Suljetun leikkauslujuuden tulkinta ja taustateoriaa

Juha Selänpää
Tampereen teknillinen yliopisto

18.11.2015

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Suljetun leikkauslujuuden taustateoriat

- Suljetun leikkauslujuuden tulkinnan teoriat voidaan jakaa viiteen eri luokkaan
  - Kantavuusteoria
  - Laajenemisteoria
  - Energian säilymislaki yhdistettynä laajenemisteoriaan
  - Analyyttiset ja numeeriset ratkaisut käyttäen lineaarista tai epälineaarista jännitys-muodonmuutos riippuvuutta
  - Siirtymäpolkuteoria
- Tulkintojen pohjalta on johdettu suljetulle leikkauslujuudelle (s_u) ja korjatulle kärkivastukselle riippuvuus:

$$q_T = N_{kt} \cdot s_u + \sigma v_0$$

- Mm. laajenemisteorian pohjalta riippuvuus huokosylipaineelle ja suljetulle leikkauslujuudelle

$$u_2 = N_{\Delta u} \cdot s_u + u_0$$

Kantavuusteoria

- Yksi ensimmäisistä käytetyistä menetelmistä analysoida kärjen tunkeutumista maahan oli käsitellä tapausta kantavuusongelmana
  - Kärkivastus oletetaan vastaavan maksimikuormaa syväperustuksen murtumisessa ympyrämuotoisella perustukselle
  - Alussa leikkauspinta oletetaan tunnetuksi tasapainotilatarkastelua varten
    - Leikkauspinta määritetty isotrooppisessa tilassa
- Teorian etuna on yksinkertaisuus.
  - Tunnetaan alalla hyvin
- Teorialla tosin rajoitteita
  - Maan muodonmuutoksia ei huomioida, tämä tarkoittaa, ettei tunkeutumisvastuksen riippuvuutta maan jäykkyyteen sekä puristuvuuteen huomioida laskennassa
    - Kuinka pitkälle leikkauspinta ulottuu
  - Kantavuusteoria jättää huomiotta kärjen tunkeutumisesta johtuvan initiaalijännitysten muuttumisen.
    - Etenkin horisontaalinen jännitys kasvaa, minkä vaikutus ei huomioida kärkivastukseen
  - Ei huomioi “jatkuvaa” murtumista kärjen tunkeutuessa maahan, sillä teoria määritetty perustuksille

Kantavuusteoria

- Terzaghin esittämä kantavuuskaava pitkänomaiselle perustukselle

$$q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

- Tarkastelu tehdään suljetussa tilassa (φ=0, c=s_u)
  - Tarkastelussa $q_u = q_t$, $q = \sigma_{v0}$
  - Lisätään kärjen muodosta, kuormituksesta jne johtuvat vakiot (N_c => N_{kt})

$$q_t = c \cdot N_c + \sigma_{v0}$$

$$s_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt}$$

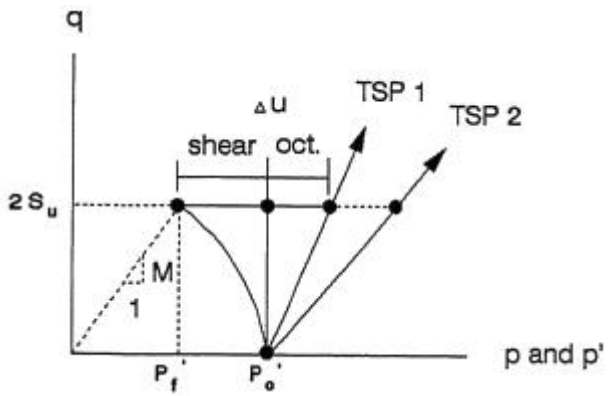
- N_{kt}:n (kärkikerroin) pitäisi huomioida kaikki maan murtumiseen vaikuttavat tekijät
  - Kärkikerroin ilmoitetaan kaavana maan ominaisuuksien funktiona (usein korrelaatio indeksituloksen sekä muodonmuutoksen ja lujuuden suhteen)
  - Hankalaa teoreettisesti laskemalla/mallintamalla
    - Teoreettisesti laskettu tai mallintamalla määritetty kärkikerroin ei täysin vastaa empiirisiä tuloksia
  - Kärkikerroin voidaan määrittää empiirisesti vastaamaan eri koestusmenetelmää (kolmiaksiaalikokeet, siipikairaus, suora leikkauskoe)
    - **Varmista vastaako kärkikerroin koetta, minkä tuloksia tarvitset**!

Laajentumisteoria

- Laajentumisteoriassa sylinterimäinen tai ympyrämäinen kappale laajenee, mistä aiheutuu kappaleen ulkopintaan kasvava jännitys. Tämän jännityksen ja kärkivastuksen välille oletetaan tunnettu riippuvuus.
- Vesicin teoria vuodelta 1972
  - Mohr-Coulumbin murtokriteeri voimassa
  - Maa käyttäytyy elastoplastisesti
  - Kappaleen laajenemisesta johtuvat muodonmuutokset kompensoituvat elastisella alueella
  - Ei muodonmuutoksia plastisella alueella
- Myöhemmin teoriaa paranneltu paremmilla maamalleilla
- Teorian hyvänä puolena on maan muodonmuutoskäyttäytymisen huomioiminen
  - Muodonmuutoskäyttäytyminen huomioidaan jäykkyysindeksin avulla $I_r = G / s_u$. Jäykkyysindeksi kuvastuu kuinka paljon muodonmuutoksia maa tarvitsee maksimi leikkausjännityksen saavuttamiseen.
  - Elastisen alueen etäisyys on sitä pienempi, mitä pienempi jäykkyysindeksi on.

Suljetun leikkauslujuuden tulkinta huokosylipaineen avulla

- Vesic esitti vuonna 1972 laajentumisteorian pohjalta huokosylipaineen ja suljetun leikkauslujuuden riippuvuuden
- Myöhemmin laajentumisteorian ja mm. Cam-clay mallin yhdistelmän avulla on tulkittu huokospaineen ja suljetun leikkauslujuuden riippuvuutta
  - Huokosylipaine muodostuu oktaedrijännityksen muutoksesta (keskiarvoisen jännityksen) sekä saven myötäämisestä johtuvasta huokospaineen kasvusta, $u_2 - u_0 = \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear}$
  - Suljettu leikkauslujuus voidaan ratkaista nettokärkivastuksen (kuvaa jännitystilanmuutosta), alkutilan tehokkaan pystysuoran jännityksen (isotrooppinen malli) ja murtosuoran M avulla
- Tulkintakaava muotoa $s_u = (u_2 - u_0) / N_{\Delta u}$
- Empiirisesti havaittu $N\Delta u$:n riippuvan ylikonsolidoitumisasteesta, sensitiivisyydestä ja plastisuusindeksistä



Kuvalähde: Wroth 1984

Suljettuun leikkauslujuuteen vaikuttavia tekijöitä savimaassa

- Ylikonsolidoitumisaste vaikutus huomioidaan omana kertoimena OCR:n huomioivassa kaavassa

$$s_u = [(q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt}] \cdot (OCR / 1{,}3)^{b-1}$$

  - b tyypillisesti 0,8
- Jäykkyys
  - Maan jäykkyydellä on vaikutusta kuinka kauas leikkauspinta ulottuu (kuinka kauas plastinen vyöhyke ulottuu)
- Sensitiivisyys
  - Kärkikertoimeen vaikuttaa maan jännitys-muodonmuutos käyttäytyminen huippulujuuden muodostumiseen asti ja siittä eteenpäinkin
- Horisontaaliset ja vertikaaliset in-situ jännitykset
  - Normalisointi tehdään vertikaalisen jännityksen avulla, sillä horisontaalisen jännityksen suuruutta ei yleensä tarkasti tiedetä. Horisontaalisella jännityksellä on enemmän vaikutusta kärkivastukseen kuin vertikaalisella.
- Kärkikartion ja vaippahylsyn karheus
  - Karheudelle annettu tämän takia viitearvot
- Empiirisesti havaittu N_{kt}:n kasvavan plastisuuden kasvaessa ja vähentyvät sensitiivisyyden kasvaessa

Suljettuun leikkauslujuuden tulkintakaava

- Larssonin (2007) esittämä kaava kärkivastukseen perustuen ruotsalaisille savimaille:

$$s_u = [(q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt}] \cdot (OCR / 1{,}3)^{b-1}$$

  - b tyypillisesti 0,8
  - $N_{kt} = 13{,}4+6{,}65 \cdot w_L$

- Larssonin (2007) esittämä kaava huokosylipaineeseen perustuen ruotsalaisille normaali tai lievästi ylikonsolidoituneille saville:

$$s_u = [(u_2 - u_0) / N_{\Delta u}$$

  - $N_{\Delta u} = 14{,}1-2{,}8 \cdot w_L$
- Suljetun leikkauslujuuden tulkinta huokosylipaineesta on osoittautunut johdonmukaisimmaksi tavaksi (norjalaisen tutkimuksen mukaan) mm. paremman mittaustarkkuuden ansiosta.

Kaavat päivittyvät projektin edetessä!

Kärkivastuksen arvoja teoreettisesti määritettynä

Table 2.1 Cone factors from bearing capacity analysis.

Reference	N_k
Terzaghi (1943)	9.3
Meyerhof (1951)	10.4
Begemann (1965)	9.6
Koumoto and Kaku (1982)	9.6

Table 2.2 Cone factors N_k derived using different cavity expansion methods (after Yu et al. 1998).

G/s_u	Ladanyi and Johnston (1974) : Rough cone	Vesic (1977) rough cone	Baligh (1975) rough cone	Yu (1993) Smooth cone	Yu (1993) partly rough cone
50	8.3	9.1	15.9	8.5	10.4
100	9.2	10.0	16.6	9.3	11.2
200	10.1	10.9	17.3	10.1	12.0
300	10.6	11.5	17.7	10.6	12.5
400	11.0	11.9	18.0	10.9	12.8

Table 2.3 Cone factors derived using strain path methods.

