

Iikka Kärki

Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä

Iikka Kärki

Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2010

Liikennevirasto
Helsinki 2010

Kannen kuvat: Tim Länsivaara ja Iikka Kärki

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-517-5

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Iikka Kärki: Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2010. 39 sivua ja 4 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-517-5.

Avainsanat: suljettu leikkauslujuus, CPTU, Perniö

Tiivistelmä

Tässä diplomityössä tutkitaan suljetun leikkauslujuuden määrittämistä erilaisilla in-situ ja laboratoriotutkimusmenetelmillä. Suljettu leikkauslujuus määritellään siipikairauksesta saatavasta siipikairauslujuudesta ja herkällä kärjellä tehtävästä CPTU-kairauksen kärkivastuksesta ja huokospaineesta. Lisäksi lujuuksia vertaillaan myös laboratorioskokeiden avulla määritettyihin suljettuihin leikkauslujuuksiin.

Eri tavoin saatuja suljettuja leikkauslujuuksia vertailtiin pistekohtaisesti CPTU-kairauksesta saatavan suljetun leikkauslujuuden luotettavuuden arvioimiseksi. Mahdollisimman kattavan otoksen saamiseksi Suomen savista vertailut tehtiin neljältä rataosalta eri puolilta Suomea. Perniössä tutkittiin pehmeää normaalikonsolidoitunutta savea, Tampere–Seinäjoki ratavälillä silttistä savea, Kotka–Kouvola ratavälillä ylikonsolidoitunutta savea ja Turku–Uusikaupunki ratavälillä erittäin pehmeää, lihavaa savea.

Turku–Lieto valtatie 9 osuudella vertailtiin kartiokokeilla määritettyjä suljettuja leikkauslujuuksia CRS-kokeiden esikonsolidaatiojännityksestä laskettuihin suljettuihin leikkauslujuuksiin.

Tutkimusaineiston perusteella eri tutkimusmenetelmillä saadut suljetut leikkauslujuudet vastaavat hyvin toisiaan ainakin normaalikonsolidoituneessa, kohtalaisen pehmeässä savessa. Ylikonsolidoituneessa savessa eri tutkimustuloksilla määritellyt suljetut leikkauslujuudet erosivat merkittävästi toisistaan tai niitä ei saatu luotettavasti määritettyä.

Iikka Kärki: Bestämmande av odränerad skjuvfasthet i banmiljö. Trafikverket, Järnvägsavdelningen. Helsingfors 2010. Trafikverkets undersökningar och utredningar 20/2010. 39 sidor och 4 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-517-5.

Nyckelord: odränerad skjuvfasthet, CPTU, Perniö

Sammanfattning

I detta diplomarbete undersöks bestämmandet av odränerad skjuvfasthet med olika in-situ- och laboratorieundersökningsmetoder. Odränerad skjuvfasthet bestäms utifrån värdet på vingborrningsfastheten vid vingborrning samt från portrycket och spetsmotståndet vid CPTU-borrning med känslig spets. Dessutom jämförs dessa värden med värden för odränerad skjuvfasthet som erhållits genom laboratorieundersökningar.

Värden för odränerad skjuvfasthet som bestämts med olika metoder jämfördes separat för varje punkt i syfte att uppskatta tillförlitligheten av värden på odränerad skjuvfasthet som erhålls genom CPTU-borrning. För att säkerställa ett så heltäckande sampel av lerjordarna i Finland som möjligt gjordes jämförelser på fyra olika banavsnitt i Finland. I Bjärnä undersöktes mjuk normalkonsoliderad lera, på banavsnittet Tammerfors–Seinäjäjoki siltig lera, på banavsnittet Kotka–Kouvola överkonsoliderad lera och på banavsnittet Åbo–Nystad mycket mjuk, fet lera.

På landsväg 9 Åbo–Lundo jämfördes värden för odränerad skjuvfasthet som bestämts genom konprov med värden som beräknats utifrån förkonsolideringsspänningen vid CRS-prov.

Enligt forskningsmaterialet ger olika metoder värden som stämmer överens rätt bra åtminstone för normalkonsoliderad, relativt mjuk lera. För överkonsoliderad lera avviker värdena på odränerad skjuvfasthet som tagits fram med olika metoder betydligt från varandra, eller så var det inte möjligt att bestämma värdena på ett tillförlitligt sätt.

Iikka Kärki: Determination of undrained shear strength in railway environment. Finnish Transport Agency, Railway Department. Helsinki 2010. Research reports of the Finnish Transport Agency 20/2010. 39 pages and 4 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-517-5.

Keywords: undrained shear strength, CPTU, Perniö

Summary

The purpose of this thesis is to compare definitions of undrained shear strength with different in-situ and laboratory research methods. Undrained shear strength is determined with field vane shear test or calculated from either tip resistance or porewater pressure obtained from CPTU penetration test equipped with sensitive probe.

The undrained shear strengths determined from same points with different methods are compared to evaluate reliability of different methods. The comparison was done on 4 different railway environment to observe a broader range on Finnish clays. In Perniö examined clay was soft and normally consolidated, between Tampere-Seinäjoki was silty clay, between Kotka-Kouvola overconsolidated clay and between Turku-Uusikaupunki the clay was very soft and fat.

In addition, between Turku and Lieto, on highway 9 comparison was made between undrained shear strengths obtained with fall cone test and calculated from preconsolidation pressures obtained from CRS-tests.

According to this study undrained shear strengths obtained with different in-situ and laboratory research methods are very similar at least on normally consolidated, soft clay. In overconsolidated clay the results were inconsistent or there were difficulties to determine undrained shear strength at all.

