä alaspäin puristettaessa **kärkikartio syrjäyttää maata sivuilleen**, mistä aiheutuu vastusta. Mitataan kartioon kohdistuvaa vertikaalista voimaa (muutetaan jännitykseksi), joka muodostuu maan **raerungosta ja huokospaineesta ($q_T$>$u_2$)**
- **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 $\Delta u_2$** (muodostuu keskiarvoisen jännityksen muutoksesta sekä myötäämisestä johtuvasta huokospaineen kasvusta normaalikonsolidoituneella maalla)
  - $\Delta u_2$ on lähes nolla hyvin vettä johtavissa maissa, kuten puhtaassa hiekassa




Kuvalähde: Kairausopas 6

# CPT-kaira



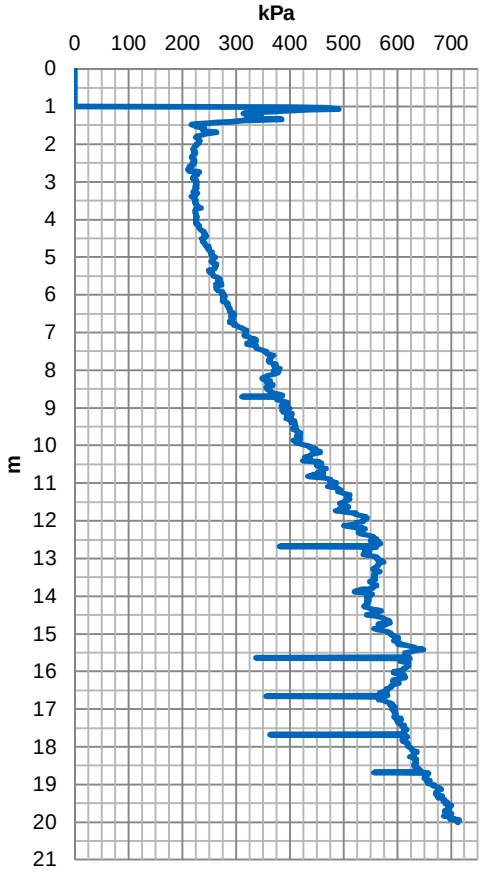




Puhutaan myös CPT-kairauksesta, missä ei ole huokosvedenpaineen mittausta.