G/s_u	Baligh (1985)	Teh and Houlsby (1991) smooth cone, $\triangle$=0	Teh and Houlsby (1991) smooth cone, $\triangle$=0.5	Teh and Houlsby (1991) rough cone, $\triangle$=0.5
50	9.3	8.4	7.5	9.9
100	10.7	9.7	8.8	11.2
200	12.1	11.3	10.4	12.8
300	12.9	12.5	11.6	14.0
400	13.5	13.5	12.6	15.0
500	13.9	14.4	15.9	15.9

Kärkivastuksen arvoja aiemmissa empiirisissä tutkimuksissa eri koemenetelmille

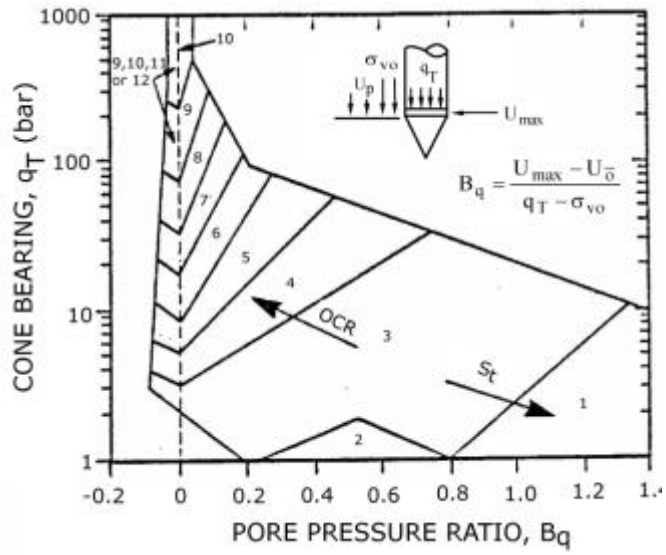
Name & Year	Site	Soil description	CPT type	Cone resistance	method for S_u	OCR	I_r	% clay	LL (%)	I_p(%)	N_k
Rad et al. (1988)	Vancouver	Clayey silt	Electric	q_t	CAUC	1.45		23	37	12.5	**8.5**
	Brag 2	Silty clay	"	"	"	1.85		29	33	18	**8.7**
	Drammen	Lean clay	"	"	"	1.35		48	40	26	**9.5**
	Emmerstad	Silty quick clay	"	"	"	1.93		-	28.3	6.5	**11.3**
	Onsoy	Plastic clay	"	"	"	1.45		57.3	69.5	42.5	**12.5**
	Hega	Plastic OC clay	"	"	"	4.5		54.3	48.3	21.3	**12.6**
	Troll	Plastic clay	"	"	"	1.6		31.8	42.4	23.4	**13.0**
	Cowden	Unweathered stony clay	"	"	CIUC	3.15		-	34.5	18.8	**15.7**
	Haltenbanken	silty sandy clay w/ gravel	"	"	CAUC	6.1		-	33	18	**15.7**
	Brent X	Clay	"	"	CIUC	35.3		58.7	28.3	46.7	**24.5**
La Rochelle et al. (1988)	Louisville	silty clay with pine seams of silt, sensitive	Electric	q_t	Field vane	1.7-2.6			66	40	**11**
	Berthierville	Grey silty clay	"	"	"	1.1-1.3			37-50	16-26	**12.5**
	Saint-Jean-Vianney		"	"	"	25-50			31	8	**16**
Stark et al. (1989)		soft to medium silty clay with low plasticity			UU	1-2			40	20	**11**
					Field vane						**13**
Lunne et al. (1986)	Gullfaks A	Silty clay	Electric	q_t	CAUC	5		15-40	41-50	22-28	**15**
	Sleipner	Stiff clay	"	"	"	1-2		23-35	34-46	18-25	**12**
	Emmerstad	Onshore quick clay	"	"	"						**10.5**
Lambson et al. (1992)	Pentre	Clayey silt			UU-TXL	1.6~1.8					**11.3**
	Pentre	Silty clay			UU, CIU	1.5					**9.6**
	Tilbrook	Hard silty clay			UU, CIU	8~35			50~60	30~40	**13~26**
Denver, H (1988)	Niverod site	glacial meltwater clay	Electric								**9.5**
	Niva site	lake glacial clay	Electric						25-35	10-15	**7.3**

Kärkikertoimen arvoja aiemmissa empiirisissä tutkimuksissa eri koemenetelmille

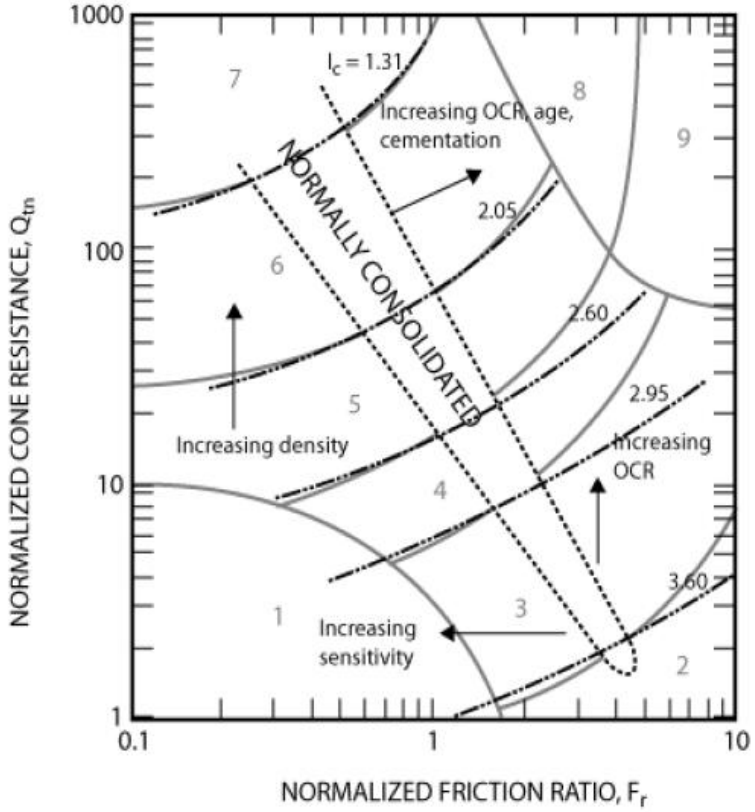
Name	Site	Soil description	CPT type	Cone resistance	method for S_u	OCR	I_r	% clay	LL	I_p	N_k
Luke, K. (1995)	Yold clay		Electric	q_t	Triaxial test	8-11	49	62	65	39	**9.9**
	Clay till		"	"		3-4	188 77	15	22	7	**12.2** **10.5**
	Tert clay		"	"		2-3	111	83	174	137	**9.9**
	Holoc clay		"	"		1-2	35	21	37	15	**10.6**
	Clay till 2		"	"		10-11	23 16	32	23	10	**8.5** **10.6**
	Org mud		"	"		1-2	15 32	35	97	53	**8.4** **9.5**
Anagnostopoulos, A. et. al. (2003)	Various		Mechanical		UU						**18.9**
			Electric		UU						**17.2**
Jamiolkowski, M. et. al. (1982)	Porto Tolle	Very young silty clay of medium plasticity	Electric		Field vane		96~ 144				**11±3**
	Montalto di Castro	Clayey deposit of hard marine clay	Electric		CK_0U	2.5~4	150~210				**9±1**
	Taranto	very stiff non-fissured clay				15~25	30				**16±2**
Carpentier, R. (1982)		Boom clay	Mechanical		Field vane						**9±1.5**
Tani and Craig (1995)	Centrifuge test	Remoulded glacial clay till	Miniature cone		UU & vane	1				23	**12.5**
Almeida (1996)	Canons Park	Brown London clay	Electric	q_c	CU-TXL	17~25					**19~21**
	Cowdon	Stiff clay			UU-TXL	4~7.5			40	18	**20**
	Cowdon	Stiff clay			UU-TXL	2~3			35	17	**13.2**
Van Impe (2004)	Sint-Katelijne	Boom clay	Electric	q_c	UU-TXL	14~30			65~71	40~50	**13~24**

SBT Soil behavior type, maalajiluokitus CPTU tuloksien perusteella

- Mittausparametrien ja vertikaalisen jännityksen sekä luonnollisen huokosvedenpaineen avulla voidaan tehdä arvio maalajista maan käyttäytymisluokituksen mukaan
  - Karkeampi arvio voidaan tehdä vähemmilläkin parametreilla



Kuvalähde: Campanella&Howie 2008



Kuvalähde: Robertson 2010

SBT luokittelu

- Maan käyttäytymisen luokitukseen käytetään apuna erinäisiä kaavoja
  - Luokittelu tapahtuu maan käyttäytymisen mukaan, ei perinteisen rakeisuuteen perustuvan luokittelun mukaisesti.