Esipuhe

Tämän diplomityön on tehnyt tekniikan ylioppilas Iikka Kärki opinnäytetyönään Teknillisen Korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Työn rahoittajana toimi Liikennevirasto.

Työn valvojana toimi Teknillisen Korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan professori Pauli Vepsäläinen. Työn ohjaajana toimi DI Jaakko Heikkilä.

Helsingissä elokuussa 2010

Liikennevirasto
Rautatieosasto

Sisällysluettelo

MERKINNÄT	8
1 JOHDANTO	9
2 SIIPIKAIRAUS.....	10
2.1 Siipikairaukseen vaikuttavia ominaisuuksia	10
2.1.1 Maan ominaisuudet	10
2.1.2 Siipikairauksen suorittaminen.....	11
2.1.3 Kuormitus	14
2.2 Suljetut leikkauslujuudet	14
2.2.1 Määrittäminen	14
2.2.2 Redusointi.....	15
3 CPTU	19
3.1 Yleistä	19
3.2 Geoteknisten parametrien arviointi CPTUkairauksen perusteella	21
3.2.1 Yleistä.....	21
3.2.2 Suljettu leikkauslujuus.....	22
4 ÖDOMETRI	24
4.1 Yleistä	24
4.2 Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen	25
5 KOLMIAKSIAALIKOE.....	26
5.1 Yleistä	26
5.2 Tehokkaat lujuusparametrit	27
5.3 Suljettu leikkauslujuus	29
6 KENTTÄKOKKEET.....	30
6.1 Perniö, pehmeä, normaalikonsolidoitunut savi	30
6.1.1 Yleistä.....	30
6.1.2 Pohjatutkimukset	30
6.1.3 Suljetut leikkauslujuudet.....	31
6.2 Tampere-Seinäjoki, silttinen savi.....	32
6.2.1 Pohjatutkimukset	32
6.2.2 Suljetut leikkauslujuudet.....	32
6.3 Kotka–Kouvola, ylikonsolidoitunut savi	33
6.4 Turku–Uusikaupunki, lihava savi	33
6.4.1 Pohjatutkimukset	33
6.4.2 Suljetut leikkauslujuudet.....	34
6.5 Valtatie 9, Turku-Lieto.....	34
6.5.1 Pohjatutkimukset	34
6.5.2 Suljetut leikkauslujuudet.....	34
7 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT.....	37
LÄHDELUETTELO	38
LIITTEET	
Liite 1	Perniön suljetut leikkauslujuudet
Liite 2	Tampere–Seinäjoki suljetut leikkauslujuudet
Liite 3	Kotka–Kouvola suljetut leikkauslujuudet
Liite 4	Turku–Uusikaupunki suljetut leikkauslujuudet

Merkinnät

B_q	huokospainesuhde
I_p	plastisuusluku
D	siiven halkaisija
K_o	lepopainekerroin
M_{tot}	siipikairan näyttämä momenttilukema
N_{kt}	empiirinen kerroin
$N_{\Delta u}$	empiirinen kerroin
OCR	esijännityksen ja vallitsevan tehokkaan jännityksen suhde
S_t	sensitiivisyys
V	tilavuus
c	koheesio
c'	tehokas koheesio
c_u	suljettu leikkauslujuus
q_t	kärkivastus
k_1	murtosuoran kaltevuuskulman tangetti
q_o	murtosuoran ja q-akselin leikkauspiste
s_u	suljettu leikkauslujuus
u	huokospaine
u_w	huokosvedenpaine
u_o	normaali huokospaine
u_z	mitattu huokospaine
v	ominaistilavuus
w	vesipitoisuus
w_L	juoksuraja
γ	maan tilavuuspaino
μ_{OCR}	konsolidaatitilasta riippuva kerroin
σ	normaalijännitys
σ_{vo}	maassa vallitseva pystyjännitys
σ'_{vo}	maassa vallitseva tehokas pystyjännitys
τ	leikkauslujuus
τ_o	standardinopeudella saatu leikkauslujuus
τ_{tf}	leikkauslujuus murtoajalla t
φ'	tehokas kitkakulma

1 Johdanto

Diplomityön aiheena on suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä.

Työssä perehdytään Ratahallintokeskuksen julkaisua *B15 Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet* varten tehtyihin kairauksiin ja laboratoriotutkimuksiin rataosuuksilla Tampere-Seinäjoki, Kotka-Kouvola ja Turku-Uusikaupunki. Lisäksi näillä rataosuuksilta käytiin tätä tutkimusta varten tekemässä CPTU-kairauksia. Näiden lisäksi käsitellään Ratahallintokeskuksen lokakuussa 2009 tekemää *Perniön ratapenkeren sörutuskoetta* varten tehtyjä pohjatutkimuksia ja urakkaa Vtg Turku-Lieto varten Tiehallinnon Turun tiepiirin teettämiä pohjatutkimuksia. Urakka oli mukana TEKES-projektissa "Elinkaaritarkastelut tienpidon hankintoihin" yhtenä pilottiprojektina.

Työssä on tarkoitus tutkia eri pohjatutkimusmenetelmillä saatujen suljettujen leikkauslujuuksien soveltuvuutta geotekniseen suunnitteluun ja mitoitukseen tarvittavien parametrien määrittämiseen.

Diplomityössä on keskitytty pääosin vertailemaan CPTU-kairauksesta saatavien suljettujen leikkauslujuuksien soveltuvuutta geotekniseen suunnitteluun ja mitoitukseen. Siipikairausten avulla on haettu sopivat empiiriset kertoimet suljettujen leikkauslujuuksien laskemiselle erilaisissa savissa. Eri menetelmillä saatuja leikkauslujuuksia vertaillaan pistekohtaisesti ja arvioidaan yhteneväisyys.

