Virheet ja niiden mahdolliset syyt sekä mittauksen luokittelu

Juha Selänpää
Tampereen teknillinen yliopisto

9.5.2016

CPTU kairauskokeen virheet

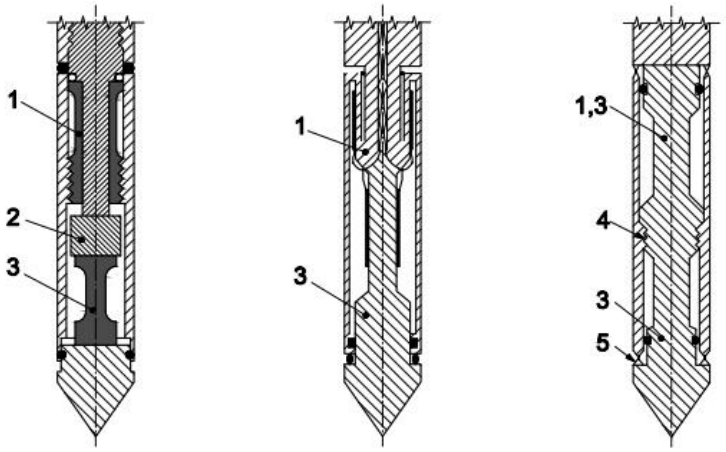
- **Mittauslaitteistosta johtuva virhe**
  - **Mittausvirhe** (valmistajan ilmoittama tarkkuus)
    - Useimmiten sidonnainen sallittuun kuormitusasteikkoon
- **Suorituksesta ja valmisteluista johtuvat virheet**
  - Mittaukseen tallentuvia virheitä voidaan arvioida nollalukeman poikkeamista tai raakadatasta
- Tarkistettavat virheet mittaustiedoista
  - Huokospaineen mittauksen onnistuminen
  - Sähköiset virheet mittauskanavissa

Mittauslaitteiston virhe

- Valmistajan ilmoittama **mittaustarkkuus antaa hyvän kuvan laitteiston laadusta**
  - Mitä pienempi mittausvirhe, sitä paremmin suunniteltu ja valmistettu kärki
  - Huomioitavaa, että todellinen mittausvirhe johtuu useimmiten mittausasteikon suuruudesta

CPTU-kärkien kapasiteetit

- **Suurikapasiteettinen, suuri mittausasteikko** kärkivastuksen ja vaippavastuksen osalta esim. kärkivastus 0…75 MPa, vaippavastus 0…1 MPa
- Suuri mittausasteikko takaa kärjelle **kestävän rakenteen**.
  - Rakenne paksuudet suurempia kuin herkässä kärjessä
  - Runko suunniteltu kestävämmäksi
  - 0…75 MPa => kärkikartioon sallitaan 7,5t kuormitusmassa. Lisäksi kärjillä on ylikuormituskapasiteetti yleensä 50…100 %.
  - Suuri kapasiteettisen kärjen puristaminen lähelle maksimikapasiteettiaan **vaatii kairavaunulta suuren omamassan tai hyvän ankkuroinnin.**



a) kärkivastuksen ja vaippakitkan voima-anturit puristuksessa

b) kärkivastuksen voimamittari puristuksessa ja vaippakitkan voima-anturit vedossa

c) kairan kärkiosa, jolla vaippakitkan arvo saadaan vähentämällä ylemmän anturintuloksesta kärkivoima-anturin antama arvo

Selite

1 kitkavoima-anturi
2 kärkivastuksen ylikuormitussuoja
3 kärkivoima-anturi
4 kierteet
5 tiiviste

Kuvalähde: ISO, E. 22476-1.2007

CPTU-kärkien kapasiteetti

- Mittausasteikon rajaaminen pienemmäksi pienentää myös mittausvirheen suuruutta
  - Herkällä kärjellä kärjen kuormitusrungon materiaali paksuus on pienempi (mitataan sähköisesti muodonmuutosta, mihin kärjen rakenne reagoi)
  - Kalibroinnissa epälineaarisuus jää pienemmäksi
- **”Keittiövaa’alla voidaan punnita kevyitä kuormia tarkemmin kuin autovaa’alla, mutta keittiövaaka hajoaa, mikäli punnitaan autoa.”**
- Tarkkuuden esittämisessä ei ole standardisoitua tapaa (FSO vs. MV)
  - FSO (Full Scale Output) antaa hyvän kuvan laitteiston mittaustarkkuudesta koko mittausasteikolle (**yleisemmin käytössä**)
    - Valmistaja lupaa virheen olevan maksimissaan esim. 0,2% kokomittausasteikolla (FSO)
  - MV:n (Measured Value) etuna, ettei mittausasteikon alkupään arvot vääristy niin paljoa kuten FSO:lla.
    - Valmistaja lupaa virheen olevan maksimissaan esim. 0,5% mitatusta arvosta (MV)
- **Tarkkuuden löytyy valmistajan toimittamista papereista (tai kysymällä)!**