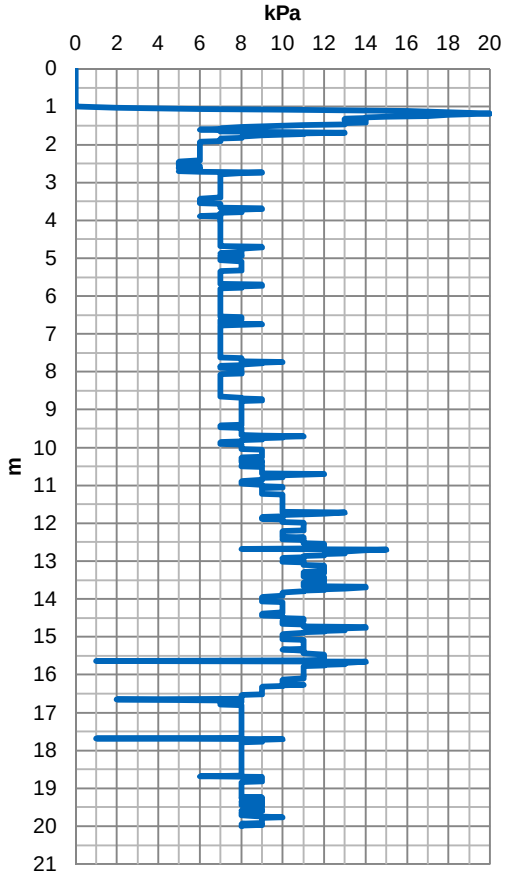
Kuvalähde: Kairausopas 6

# CPTU kairauskoediagrammi

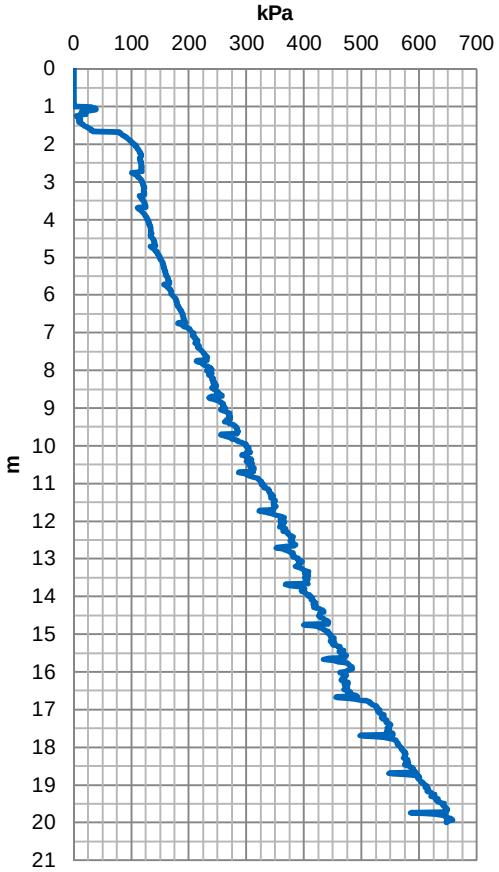
**Kärkivastus $q_c$**




**Vaippavastus $f_s$**



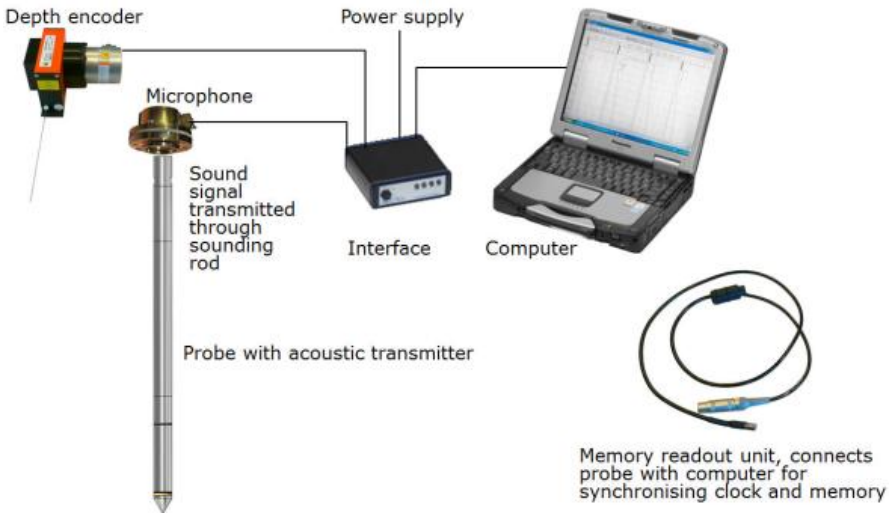

**Huokosvedenpaine $u_2$**



# 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

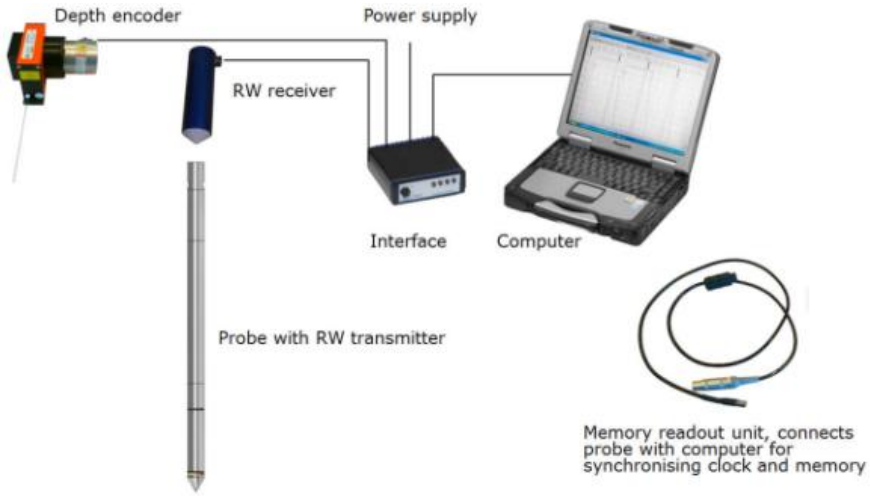
# Tiedonsiirto




## Tiedonsiirto akustisesti

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

Kuvalähde: Geotech manual