$R_f = (f_s / q_c) \cdot 100$ % Kitkasuhde (huom! Korjaamattomat parametrit)

$R_{ft} = (f_s / q_t) \cdot 100$ % Korjattu kitkasuhde

$F_r = [(f_s /(q_t - \sigma_{vo})] \cdot 100$% Normalisoitu kitkasuhde

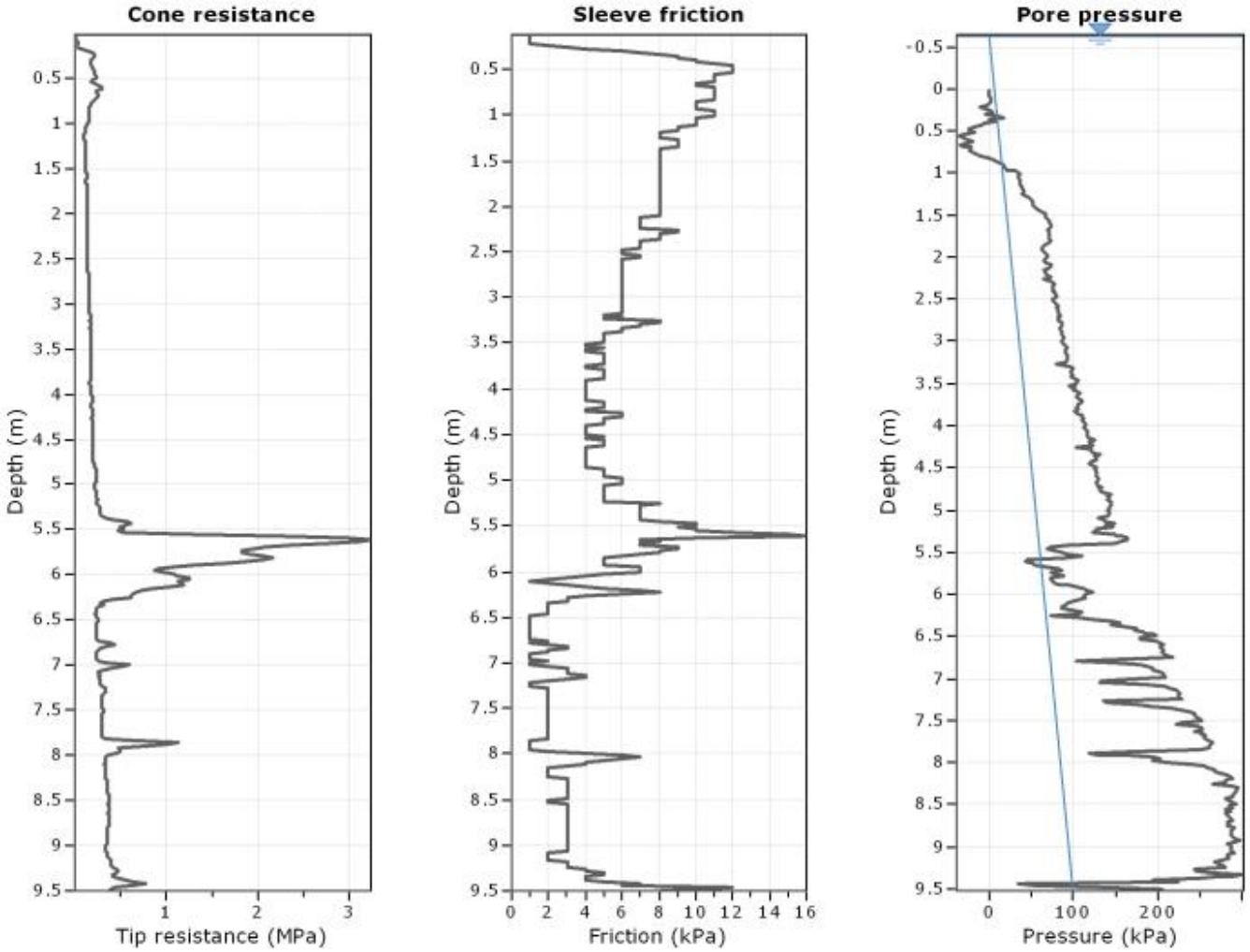
$B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{v0}) = \Delta u_2 / q_n$ Huokospainesuhde

  - **Kitkasuhde tulisi laskea aina eurostandardin mukaan!**

- Normalisoinnilla otetaan huomioon pystysuoran tehokkaan jännityksen vaikutus arvoihin.
  - Mahdollistaa tarkemman luokittelun
  - Tosin ei-normalisoidun ja normalisoidun luokittelun käyttö matalilla syvyyksillä ei aiheuta suurtakaan eroa luokitteluun (σ'_{vo}=50-150 kPa)

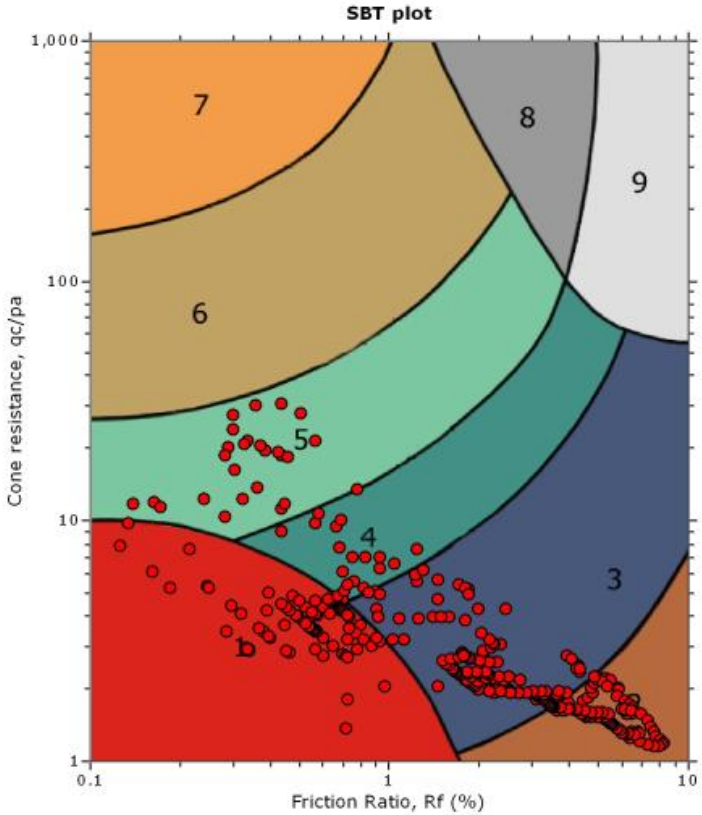
SBT luokittelu

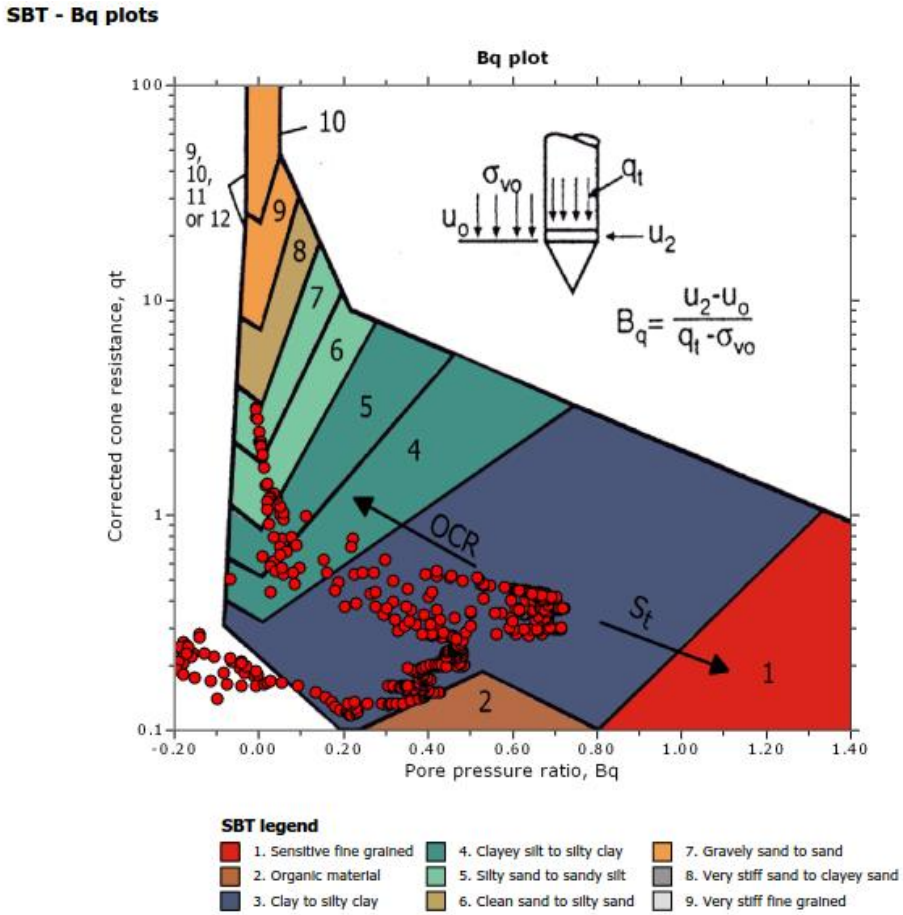
- Esimerkkinä kaupallisen ohjelman SBT luokittelu eri menetelmillä oikean puoleiselle CPTU-kairauskokeelle
- Kairaustulokset Eurasta