2 Siipikairaus

2.1 Siipikairaukseen vaikuttavia ominaisuuksia

2.1.1 Maan ominaisuudet

Siipikairaukseen vaikuttavia maan ominaisuuksista johtuvia ja leikkauslujuutta arvioidessa huomioon otettavia asioita ovat maaperän anisotropia, lujuuden mobilisoinnin vaikutus ja leikkauksen nopeus.

Anisotropia tarkoittaa suunnasta riippuvaista. Anisotrooppinen maaperä omaa jännitystilaa, jossa jännitykset eroavat toisistaan suunnasta riippuen. Yleisesti ottaen kaikki maalajit ovat muodostuneet erilaisten kerrostumisprosessien seurauksena ja homogeenisenkin maan lujuusominaisuudet ovat tästä johtuen eri suunnissa erilaiset (Slunga 1990).

Tulokset, joita Korhonen ja Leskelä (Korhonen ja Leskelä 1970) ovat saaneet osana laajempaa siipikairaustutkimustaan, osoittavat homogeenisten savien (mm. Litorina ja Yoldia) anisotrooppisuuden; vaakasuoran leikkauspinnan lujuus on yleensä suurempi kuin pystysuoran leikkauspinnan. Myös eräissä norjalaisissa tutkimuksissa on saatu samansuuntaisia tuloksia.

Kerrallisissa savissa (mm. Baltian jääjärven savet) pystysuuntainen leikkauslujuus on sen sijaan yleensä suurempi kuin vaakasuora leikkauslujuus. Vaakasuora lujuus on usein noin 15..20 % pienempi kuin pystysuora lujuus. Koska liukupinta sortumatapauksissa yleensä seuraa pidempään vaakasuoria kerroksia kuin pystysuoria, on anisotrooppisuuteen syytä kiinnittää huomiota keskimääräistä leikkauslujuutta arvioitaessa.

Yleisesti käytössä oleva kaava (1) leikkauslujuuden laskennalle siipikairan näyttämältä momenttilukemasta kun käytetään standardikokoista siipeä:

$$\tau = \frac{6M_{tot}}{7\pi D^3} \quad (1)$$

missä

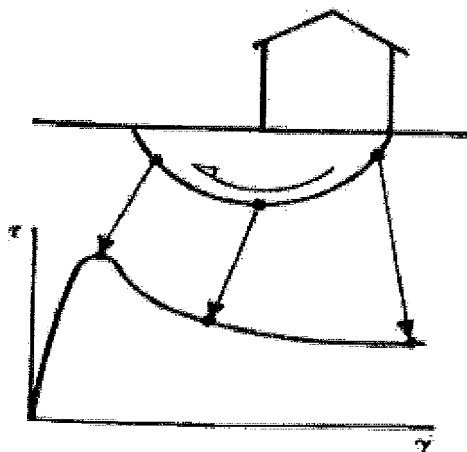
τ	on	leikkauslujuus
M_{tot}		siipikairan näyttämä momenttilukema
D		siiven halkaisija

Yllä olevassa kaavassa ei huomioida anisotrooppisuuden vaikutusta, vaan aluksi on oletettu pysty- ja vaakasuuntaiset leikkauslujuudet samoiksi.

Vakavuuden laskentatapa, joka perustuu kairaustulosten huippuarvoihin saattaa antaa virheellisen käsityksen todellisesta lujuudesta, johtuen niin sanotusta lujuuden mobilisoinnista. Maa saattaa ylittää murtolujuutensa murtopinnan alkupäässä penkereen tai perustusten alapuolen kuitenkään kokonaan murtumatta. Muodonmuutokset ovat tällä alueella huomattavasti suurempia kuin murtopinnan loppupäässä. Tämä on yksi syy miksi huippuarvoja ei käytetä sellaisenaan, vaan arvoja redusoidaan

eri menetelmillä. Huippuarvojen käyttö redusoimatta antaisi vakavuustarkasteluihin epävarmoja tuloksia ja seuraukset voisivat olla katastrofaaliset.

Kuvassa 1 on esitetty lujuuden ja muodonmuutosten välinen yhteys murtopinnalla (Young;McCelland ja Quiros 1988)



Kuva 1. Lujuuden mobiilisaation periaate. (Young;McCelland ja Quiros 1988)

2.1.2 Siipikairauksen suorittaminen

Siipikairauksen suorittamisessa on useita seikkoja, jotka tulee ottaa huomioon ja jotka vaikuttavat saatuun leikkauslujuuteen. Virhelähteitä ovat maaperän syrjäytyminen kairaa maahan työnnettäessä, siipitanko-jen hankaus maaperään, epätasainen kairausnopeus ja mahdollisesti viallinen laitteisto.

Standardi siipikairauskokeessa kairausnopeus on 6° minuutissa. Kairausnopeuden vaihtelu aiheuttaa tulosten epätarkkuuksia ja kairausnopeutta onkin syytä pitää vakiona koko kairauksen ajan epätarkkuuksien minimoimiseksi. Jos vakionopeudesta poiketaan, on se merkittävä ylös kairauspöytäkirjaan, koska se vaikuttaa saatavaan lujuusarvoon. (SGY 1995)

Vertaillen todellisista sortumista saatuja lujuusarvoja kairaustuloksiin tai laboratoriossa saatuihin lujuuksiin täytyy ottaa huomioon, että in-situ ja laboratoriossa saavutetut leikkauslujuuden huippuarvot saavutetaan noin 1-10 minuuttia kokeen aloittamisesta, kun taas todelliset sortumat tapahtuvat huomattavasti hitaammin. (Chandler 1988)