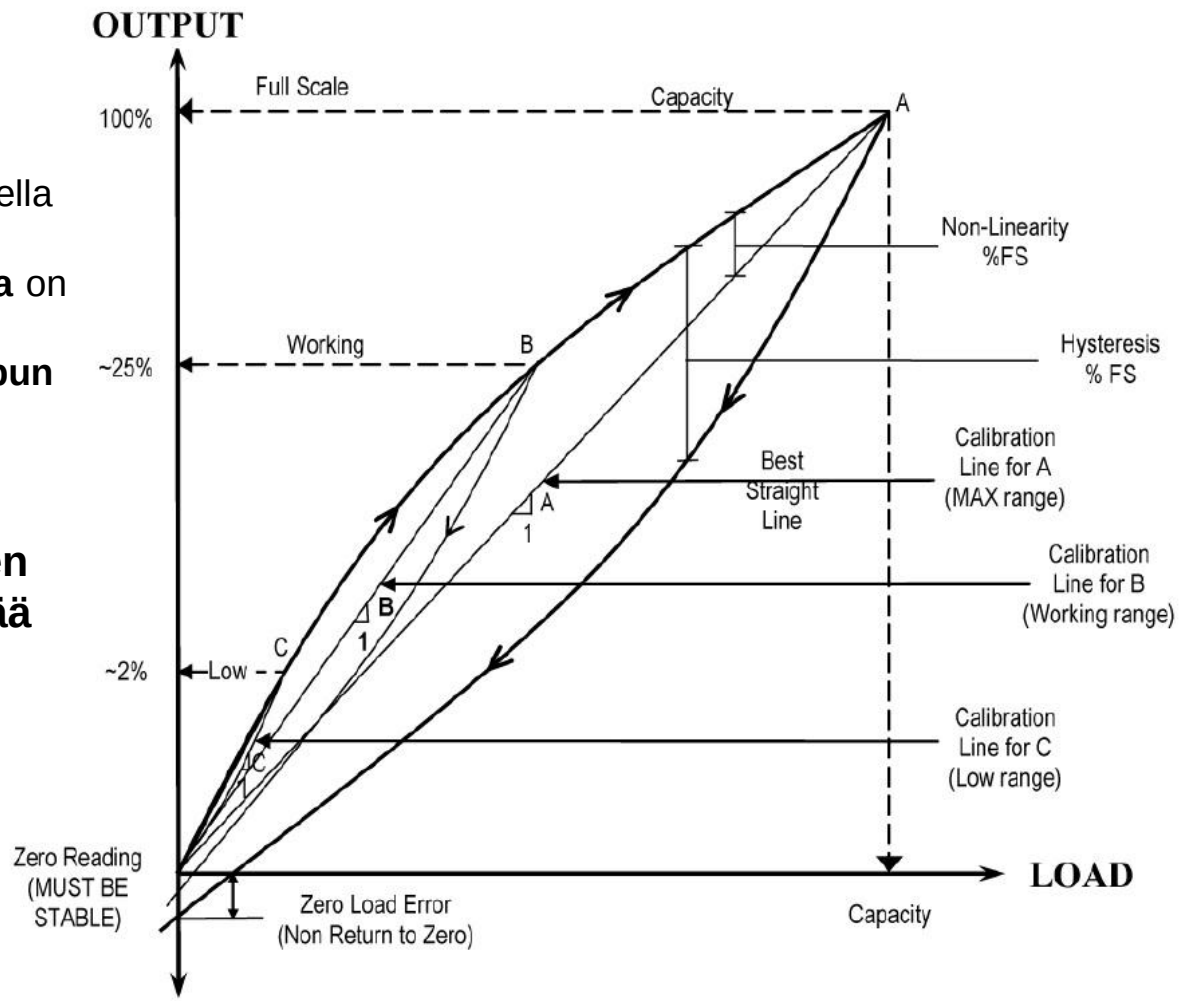
Nollalukemien poikkeama

- Kairauskoetta ennen ja jälkeen **mitataan** mittauslaitteiston näyttämät **nollalukemat**
  - Nollalukemat mitataan kärjen ollessa **kuormittamattomana**
  - **Alkunollalukemat asettavat mittauslaitteiston nollatason** (vastaa laboratoriovaa'an tai vastaavan laitteen nollausta ennen punnitusta, mutta CPTU mittauksessa kuormituksen muutosta verrataan näihin alun näyttämiin alkunollalukemiin)
    - **Alkunollalukemat pysyvät lähes samoina, kun kärkeä huolletaan hyvin ja CPTU-kairauskokeen alkuvalmistelut tehdään huolella**
  - **Loppunollalukema** mitataan **välittömästi** kärjen takaisin noston jälkeen
    - Kevyt putsaus sallitaan
    - Kärjen ylösnosto maasta voi aiheuttaa imua kärkeen, mikä voi näkyä negatiivisina huokospaineena kärjessä. Suosiollisissa olosuhteissa (lämpötilaero maan ja ilman välillä ei ole liian suuri tai pakkasella) voidaan hetki odottaa, että negatiivinen paine tasaantuu. Varoittava, ettei kärjen lämpötila ehdi muuttua.
- Nollalukemien erotus eli **poikkeama auttaa arvioimaan kairauskokeen onnistumista**!
  - **CPTU-kairauskokeen etuna on, että kairauksen onnistumista voidaan arvioida jälkikäteen!**

Nollalukemien poikkeama

- Tyypillinen voima-anturi kuormitus kuvaaja
- Anturin kalibrointi käyrä liioitetulla epälineaarisuudella termien selventämiseksi
- **Nollalukeman poikkeama** on pystyakselin **muutos kuormituksen alun ja lopun välillä.**