SBT luokittelu

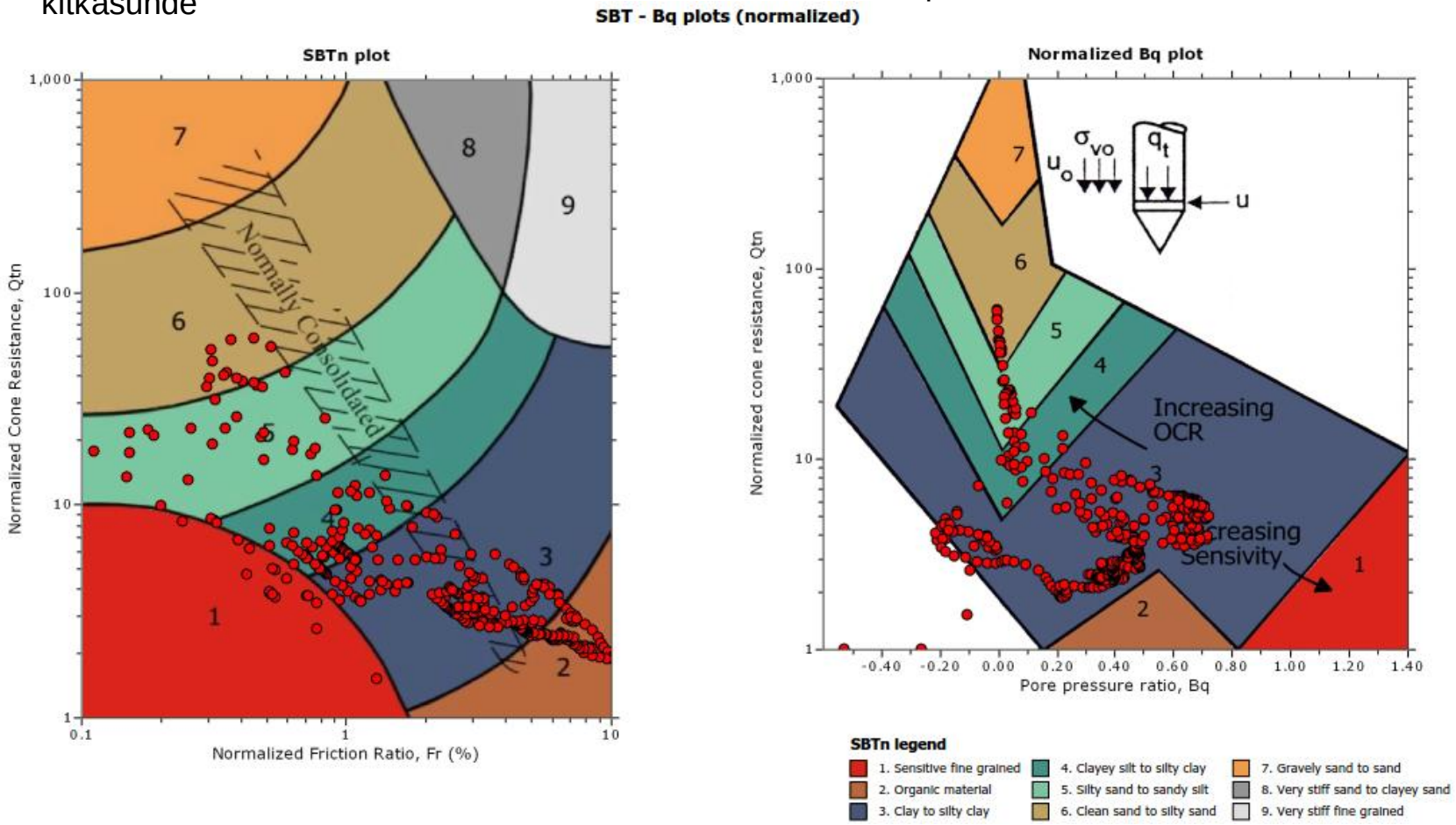
- Kärkivastus/100kPa vs. kitkasuhde
- Korjattu kärkivastus vs. huokospainesuhde





SBT luokittelu

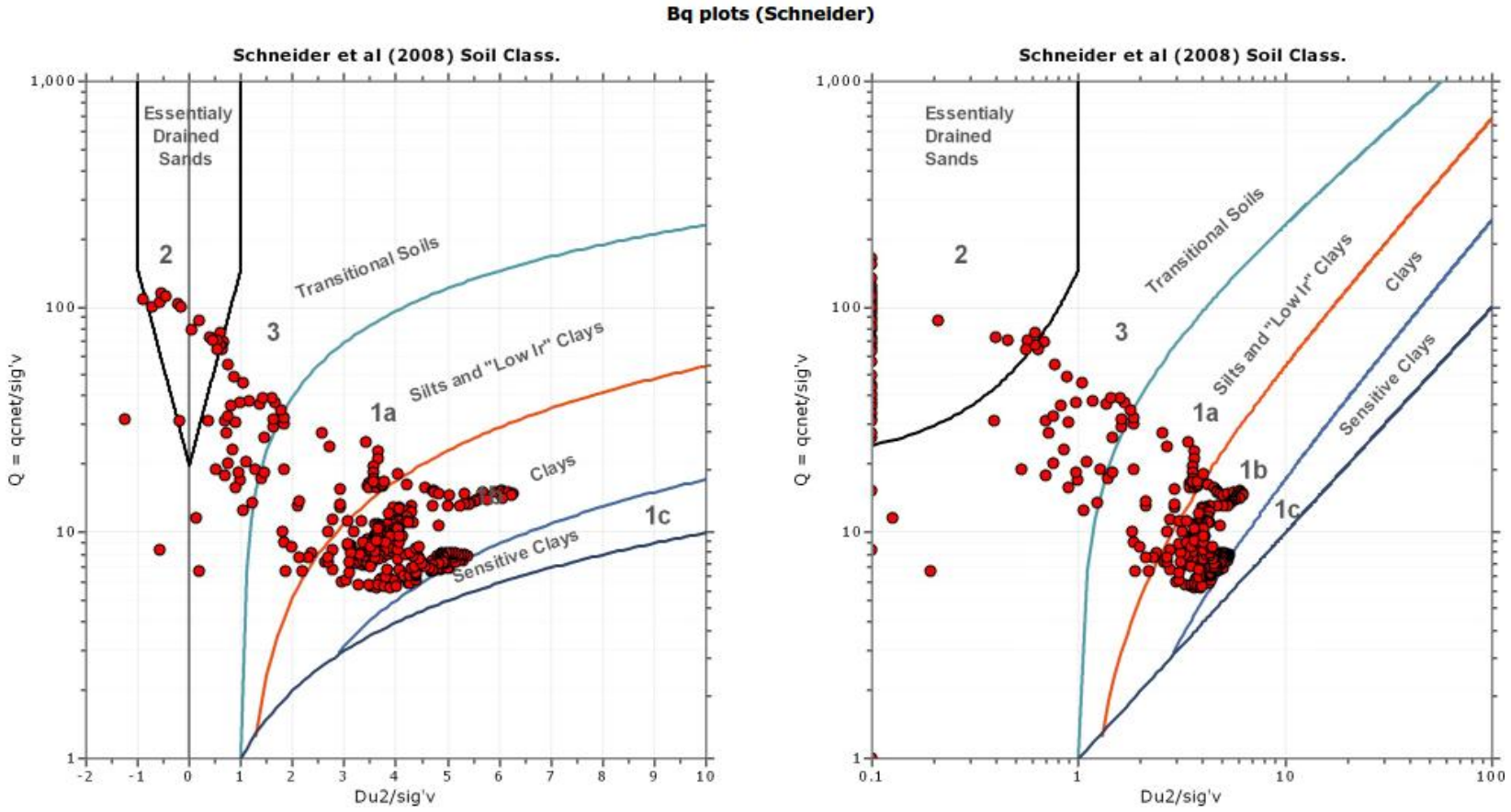
- Normalisoitu kärkivastus vs. normalisoitu kitkasuhde
- Normalisoitu kärkivastus vs. huokospainesuhde



SBT luokittelu

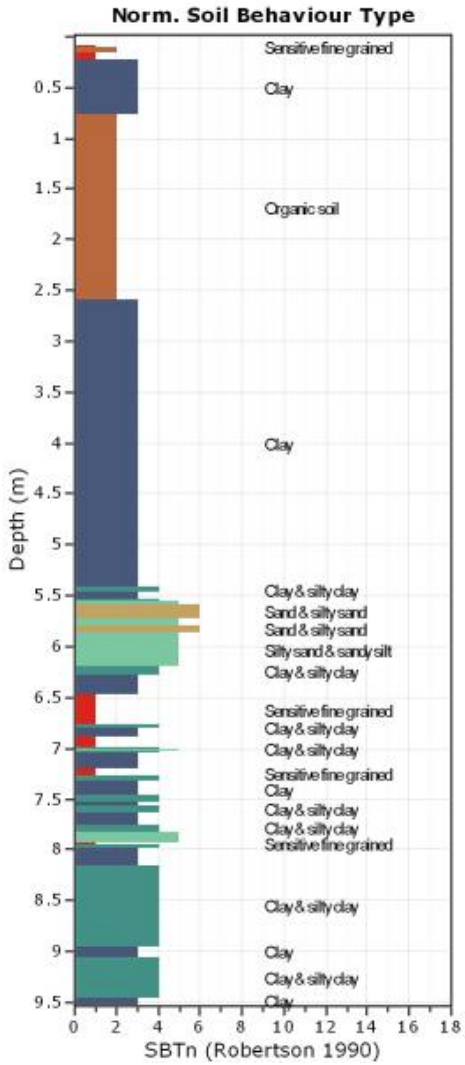
- Normalisoitu nettokärkivastus vs. normalisoitu huokosylipaine

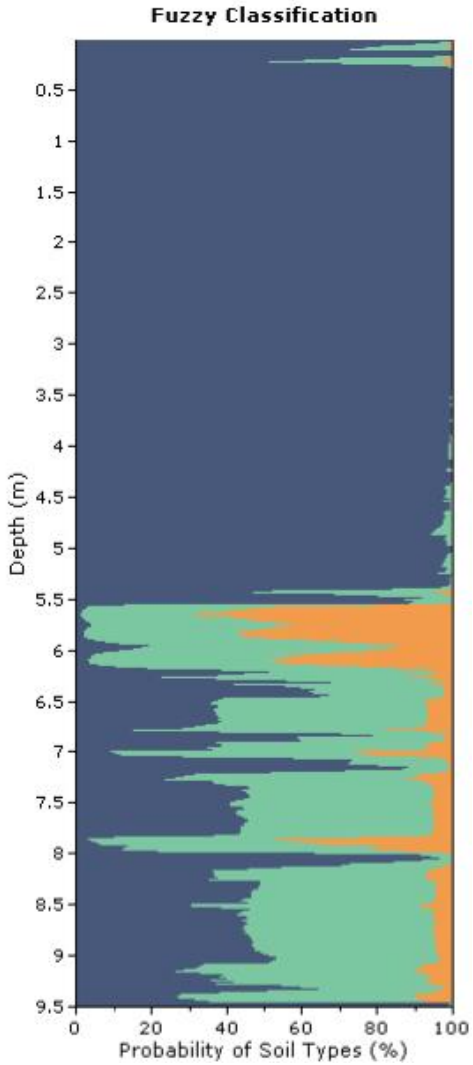
- Normalisoitu nettokärkivastus vs. normalisoitu huokosylipaine