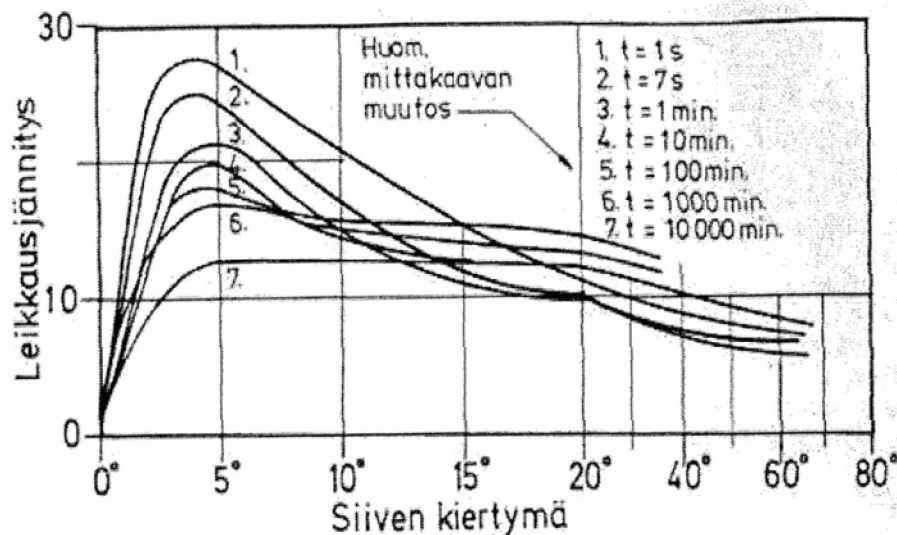
Muodonmuutosnopeuden vaikutusta leikkauslujuuteen laskettaessa on myös maan viskositeetti ja maan konsolidoituminen otettava huomioon. On havaittu, että kiertonopeuden kasvattaminen johtaa suurempiin leikkauslujuuksiin. Jos taas kiertonopeus on hidas, voi maassa tapahtua konsolidaatiota, joka aiheuttaa muutoksia saatavaan lujuuteen.

Kiertonopeuden vaikutus leikkauslujuuteen riippuu saven plastisuusluvusta. Ruotsalaisilla savilla, joiden plastisuusluvut ovat korkeita, leikkauslujuus on pienillä kierto-

nopeuksilla noin 20–30 % alhaisempi kuin standardinopeudella saadut. (Torstensson 1977) (Weisel 1973).

Päinvastaisia tuloksia on saatu kanadalaisille, huomattavasti ruotsalaista savea alhaisemman plastisuusluvun omaaville, saville. (Roy ja Leblanc 1988). Tässä tutkimuksessa huomattiin, että konsolidaation aiheuttama lujuuden kasvu on noin 20 % kun kiertonopeutta pienennetään standardinopeudesta.

Molemmat tutkimukset osoittavat, että standardinopeutta suuremmilla kiertonopeuksilla leikkauslujuuden arvot ovat suuremmat, mutta plastisemmalla savella lujuuden nousu on suurempaa. Torstenssonin (Torstensson 1977) tutkimusten mukaan seitsemässä vuorokaudessa saatu leikkauslujuus on noin 70 % standardinopeudella tehdyn arvosta. Kuvassa 2 on esitetty tehtyjä mittauksia eri siiven kiertonopeuksilla.



Kuva 2. Eri kiertonopeuksilla saatuja leikkauslujuuksia. (Torstensson 1977)

Saman tutkimuksen mukaan siiven kiertonopeuden ja mitattavan lujuuden välinen yhteys voidaan esittää kaavalla (2):

$$\frac{\tau_{tf}}{\tau_0} = at^{-0,05} \quad (2)$$

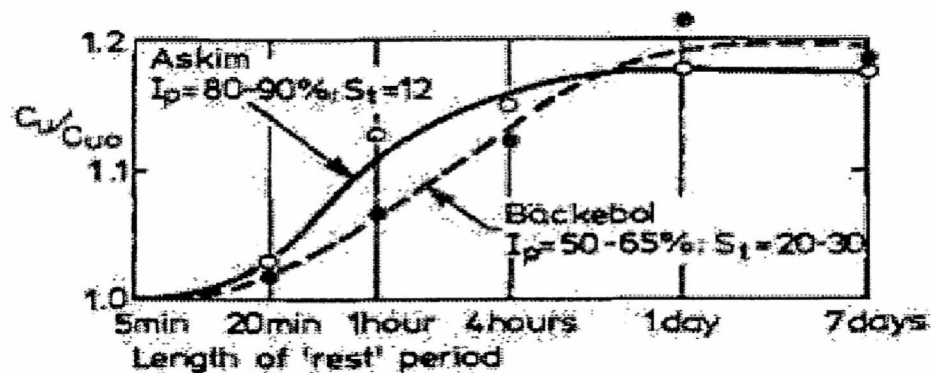
missä

τ_{tf}	on	leikkauslujuus murtoaajalla t
τ_0		standardinopeudella saatu leikkauslujuus
t		murtoaika minuuteissa
a		1,11–1,17

Parametrin a arvo vaihtelee riippuen humus- ja vesipitoisuudesta 1,11–1,17. Arvo 1,11 on määritelty savessa, jonka vesipitoisuus on ollut 120 % ja humuspitoisuus 6 %. Arvo 1,17 taas kuvaa savea, jonka vesipitoisuus on ollut 80–100 % ja humuksettomassa maassa.