- **Sama kuin punnitsemisen jälkeen vaaka ei näyttäisi enää nollaa**



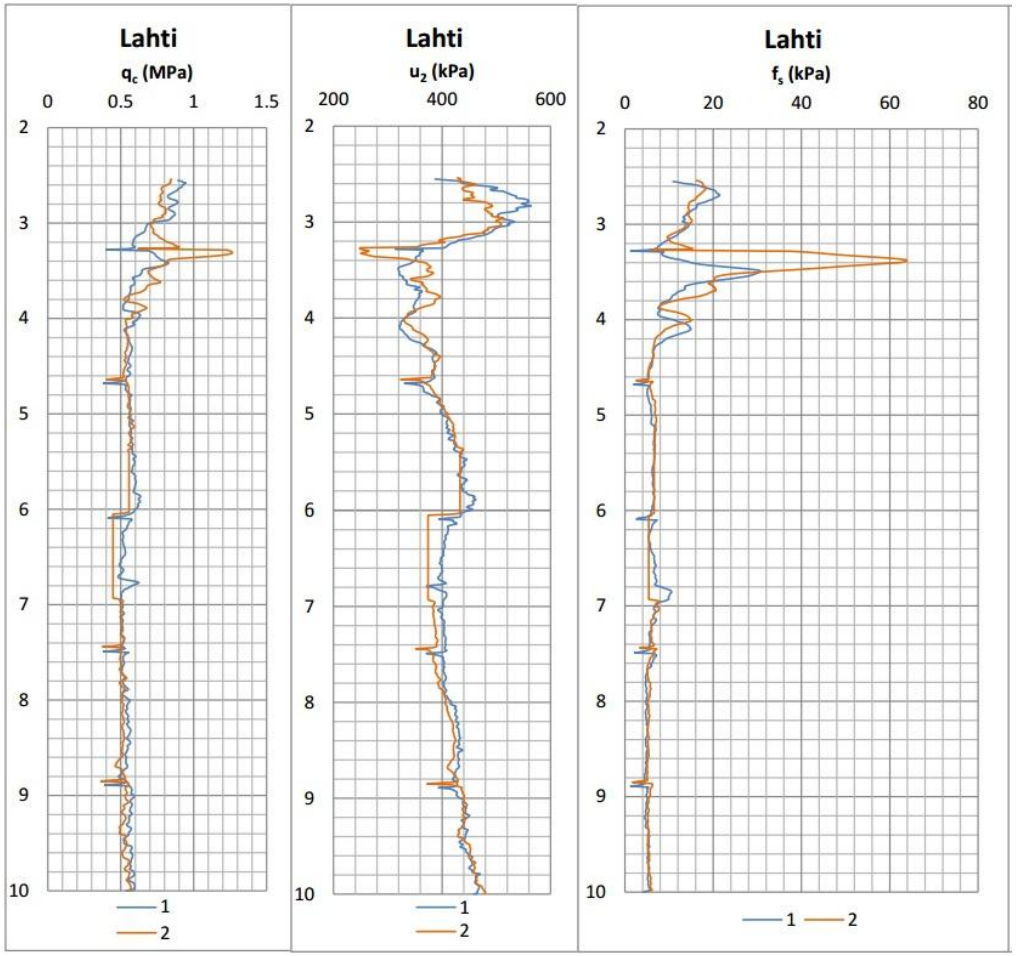
Kuvalähde: Campanella&Howie 2005

Nollalukemien poikkeama

- **Laitteistosta johtuvat**:
  - Mekaaniset vauriot **ylikuormituksesta** johtuen
    - Kuormitus lähelle sallitua maksimikuormitusta voi myös aiheuttaa ns. hetkellisen nollalukeman poikkeman. Ei kuitenkaan vaadi kärjen tarkistusta kalibroijalla, mikäli seuraavissa CPTU-kairauskokeissa alkunollalukemat ovat taas suunnilleen samat kuin aiemmin.
  - **Elektronisen** järjestelmän **vauriot** järjestelmässä kokeen aikana
  - **Mittauslaitteiston virheet** kuten hystereesi, resoluutio ja ulostulon vakaus
  - Nollalukemiin voi vaikuttaa laitteiston kuluminen ja vauriot tiivisteissä

- **Kairauskokeesta johtuvat**:
  - **Lämpötilamuutos** alkunollalukemien tallentamisen jälkeen
  - Kärkikartion ja huokossuotimen asennus voi aiheuttaa jännityksiä vaippavastukseen (**Liikaa kiristetty kärkikartio voi aiheuttaa väliaikaisia jännitteitä kärjen rakenteeseen**)
  - Kärjen asennus voi aiheuttaa väliaikaista huokospainetta huokospainekammioon
  - **Kärjen ylös nostaminen voi aiheuttaa imua** huokospainelukemiin
  - Kuorman johtumista vaippahylsyyn tunkeutuneen lian takia

Sähköinen virhe mittauksessa

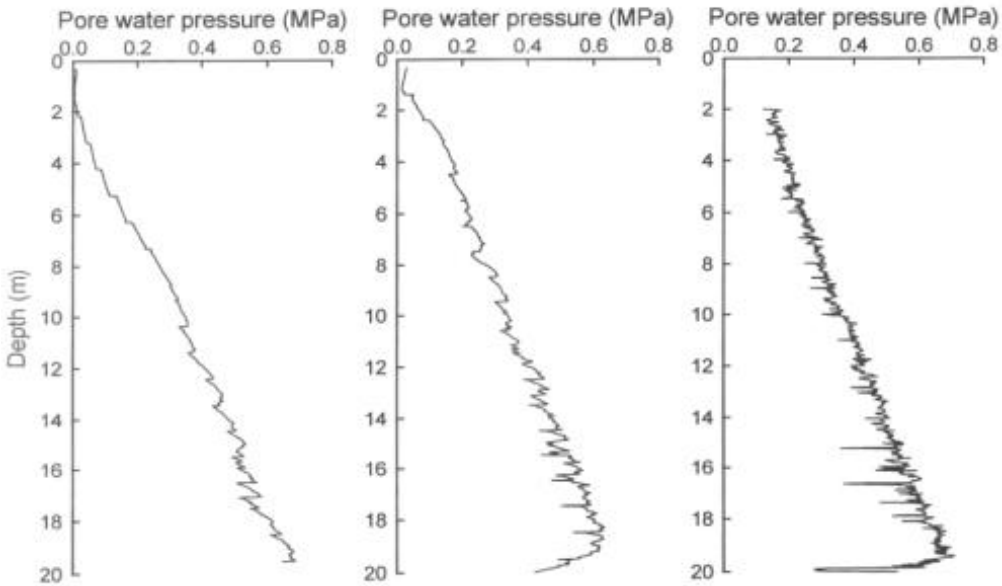


Kuvalähde: Auvinen 2015

- Kuvassa **sähköinen virhe** nähtävissä syvyydessä 6-7 metriä. Virhe mahdollisesti johtuu akun heikosta varauksesta, minkä takia arvot kopioituvat hetken aikaa samoiksi.
  - Mittausarvot vaihtelevat hieman koko ajan kairauksen edetessä, joten vakio arvot kielivät virheestä.