SBT luokittelu

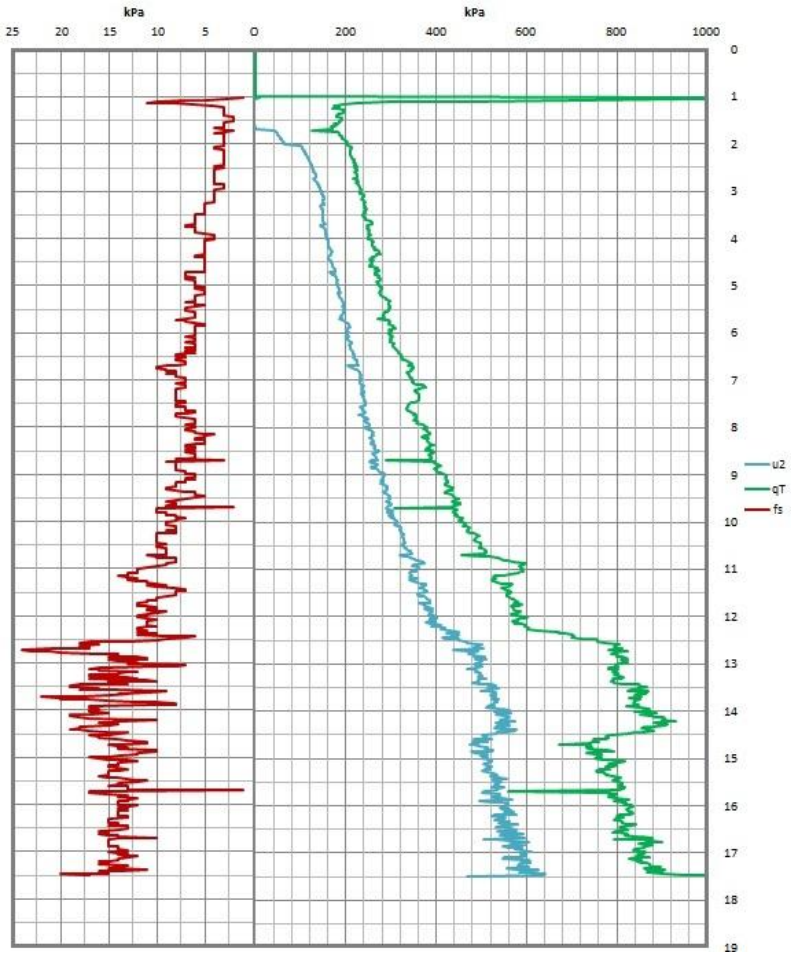
- Maalajimäärityksen tulokset ja maalajin todennäköisyys SBT-luokittelujen perusteella





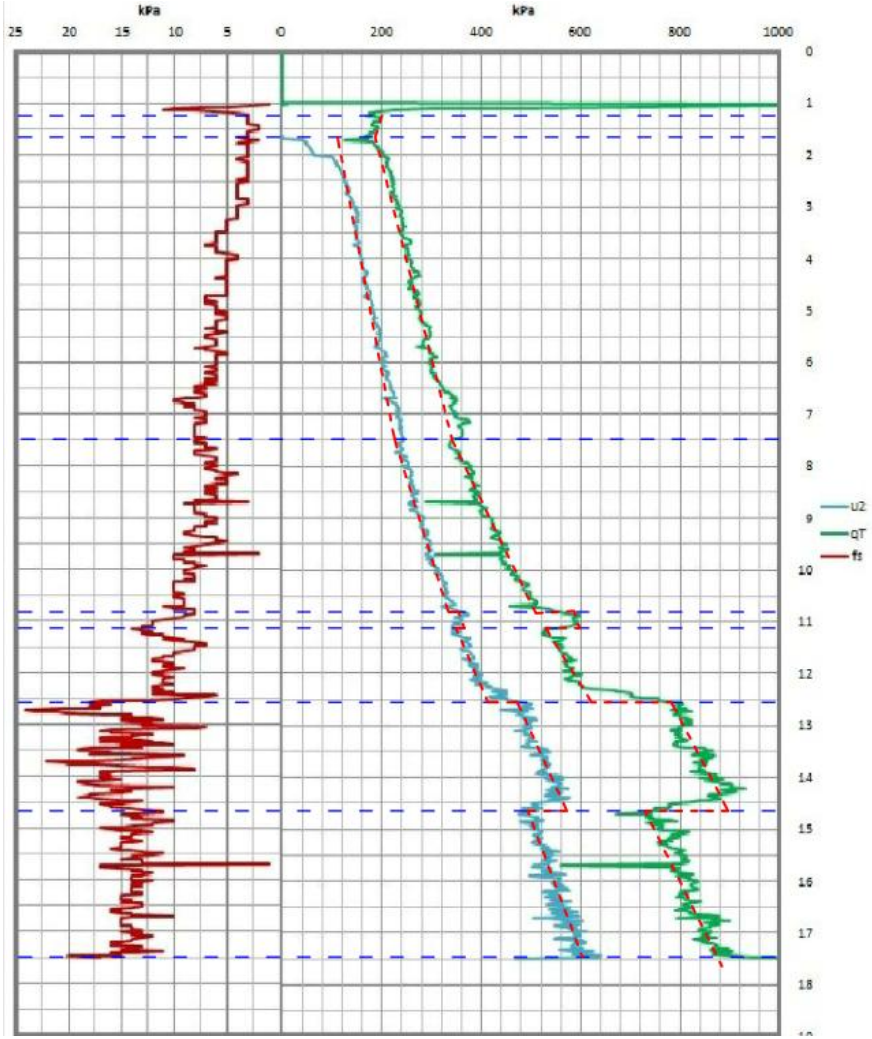
Maalajikerrosten tulkinta Masku

- Etsitään selkeät kohdat, missä mittausparametreissa muutoksia
  - Tarkistetaan , että muutos näkyy myös muissa parametreissa
    - Sähköinen virhe voi tehdä muutoksen yhteen parametriin, muttei yleensä kaikkiin
  - Voidaan piirtää vaakasuora viiva muutoksien kohdalle
  - Huomioi, että kärkivastus ”aistii” seuraavaksi tulevaa kerrosta etukäteen
- Piirretään suorat maalajikerroksien välillä
  - Muutos suoran kulmakertoimessa viittaa maan ominaisuuksien muuttumiseen



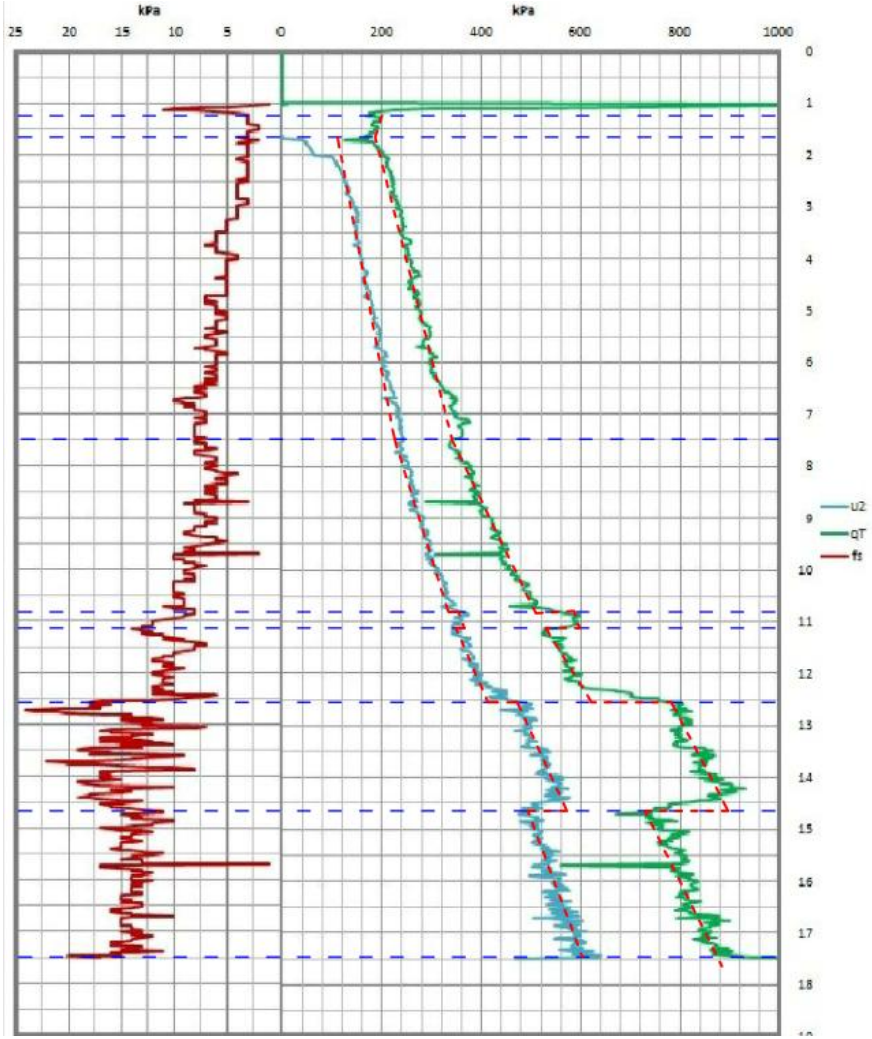
Maalajikerrosten tulkinta Masku

- Kerrokset ylhäältä alas
  - Kuivakuorikerros 0-1,2 m (alkukairattu metrin syvyyteen)
  - Hieman tiiviimpi lievästi ylikonsolidoitunut savea 1,2-1,7 m (siirtymä kerros kuivakuoren ja pehmeän kerroksen välillä, kärkivastus pienenee)
  - Normaalisti konsolidoitunutta tai lievästi ylikonsolidoitunutta savea 1,7-7,5 m. Korkea huokospaine ja pieni kärkivastus. Huom! Alussa heikko vaste huokospaineen mittauksessa. Noin 2,5 m eteenpäin hyvä vaste, minkä jälkeen voidaan olettaa huokospaineenkin täyttävän käyttöluokan 1 (kunhan nollalukemien poikkeama riittävän pieni).
  - Normaalisti konsolidoitunutta tai lievästi ylikonsolidoitunutta savea 7,5-10,8 m
  - Ohut savikerros 10,8-11,1 m (lievästi ylikonsolidoitunutta tai silttisempää verrattuna ylempään saveen). Siltissä huokospaineen arvot pitäisi hetkellisesti romahtaa. Mahdollisesti kerros niin ohut, ettei mitatut parametrit vastaa täysin todellisia arvoja.