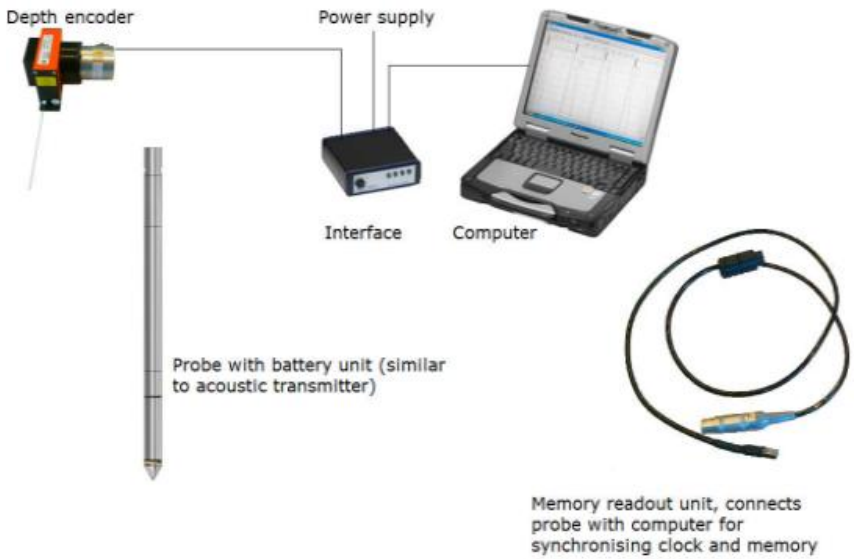



## Tiedonsiirto radioaalloilla

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

Kuvalähde: Geotech manual

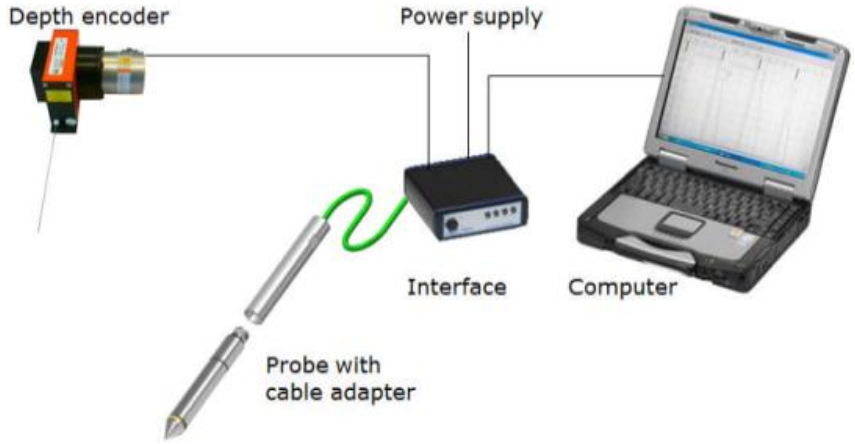
# Tiedonsiirto




## Kärkeen tallentava

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

Kuvalähde: Geotech manual




## Tiedonsiirto kaapelilla

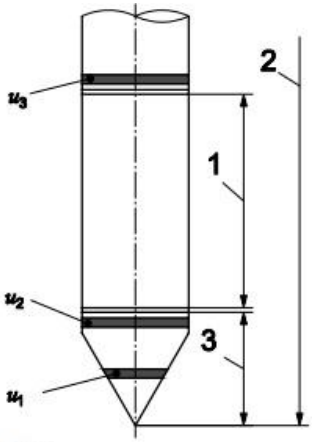
- Reaaliaikainen näkymä
- Voidaan käyttää mm. seismisten kokeiden tekoon lisämoduulin kanssa