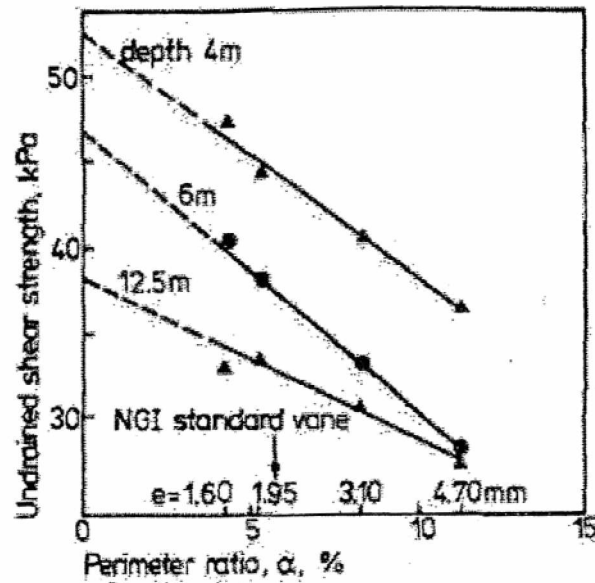
Kairaa maahan työnnettäessä se syrjäyttää maata, josta johtuen siiven lähistölle syntyy ylimääräisiä, kairaustulokseen vaikuttavia jännityksiä. Aluksi jännitykset siirtyvät huokosylipaineeksi huokosiin, mutta konsolidaation vaikutuksesta ylipaine siirtyy tehokkaaksi jännitykseksi raerunkoon. Maan häiriintyessä se menettää lujuuttaan, toisaalta taas häiriintymisen vaikutus pienenee ajan kuluessa.

Mitä sensitiivisempää savi on, sitä hitaampaa on lujuuden palautuminen. Ruotsalaisissa kohteissa tehty tutkimus (Chandler 1988) osoittaa, että leikkauslujuus kasvaa siiven maassaoloajan funktiota ennen kiertämisen aloittamista. Kuva 3 osoittaa kahden eri kohteen leikkauslujuuden riippuvuuden eri lepoajoista.



Kuva 3. Ajan vaikutus leikkauslujuuteen. (Chandler 1988)

Eräässä tutkimuksessa (La Rochelle; Roy ja Tavernas 1973) tehtiin eri siiven paksuudella kairauksia neljästä eri pisteestä ja kolmelta eri syvyydeltä. Koe tehtiin kahdella eri sensitiivisyyden omaavalla savella ja huomattiin, että siiven paksuudella on selvä vaikutus saven häiriintymiseen siipeä maahan työnnettäessä ja siten se myös vaikuttaa saatavaan leikkauslujuuden arvoon. Riippuvuus on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Mitatun lujuuden riippuvuus siiven paksuudesta (La Rochelle; Roy ja Tavernas 1973)

2.1.3 Kuormitus

Jos kuormitus on ehtinyt olla paikallaan tarpeeksi kauan, maa on ehtinyt konsolidoitumaan lisäkuorman vaikutuksen alaisena. Tällöin on kuorman alla olevan maan lujuus kasvanut. Pienellä lisäkuormalla alkuperäinen konsolidaatiojännitys ei yleensä ylity ja lujuuden kasvu sekä painumat ovat pieniä. Päinvastaistakin voi tapahtua, jos alkuperäinen konsolidaatiojännitys ylitetään vain vähän, lujuus voi myös pienentyä alkuperäisen rakenteen rikkoutuessa.

Leikkauslujuuden kasvua arvioitaessa on suositeltavaa tehdä siipikairaus suoraan kuorman läpi. Lujuuden kasvua voi myös arvioida esikonsolidaatiojännityksen kasvun perusteella. (Ratahallintokeskus 2005)

2.2 Suljetut leikkauslujuudet

2.2.1 Määrittäminen

Siipikairalla voidaan arvioida maan suljetun leikkauslujuuden suuruutta savessa, liejusavessa, liejussa ja maatumessa turpeessa. Leikkauslujuuden määrittäminen siipikairalla on yleensä mahdollista myös hieno- ja keskisiltissä. Maatumattomassa turpeessa ja karkeasiltissä siipikairalla saatua leikkauslujuutta voidaan pitää vain suunta-antavana. (SGY 1995)

2.2.2 Redusointi

2.2.2.1 Yleistä

Kohdassa 2.1 mainitut siipikairauksen mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät aiheuttavat tarpeen redusoida mitattuja lujuuksia paremmin vastaamaan olosuhteita, jotka vallitsevat luonnossa. Redusointimenetelmiä on kehitetty vuosien saatossa useita. Jäljempänä on esitetty yleisimmin käytettyjä menetelmiä redusointikertoimen määrittämiselle.

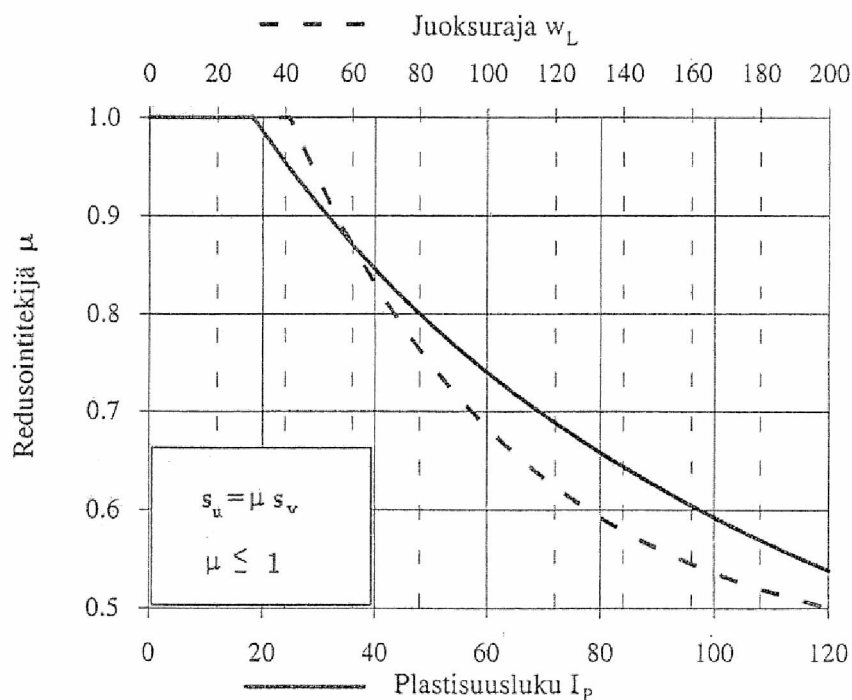
”Siipikairauksella saatu leikkauslujuus on aina redusoitava. Redusoimatta jättäminen ei ole sama kuin redusoiminen kertoimella 1.0” – Vesa Oksanen