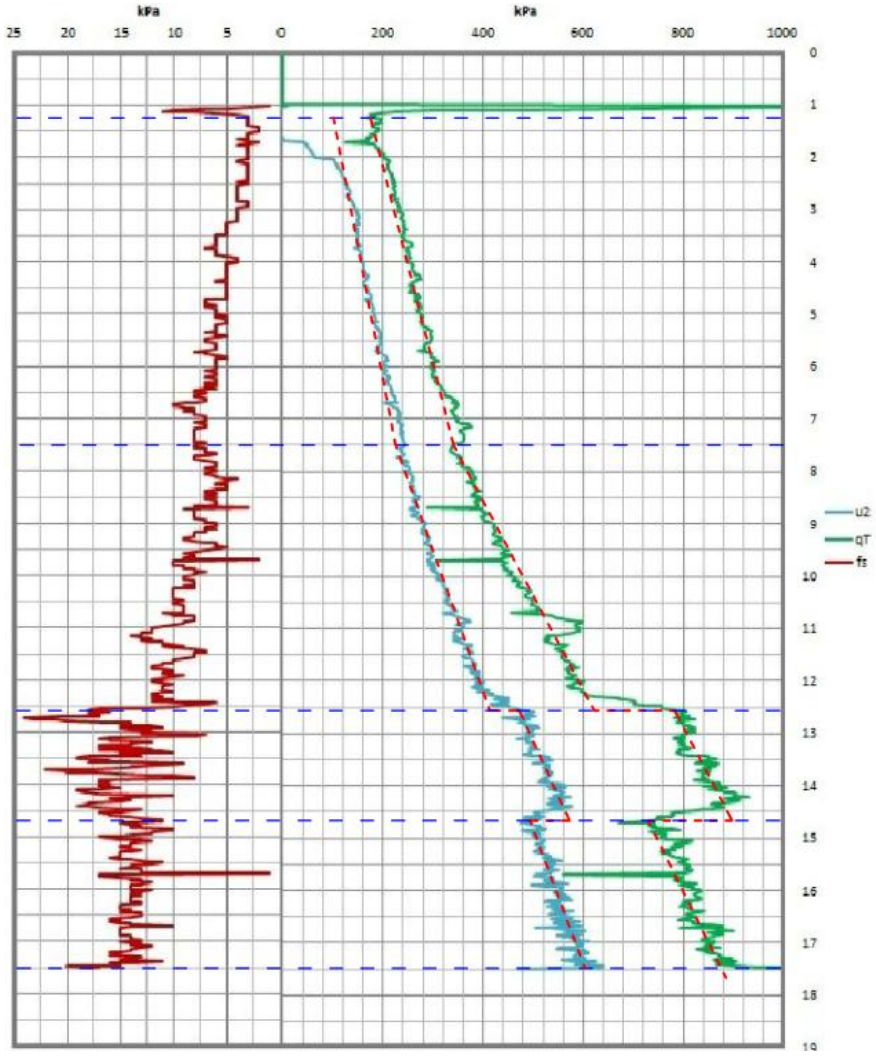
Maalajikerrosten tulkinta Masku

- Kerrokset ylhäältä alas
  - Normaalisti konsolidoitunutta tai lievästi ylikonsolidoitunutta savea 11,1-12,5 m
  - Savikerros (lievästi ylikonsolidoitunutta tai silttisempää verrattuna ylempään saveen). 12,5-14,6 m
  - Tiiviimpi savikerros 14,6-17,5 m (lievästi ylikonsolidoitunutta).
  - Kairaus päättynyt kovaan pohjamaahan
- Saven liejuisuutta (humuspitoisuutta) hankala päätellä diagrammista. Tarkempi maalajimääritys vaatii näytteidenottoa.
- Kerroksen 12,5-14,6 m nettokärkivastus (q_T - u_2) on suhteessa suurempi kuin ylempänä olevan saven, vaikka huomioitaisiin syvyysvaikutuksesta johtuva jännitystilanmuutos. Tämä mahdollisesti johtuu suuremmasta kitkakulmasta, mikä voi taas johtua saven tiiveydestä (ylikonsolidoitumisesta) tai suuremmasta silttipitoisuudesta.



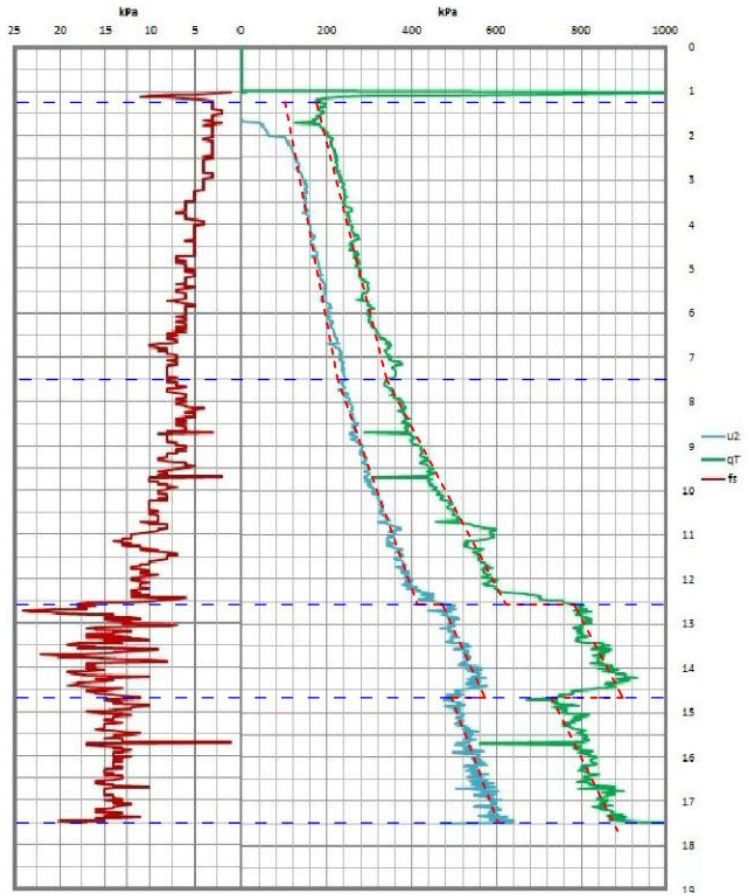
Maalajikerrosten tulkinta Masku (karkea)

- Tiedon käyttötarkoituksen mukaan maalajikerrokset voidaan jakaa myös karkeammin
  - Stabiliteettilaskennan kannalta syvällä olevat ohuet kerrokset usein merkityksettömiä (mikäli liukupinta ei edes ulotu niihin asti). Ohut hiekkakerros (esim paksuus alle 5 cm) lähellä maanpintaa ei juurikaan paranna stabiliteettilaskennan tulosta. Painumalaskennassa ohuella pinnan läheisyydessä olevalla hiekkakerroksella sen sijaan on merkitystä huokospaineen tasaantumiseen ja näin ollen painumien muodostumisnopeuteen uuden penkereen alla



Maalajikerrosten tulkinta Masku

- CPTU-diagrammin avulla voidaan optimoida näyte- ja siipikairaussyvyydet, kun halutaan pienentää tutkimusten epävarmuustasoa (kunhan siipikairaus onnistuu tai näyte on häiriintymätön).
- Esimerkiksi luonnontilaisessa maassa
  - Paksummissa kerroksissa 1-3 siipipyöräytystä
    - Yksi pyöräytys tulos per maakerros jättää siipitulokselle suuren epävarmuuden tuloksen oikeellisuudesta
  - Voidaan määrittää syvyydet niin, ettei siipi osu kahteen eri maalajikerrokseen
- Näytesyvyyksien tasot ja määrät siiven mukaisia



Maalajikerrosten tulkinta

- Vertailukokeen avulla voidaan määrittää kerroksen kärki- ja huokospainekertoimet:

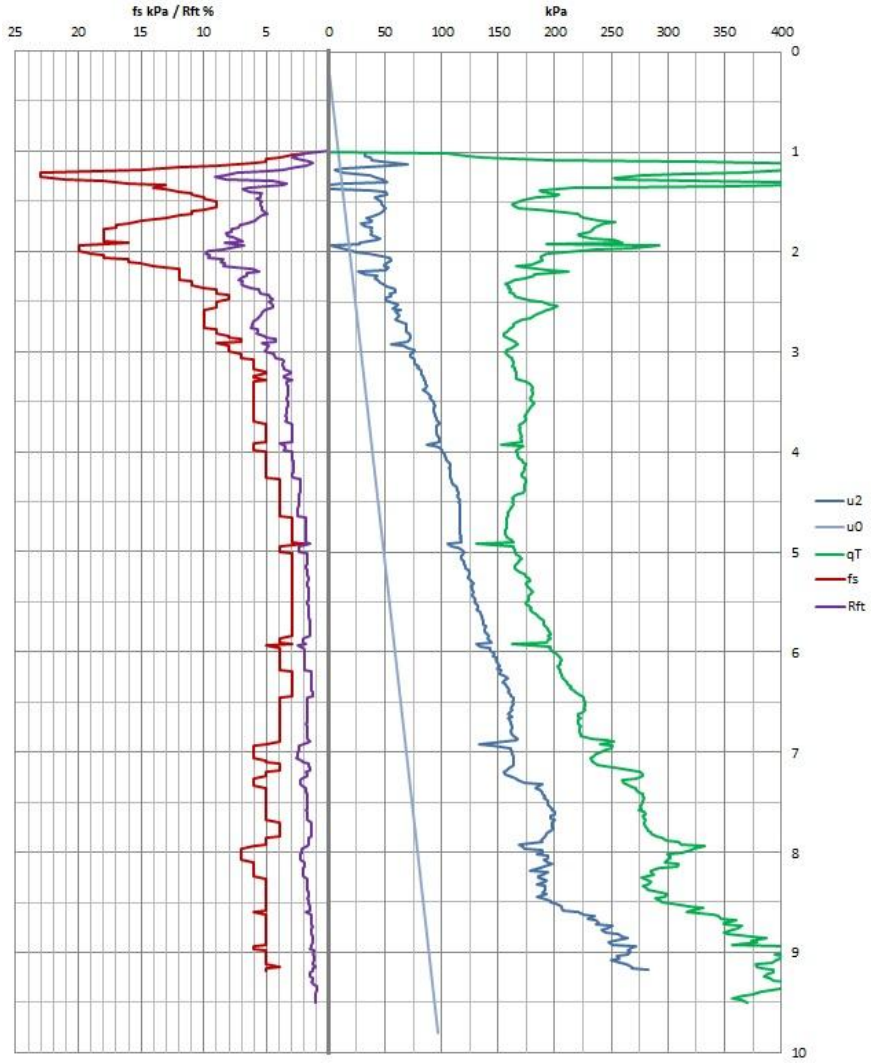
$$N_{kt} = (q_t - \sigma_{v0}) / s_u$$
$$N_{\Delta u} = [(u_2 - u_0) / s_u$$

Tarkastelu kuitenkin kriittisesti myös siipikairauksen tulokset!