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

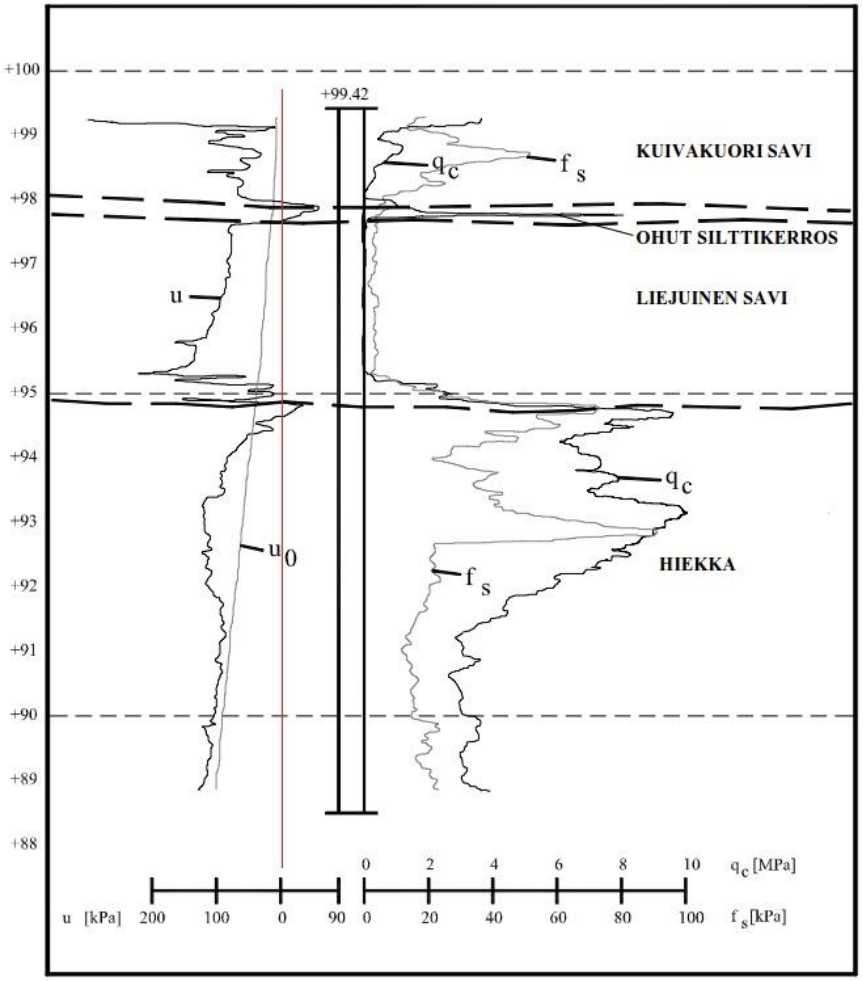
Kuvalähde: Sandven 2010

# 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)

# Mittausparametreihin vaikuttavat tekijät




Kuvalähde: Kairausopas 6

Vastusten arvoille ei voida antaa tarkkoja arvoja tietyissä maalajeissa, sillä arvojen suuruuteen vaikuttaa kuinka syvällä mittaus tehdään (**jännitystila**).

Hiekka hyvin vettä johtavaa, minkä takia mitattu huokosvedenpaine lähes sama kuin luonnollinen huokospaine. Kärkivastus suhteessa huomattavasti suurempi kuin huokospaine. Vaippavastuksen arvot pehmeää savea suuremmat. Huom! Paksuissa hiekkakerroksissa kärjen lämpötila voi nousta kitkan takia. Voi aiheuttaa vääristymää tuloksiin.