Huokospainemittauksen tarkistaminen

- **Epäonnistunut kärjen kyllästäminen vääristää huokospaine- ja kärkivastusmittausta**
  - Huokospaineen kasvaessa riittävän suureksi mittausjärjestelmään jäänyt ilma puristuu riittävästi kasaan liuokseen, jolloin lukemat vastaavat paremmin oikeita arvoja. Suotimen läpäisevyyden takia ilman puristuminen kasaan/liukeneminen veteen kestää jonkin aikaa. Dilataatiosta johtuva negatiivinen huokospaine voi aiheuttaa ilmakuplien ilmaantumista uudelleen kyllästysnesteeseen.
  - Huokossuodattimien huokoskoko 2 µm ... 20 µm, vastaa (10^{-4}...10^{-5}) m/s:n läpäisevyyttä
- Mittauksen onnistumista tarkasteltaessa **tankojen lisäyksistä johtuvat pysähtelyt** auttavat arvioimaan kyllästämisen onnistumista

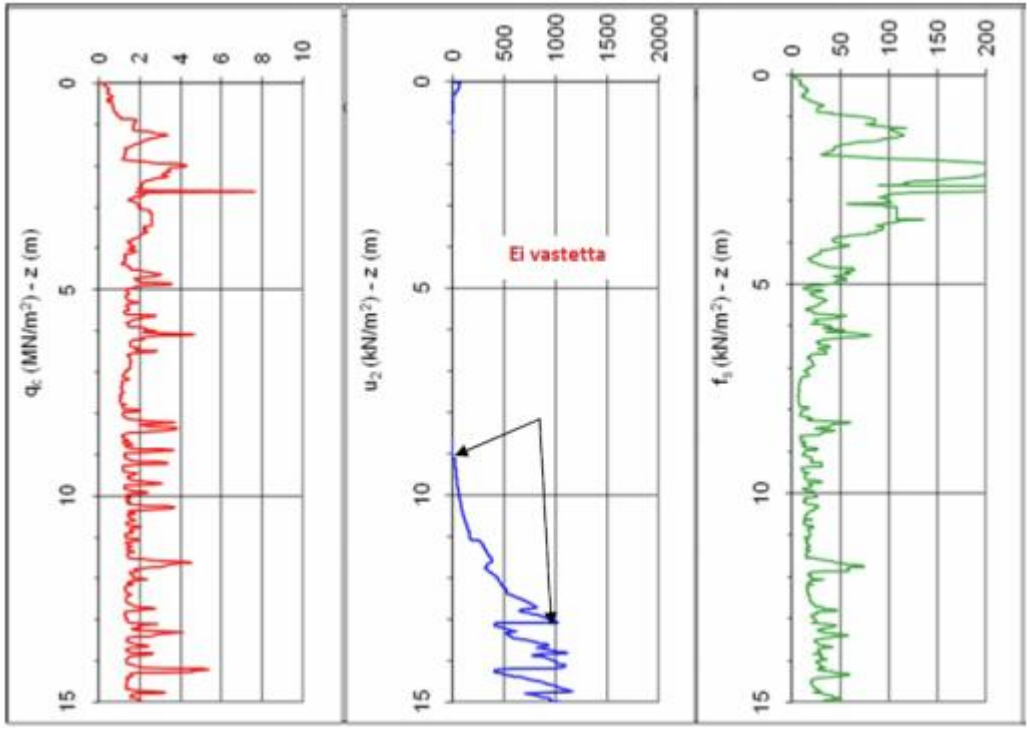


Kuvalähde: Dolva 2010

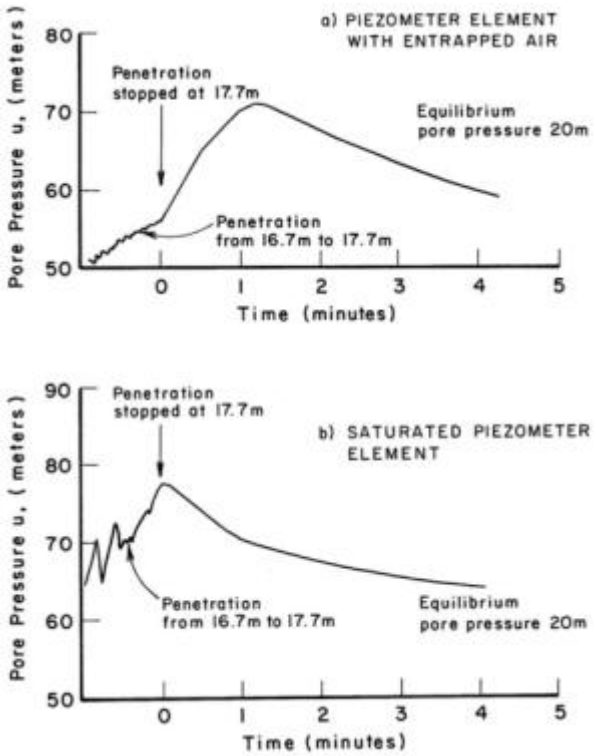
Huokospainemittauksen tarkistaminen

- **Normaalikonsolidoituneessa homogeenisessä savimaassa** huokospaine alenee lähes välittömästi kärjen pysähtyessä ja puristuksen jatkuessa huokospaineen arvot saavuttavat aiemmat arvot ”välittömästi” (lyhyissä pysähdyksissä)
- **Dilatoivissa homogeenisissä maissa** (esim. tiivis silttinen hiekka, hyvin jäykkä ylikonsolidoitunut savi) huokospaine voi jatkaa kasvua hetken aikaa pysähdyksen jälkeenkin. Puristuksen jatkuessa arvot vastaavat pian aiempia arvoja.
- **Epänormaalia käyttäytymistä** pysähdyksissä homogeenisissä pehmeissä maissa
  - **Porrasmaiset askelmat profiilissa**
  - **Lineaariset kohdat kuvaajassa**
- **Onnistuneessa** mittauksessa huokospaineen arvot **vaihtelevat jatkuvasti**
  - Huokospainemittaus reagoi pieniinkin huokospaine vaihteluihin (arvot vaihtelevat ylös/alas)
  - Vaihtelu riippuu pehmeissä maissa rakeisuuden mukaan (myös CPTU:n suotimella merkitystä)
    - Savessa vaihteluväli pienempi
    - Siltissä vaihtelu suurempaa
- **Epäonnistumisasteesta** riippuen huokospainemittauksen **käyttöluokitus voi tippua** 3 tai 4 luokkaan.
  - **Koska huokospaineenmittauksella on myös vaikutusta kärkivastuksen todellisiin arvoihin (vaikka luokittelu tehdäänkin korjaamattomille parametreille), tulisi tämän takia myös kärkivastuksen luokitusta tiputtaa luokkaan 2 tai 3 ainakin selkeästi epäonnistuneella huokospainemittausalueella.**