- Epäonnistunut vertailutulos johtaa harhaan CPTU-tulkintaa.

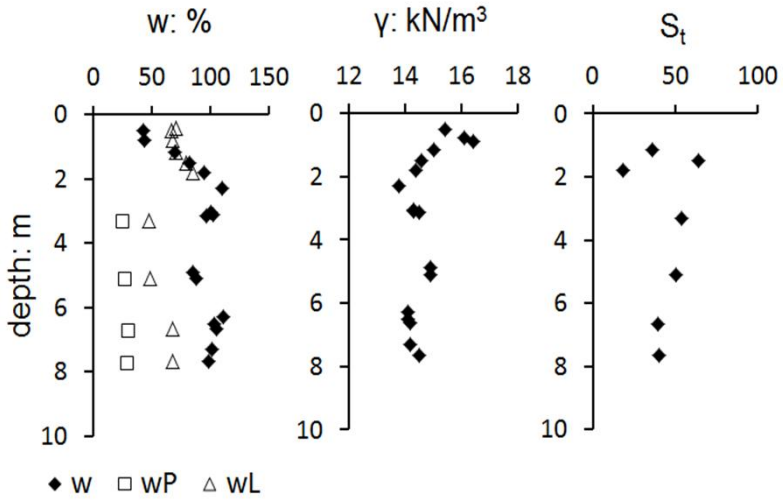
Maalajikerrosten tulkinta Lempäälä

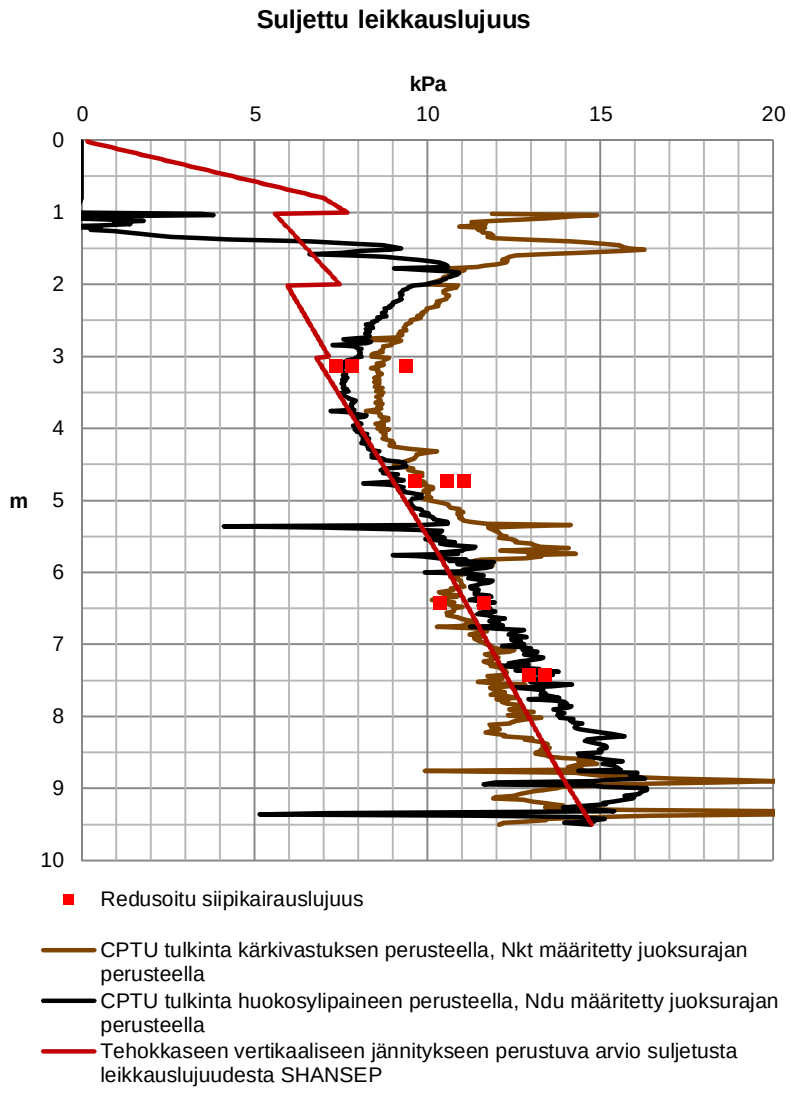
- Esimerkki Lempäälän CPTU-diagrammista turpeen tunnistamisesta.
- Turvelaatuja on monenlaista, joten käyttäytyminenkin voi poiketa paljonkin toisistaan, mutta tässä kuitenkin jotain:
  - Turvetta alkukairausreiän alapuolella (ainakin syvyystasolla 1-3 m, mahdollisesti jopa 4,5 m asti)
  - Kärkivastus suhteellisen pieni, mutta vaippavastus taas saveksi ”suuri”. Vrt. kitkasuhteen ($R_{ft} = (f_s / q_t) \cdot 100$ %) arvoja syvyystasoilla 2 m (turve) ja 5,5 m (savi)
  - Huokospaineen arvot pieniä saveksi sekä voivat käydä ns. negatiivisina eli arvot ovat pienempiä kuin luonnollinen huokosvedenpaine u_0



Suljetun leikkauslujuuden tulkinta (Perniö)

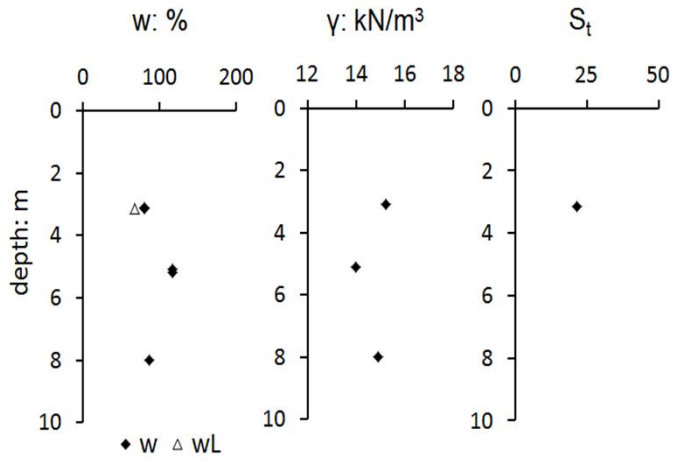
- Tulkinta tehty käyttäen Larssonin kaavaa suljetulle leikkauslujuudelle
  - Huokosylipaineeseen sekä kärkivastukseen perustuen
  - Huokosylipainetulkintaa varten tehty huokospaineentasaantumiskoe luonnollisen huokospaineen määrittämiseksi
  - Ylikonsolidoitumisaste 1,4-1,5 siipikairausten kohdalla

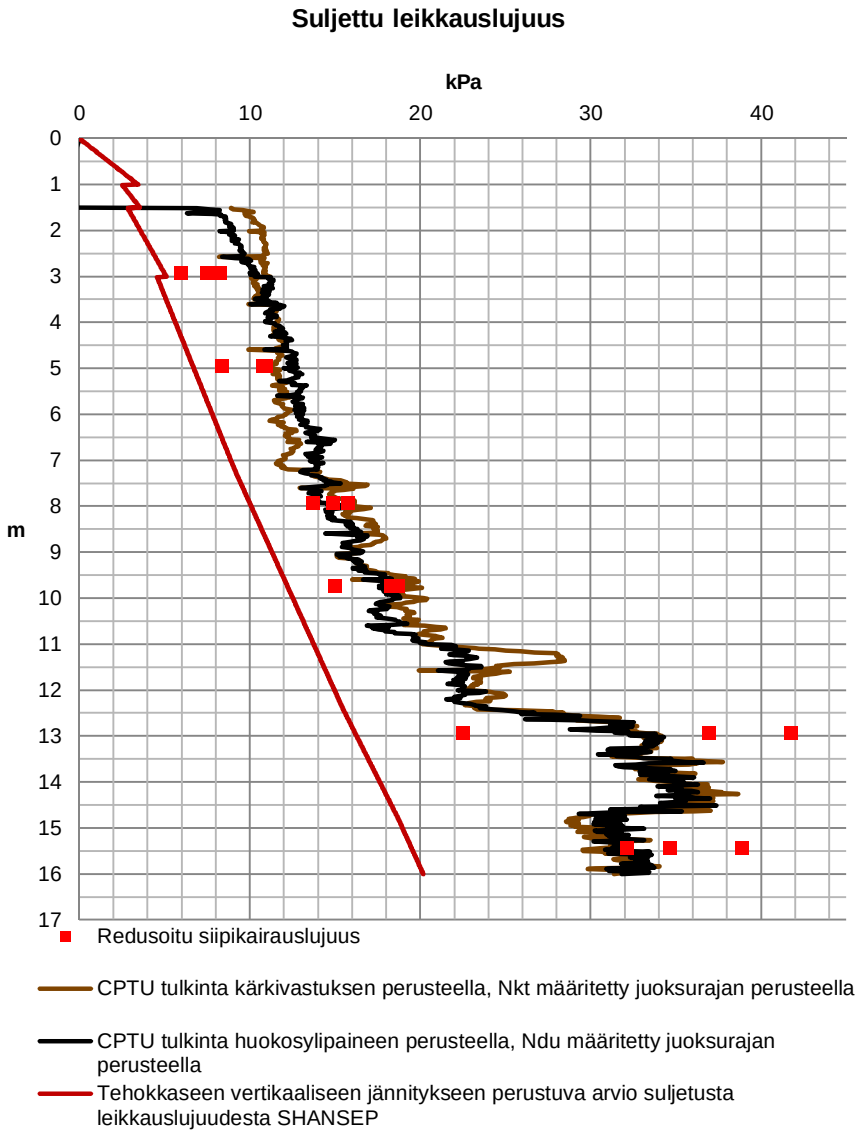




Suljetun leikkauslujuuden tulkinta (Masku)