Pehmeässä savessa huokospaine suhteessa kärkivastukseen on hyvin suuri, mutta ei kuitenkaan suurempi kuin **korjattu** kärkivastus. Vaippavastuksen arvot hyvin pieni.

Silttikerroksessa mitattujen arvojen vaihtelu savimaata suurempaa. Ohut silttikerros pehmeän saven läheisyydessä tai kärjen tunkeutuessa savesta silttikerrokseen voi aiheuttaa negatiivisen huokospaineen eli imua. Mikäli kärki huonosti kyllästetty, huokospainemittauksessa on tämän jälkeen ”laahaamista” (profiilissa kaarevuutta).

Kuivakuoressa voi tapahtua myös tällaista imua huokospaineessa, jolloin kärjen kyllästys vaarantuu. Tämän takia kuivakuoreen käytetään avausta. Kärkivastus ja vaippavastus pehmeää savea suurempia.

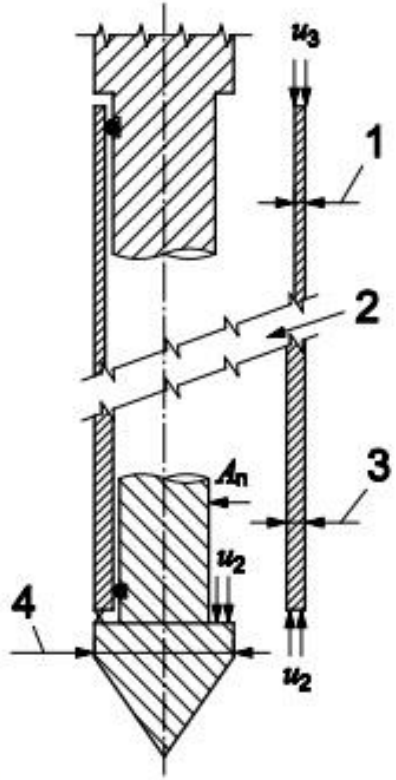
Turpeessa huokospaineet voivat olla myös hyvin pieniä. Kärkivastus on suhteessa huokospaineeseen suurempi (ei kuitenkaan yhtä paljon kuin hiekassa)