Stabiliteettilaskelmissa käytettävä suljettu leikkauslujuus määritellään yleensä kertomalla siipikairauksella mitattu suurin leikkauslujuus korjauskertoimella.

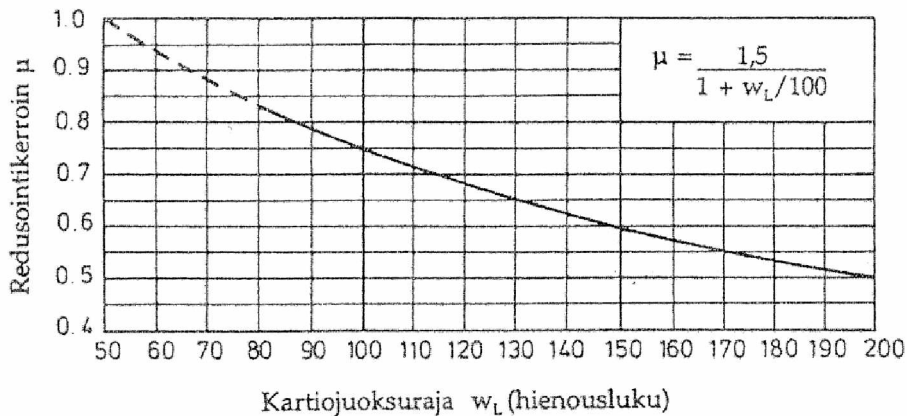
2.2.2.2 Juoksuraja ja plastisuusluku

Vesipitoisuus on yleisimmin mitattu indeksiominaisuus, jota usein käytetään juoksurajan likiarvona. Osittain tästä syystä useimmat käsikirjoissa esitetyt lujuuden redusointikaavat ja käyrät on kehitetty perustumaan juuri juoksurajaan. Juoksuraja onkin useimmiten varsin hyvä indikaattori suurimmalle osalle niistä saven fysikaalisista ominaisuuksista, jotka todella vaikuttavat mitatun siipikairalujuuden käyttökelpoisuuteen penkereen tai luiskan vakavuuden arvioinnissa.

Kuvassa 5 on esitetty siipikairausleikkauslujuuden redusointikertoimen määrittäminen menetelmä joka on esitetty Suomen Geoteknisen Yhdistyksen siipikairausoppaassa ja kuvassa 6 Tielaitoksen ohjeissa esitetty menetelmä.



Kuva 5. Siipikairausleikkauslujuuden redusointi plastisuusluvun ja juoksurajan avulla. (SGY 1995)

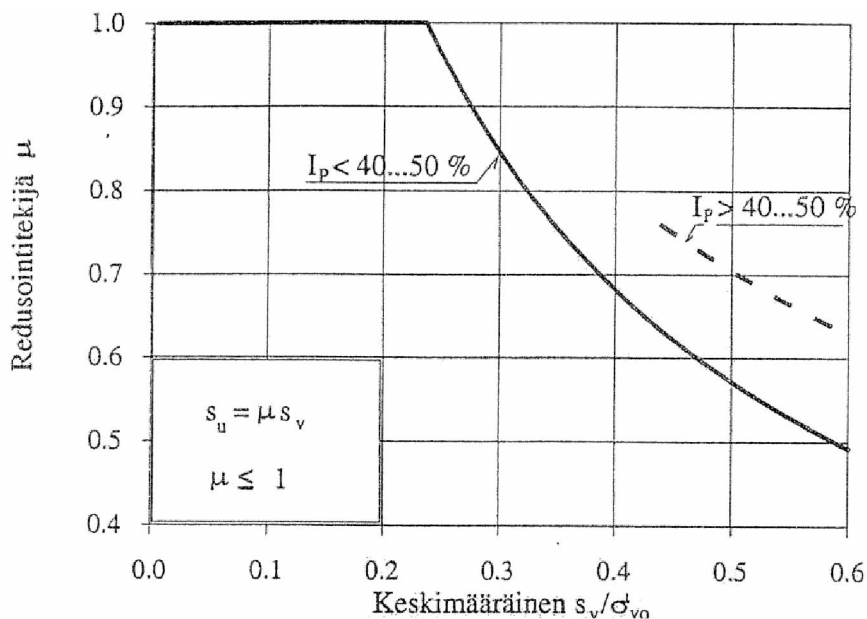


Kuva 6. Tielaitoksen ohjeissa esitetty menetelmä.