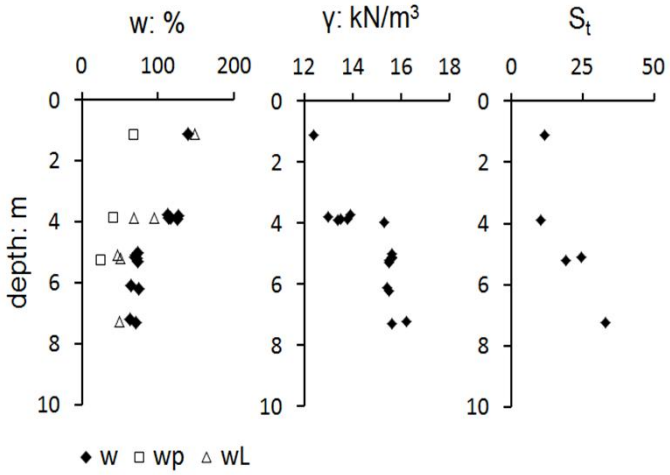
- Tulkinta tehty käyttäen Larssonin kaavaa suljetulle leikkauslujuudelle
  - Huokosylipaineeseen sekä kärkivastukseen perustuen
  - Huokosylipainetulkintaa varten tehty huokospaineentasaantumiskoe luonnollisen huokospaineen määrittämiseksi
  - Ylikonsolidoitumisaste 1,3-1,5 siipikairausten kohdalla
  - Laboratoriokoestukset kesken (tulkinta tarkentuu)

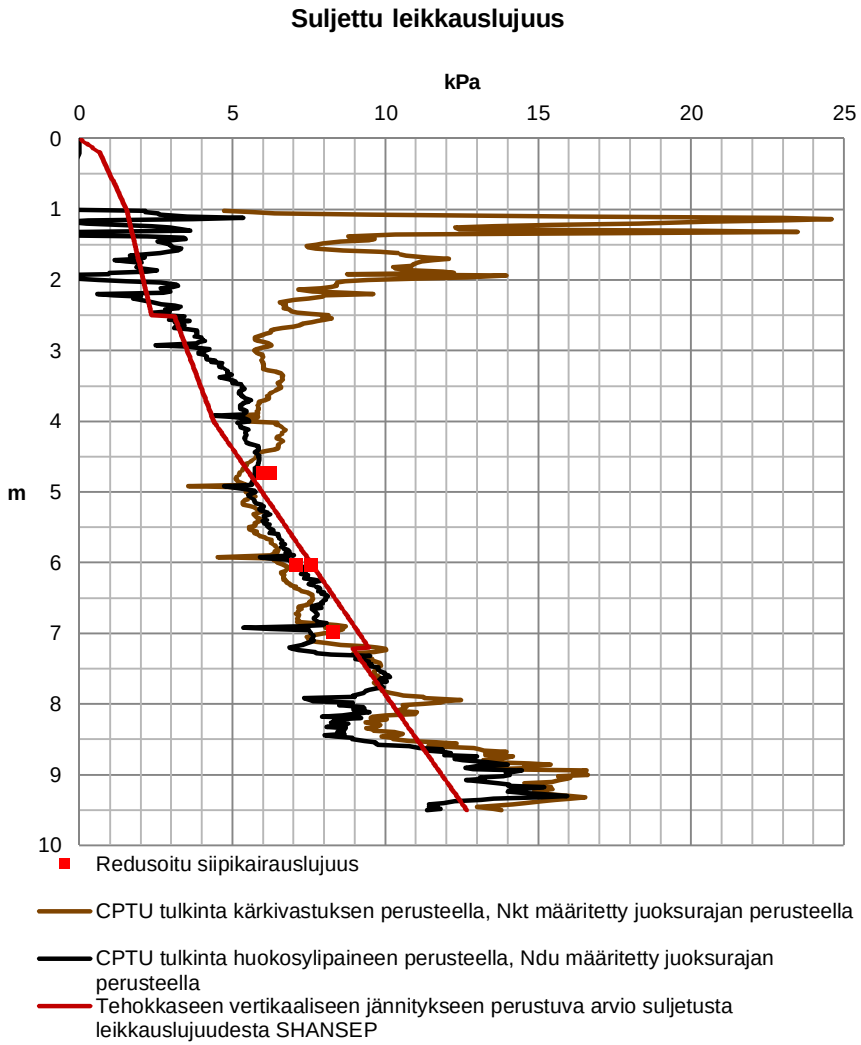




Suljetun leikkauslujuuden tulkinta (Lempäälä)

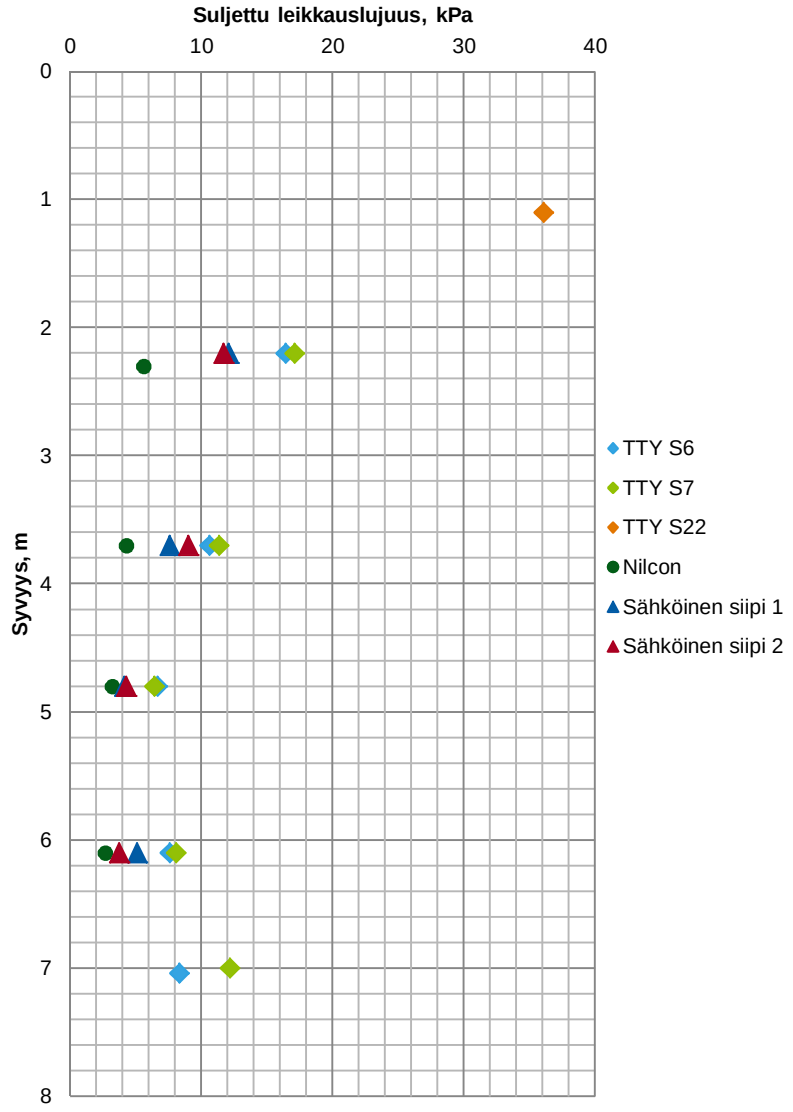
- Tulkinta tehty käyttäen Larssonin kaavaa suljetulle leikkauslujuudelle
  - Huokosylipaineeseen sekä kärkivastukseen perustuen
  - Huokosylipainetulkintaa varten tehty huokospaineentasaantumiskoe luonnollisen huokospaineen määrittämiseksi
  - Ylikonsolidoitumisaste 1,3-1,4 siipikairausten kohdalla





Siipikairaustulokset (Lempäälä)

- Siipikairaustulosten vertailu neljän eri laitteiston välillä (redusoimattomia)
- Siipikairaus Nilcon ja sähköiset siipikairaukset tehty putkittamatta. Alkukairausreikä auki 1,5 m asti.
- Luokitus
  - TTY:n käyttämä siipi täyttää eurostandardin parhaan testityypin luokituksen **FV1**
  - Nilcon luokituksen alimmassa luokassa **FV4**
  - Sähköiset siipikairauksen luokassa **FV3**, kun putkitusta ei ole tehty. Luokitus nostettavissa luokkaan **FV2**
- Luokitusluokan parantuessa myös käytettävyys heikkenee. Valmisteluun ja kairauksiin kuluu enemmän aikaa.
- **Huomioitavaa vertailukokeen merkitys korrelaation kannalta!**



Lähteet

- Larsson, R. 2007. CPT-sondering. Swedish Geotechnical Institute, Information, (15).
- Wroth, c. P. 1984, "The Interpretation of In Situ Soil Tests", 24th Rankine Lecture, Geotechnique 34, 4, 449-489.