# 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) $A_{sb}$

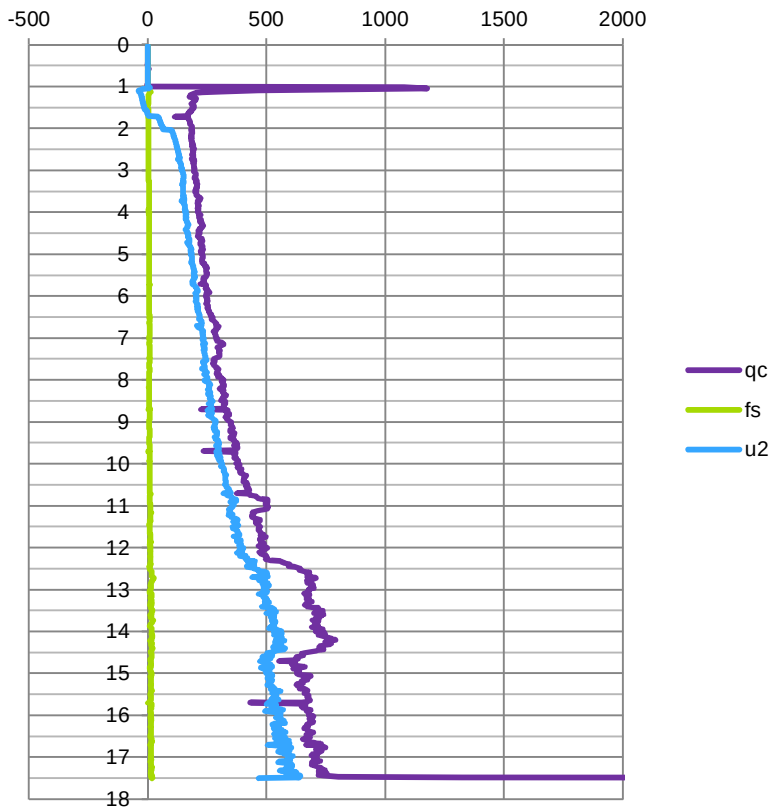
Kuvalähde: ISO, E. 22476-1.2007

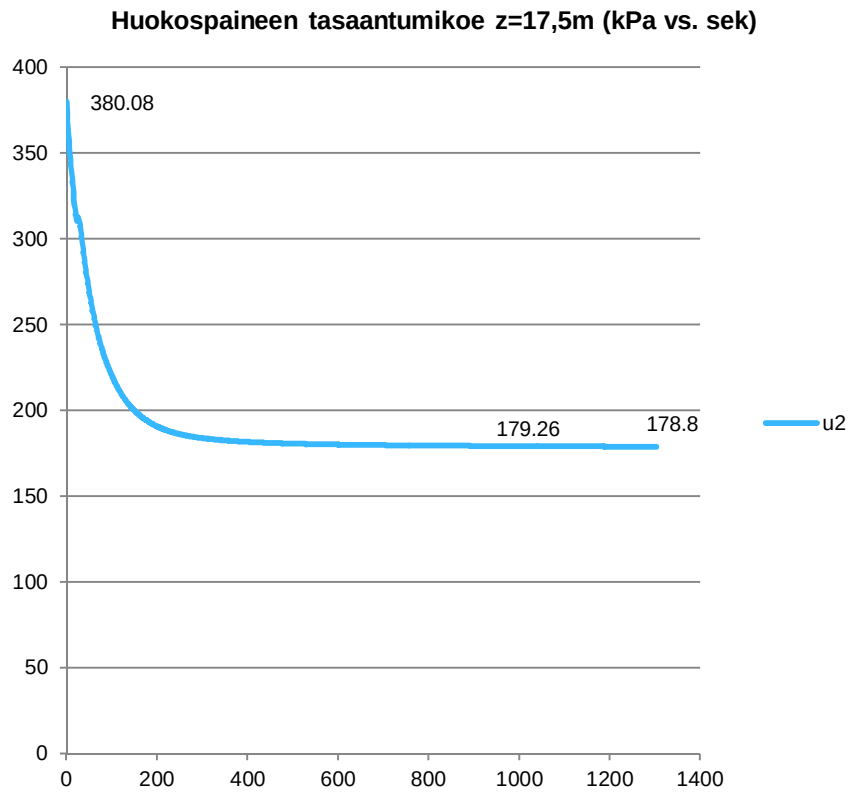
# Huokospaineen tasaantumiskoe

- 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 (kun käytetään suurikapasiteettista kärkeä)**
    - Ajallisesti huokospaineen tasaantumiseen hyvin vettäjohtavassa kerroksessa ei mene kauaa
    - Toisinaan läpäistäessä hyvin vettä johtavia kerroksia $u_2$ lähes sama kuin $u_0$
- **Huokospaineen tasaantumiskokeessa huokospainetta mitataan ajansuhteen**

- Useimmiten huokospaineen tasaantumiskoe pitää käynnistää kenttäkoneelta, jotta arvot tallentuvat muistiin

# 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:


- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. 1997. Cone penetration testing. Geotechnical Practice.
- ISO, E. 22476-1.2007. Geotechnical investigation and testing-field testing–part, 1
- 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.
- Kairausopas VI 2001 - CPTU/puristinkairaus - puristin-heijarikairaus. Versio 1.00 - 7.6.2001. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Nummela: Nummelan Kopiopalvelu Oy. s.97
- Mayne, P. W. 2007. Cone penetration testing state-of-practice. *Transportation Research Board. Synthesis Study. NCHRP Project*, 20-05.
- Geotech manual Saatavilla: http://www.geotech.eu/index.php/products/cptu