Eurokoodi esittää normaalikonsolidoituneille ja pehmeille saviille käytettäväksi kuvan 6 mukaista juoksurajasta riippuvaa redusointikerrointa, sillä poikkeuksella että se sallii jopa ykköstä suurempia redusointikertoimia. (SFS-EN 1997-2, Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu 2007)

2.2.2.3 Jännitys- ja konsolidaatiotila

Siipikairauksista saatavien leikkauslujuuksien käyttökelpoisuutta voidaan arvioida myös maassa vaikuttavan tehokkaan jännitystilän perusteella. Kuvassa 7 on esitetty menetelmä jolla saadaan siipikairausleikkauslujuuden redusointikerroin kun tiedetään saven plastisuusluku I_p ja siipikairausleikkauslujuuden s_u ja tehokkaan vallitsevan pystyjännityksen σ'_{vo} keskiarvo.



Kuva 7. Redusointikerroin tehokkaan pystyjännityksen avulla. (SGY 1995)

Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan (Larsson ja Åhnberg 2003), jos ylikonsolidoitumisaste on yli 1,3, tulisi kuvassa 7 esitetyllä tavalla redusoitu leikkauslujuus kertoa konsolidaatiotilasta riippuvalla kertoimella μ_{OCR} . Kaava (3).

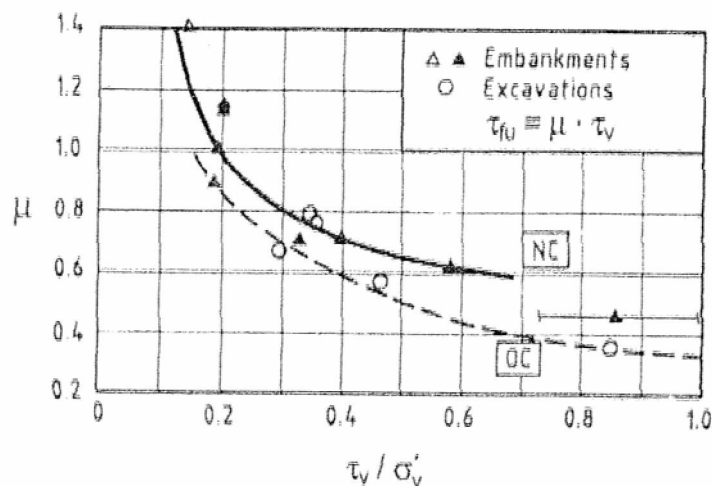
$$\mu_{OCR} = \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,15} \quad (3)$$

missä

μ_{OCR} on konsolidaatiotilasta riippuva kerroin

OCR esijännityksen ja vallitsevan tehokkaan jännityksen suhte

Ylikonsolidaation vaikutusta redusointikertoimeen on havainnollistettukuvassa 8. Siitä nähdään, että ylikonsolidoitunut savi vaatii huomattavasti pienemmän redusointikertoimen kuin normaalikonsolidoitunut. Käyrä NC on normaalikonsolidoitunut tai hiukan ylikonsolidoitunut ($OCR < 1,5$) tapaus ja OC ylikonsolidoitunut ($OCR > 1,5$) tapaus.

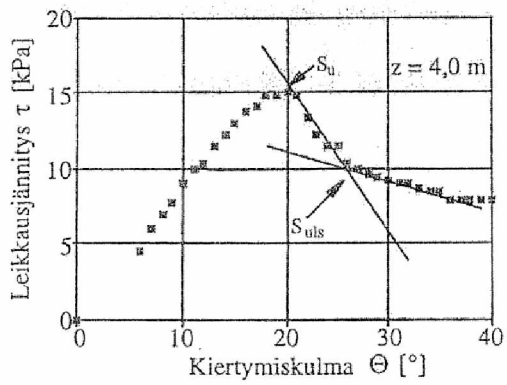


Kuva 8. Siipikairausleikkauslujuuden korjauskerroin normaali- ja ylikonsolidoituneille koheesiomaille. (Larsson ja Åhnberg 2003)

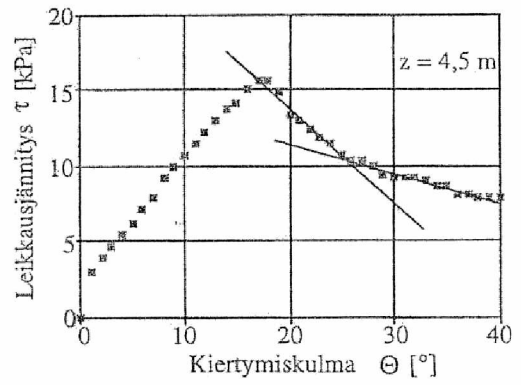
2.2.2.4 Suurten muodonmuutosten menetelmä

Suurten muodonmuutosten menetelmä leikkauslujuuden redusoinnissa on sekä helpokäyttöinen, että soveltuu myös konsolidoimattoman suljetun kolmiakσιαalikokeen tulosten redusointiin. Menetelmä vaatii siipikairauksen jatkamista riittävän kauan huippulujuuden saavuttamisen jälkeen. Pienet pyöritysnopeuden muutokset eivät vaikuta kovinkaan paljoa tällä tavalla redusoituun tulokseen. Kuvassa 9 on esitetty menetelmän periaate. Menetelmässä piirretään kaksi interpolaatiosuoraa, toinen sille osalle missä lujuus laskee jyrkimmin huippuarvon saavuttamisen jälkeen, ja toinen sille, missä lujuuden lasku on loivempaa. Suljettu leikkauslujuus saadaan kohdasta jossa nämä suorat kohtaavat. (Lojander;Slunga ja Rauhala 1990)