Huokospainemittauksen tarkistaminen

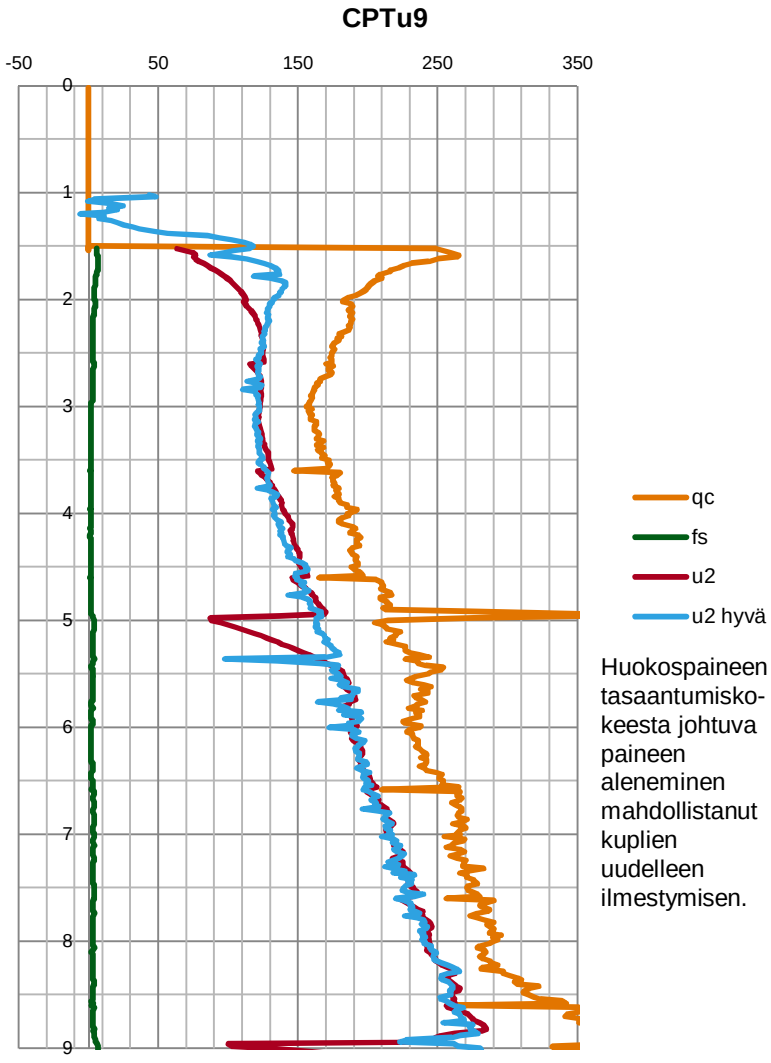


Kuvalähde: Dolva 2010, muokattu

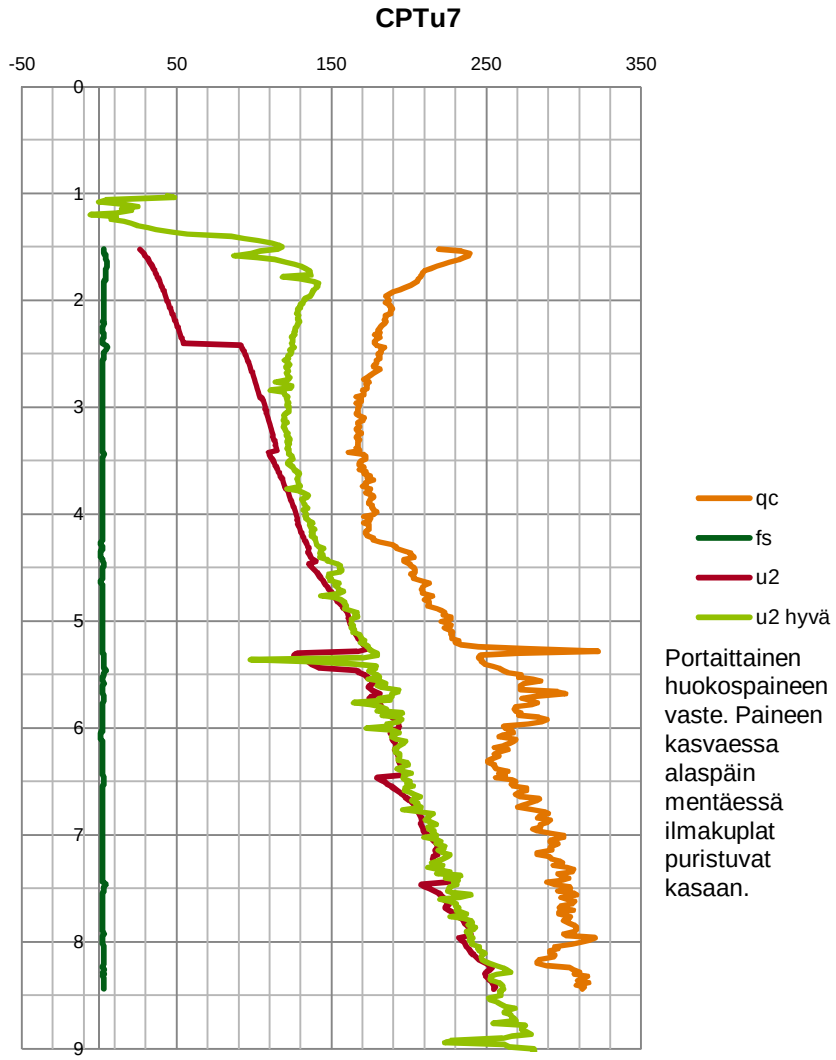


Kuvalähde: Campanella&Howie 2005

Mittausvirheitä



Huokospaineen tasaantumisko-keesta johtuva paineen aleneminen mahdollistanut kuplien uudelleen ilmestymisen.



Portaittainen huokospaineen vaste. Paineen kasvaessa alaspäin mentäessä ilmakuplat puristuvat kasaan.

Käyttöluokat

- Suunnittelija määrittelee vaatimusten perusteella käyttöluokan kokeelle
  - Huom! Hyvin kerroksellisessa maassa käyttöluokka ei voi olla 1
  - **Tiedä, mitä voit vaatia**
  - TE1=CPTU ja TE2=CPT
- Käyttöluokassa 1 kärkivastuksen kokonaisvirhe saa olla maksimissaan **35 kPa tai 5 %**. Näistä arvoista sallitaan suurempi eli mittausarvojen ollessa välillä 0…700 kPa virhe maksimissaan 35 kPa ja siittä ylöspäin virhe maksimissaan 5 % mittausarvosta (**käytetään korjaamattomia arvoja**)
- Käyttöluokan valitseminen voi vaikuttaa CPTU-kairauskokeen hintaan (?)
- Aiemmissa tutkimuksissa **huokospainemittaus todettu tarkimmaksi mittausarvoksi**

Taulukko 2 Käyttöluokat

Käyttöluokka	Kokeen tyyppi	Mitattava parametri	Pienin sallittu tarkkuus[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°			
		Tunkeutumispituus	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°			
		Tunkeutumispituus	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°			
		Tunkeutumispituus	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 %			
		Tunkeutumispituus	0,2 m tai 2 %			

HUOM. Erittäin pehmeää maata mitattaessa voidaan tarvita vielä suurempaa tarkkuutta.

[a] Mitatun parametrin pienin sallittava tarkkuus 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 silttiä (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 MPa $\leq q_c$ < 10 MPa)
- C kerrokselliset maat, joissa on jäykkää savea (yleensä 1,5 MPa $\leq q_c$ < 3 MPa) ja hyvin tiivistä hiekkaa (yleensä q_c > 20 MPa)
- D hyvin jäykästä kovaan vaihteleva savi (yleensä $q_c \geq 3$ MPa) ja hyvin tiiviit karkeat maat ($q_c \geq 20$ MPa)

[c]
- G profilointi ja materiaalien yksilöinti, joihin liittyy alhainen epävarmuustaso
- G* viitteellinen profilointi ja materiaalien yksilöinti, 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.

Kuvalähde: ISO, E. 22476-1.2007

Esimerkki kairauksen luokittelusta ja tarkistuksesta

- **TTY:n** herkän kärjen mittausasteikot ja maksimimittausvirheet:
  - kärkivastus 0…7500kPa 0,2% FSO => mittausvirhe 15kPa
  - vaippavastus 0…150kPa, 0,7% FSO => n. 2kPa
  - huokospaine 0…2000kPa, 0,25% FSO => 5kPa
- **Eurostandardista ” Kun kaikki mahdolliset virhelähteet lasketaan yhteen, tallennettujen mittausten tarkkuuden on oltava parempi kuin suurin taulukossa 2 annetuista arvoista. Mittauksen tarkkuuden analyysissa on otettava huomioon sisäinen kitka, tiedonkeruun virheet, epäkeskinen kuormitus, lämpötilan (ympäristön lämpötilan ja hetkellisen lämpötilan) aiheuttamat vaikutukset ja mittausvirheet.”**
- Kairauskokeen **kokonaisvirhe** on eurostandardin mukaisesti mittauslaitteiston maksimimittausvirheen, nollalukemien poikkeaman sekä muiden virheiden summa!
  - Muut virheet ovat epäonnistuneesta kyllästyksestä johtuvia

Käyttöluokitus

- **Mittausvirhe kärki kohtainen**
  - Mittausvirhe todennäköisesti eri suuruinen kärkivastukselle, vaippavastukselle ja huokospaineelle
  - Laske valmiiksi mittausvirhe tai katso valmistajan papereista
- **Laske nollalukemien erotus**
  - Jos erotus on negatiivinen, voidaan lukema muuttaa positiiviseksi
- **Kokonaisvirhe=mittausvirhe+nollalukemien erotus**
  - Tarkistetaan, minkä käyttöluokan kokonaisvirhe täyttää (kokonaisvirheen oltava pienempi, kuin käyttöluokan vaatimus)
- **Lisäksi varmistuttava, ettei mitatuissa tuloksissa ole sähköisiä virheitä esim. jokin arvo jäänyt mittaamatta tai pysynyt muuttumattomana sekä kärjen kyllästys onnistunut eli mitatut huokospainearvot vaikuttavat ”järkeviltä”**
  - **Mikäli huokospainemittaus epäonnistunut, käyttöluokitus tippuu ainakin yhden luokan alemmas kärkivastuksen ja huokospaineen osalta, niillä syvyyksillä, missä huokospainemittauksessa huono vaste!**

Lähteet:

- ISO, E. 22476-1.2007. Geotechnical investigation and testing-field testing–part, 1
- Campanella, R.G., Howie, J.A. 2005 Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data, Geotechnical research group, Department of civil engineering, The university of British Columbia 2005.
- Dolva, B. K. 2010. CPTU-seminar i Vegdirektoratet, Statens vegvesen, Teknologirapport;2595, 26. april 2010. Saatavilla: http://hdl.handle.net/11250/190021
- Auvinen, E. 2015. Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rakosuodattimella varustetulla CPTU-kairalla, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavilla: https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23592/Auvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y