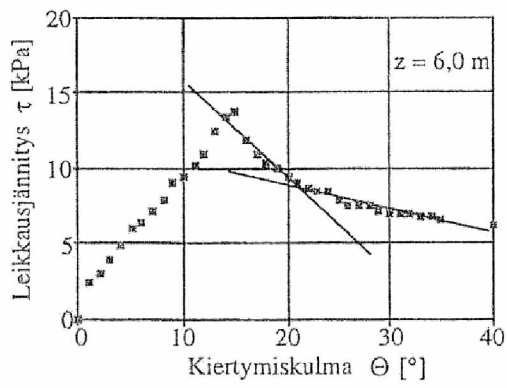
a)



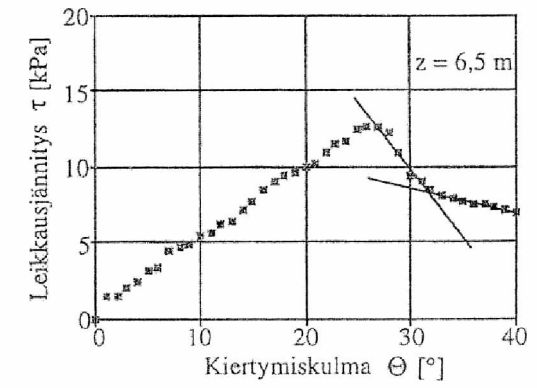
b)



c)



d)



Kuva 9. Suurten muodonmuutosten menetelmä suljetun leikkauslujuuden määrittämiseksi. (Lojander, Slunga ja Rauhala 1990)

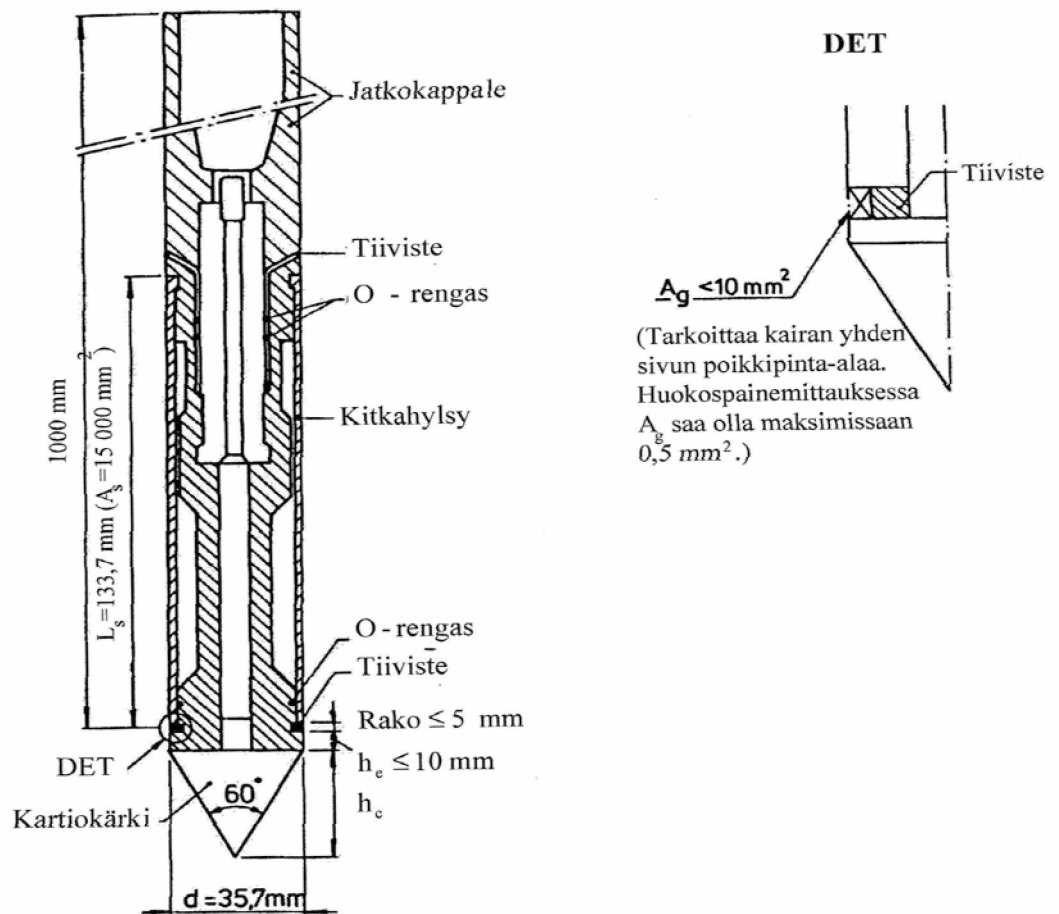
3 CPTU

3.1 Yleistä

Geotekniikassa ja varsinkin geoteknisessä suunnittelussa jo kairausvaiheessa saatava tieto maakerroksista ja maakerrosten lujuusominaisuuksista on korvaamatonta. Näihin tarkoituksiin yksi parhaiten soveltuvista menetelmistä on CPTU- eli puristin-kairaus.

CPTU-kairauksessa kairaa puristetaan maahan ja samalla mitataan sähköisesti kairan kärjestä kärkevyydestä, vaippakitkaa ja huokospainetta. (SGY 2001)

Kärkeen kohdistuvia parametrejä mitataan jännitys-venymäliuska-antureilla, jotka on sijoitettu kärkiosaan siten että virhelähteistä, kuormituksen epäkeskisyys tai mahdolliset lämpötilamuutokset, aiheutuvat mahdolliset mittausepätarikkeudet vaikuttavat mahdollisimman vähän. Muita mahdollisia virhelähteitä ovat sisäiset kitkahäviöt, mitauslaitteiston virheet tai väärä kairaustapa. CPTU-kairan mitat on esitetty kuvassa 10. (SGY 2001)



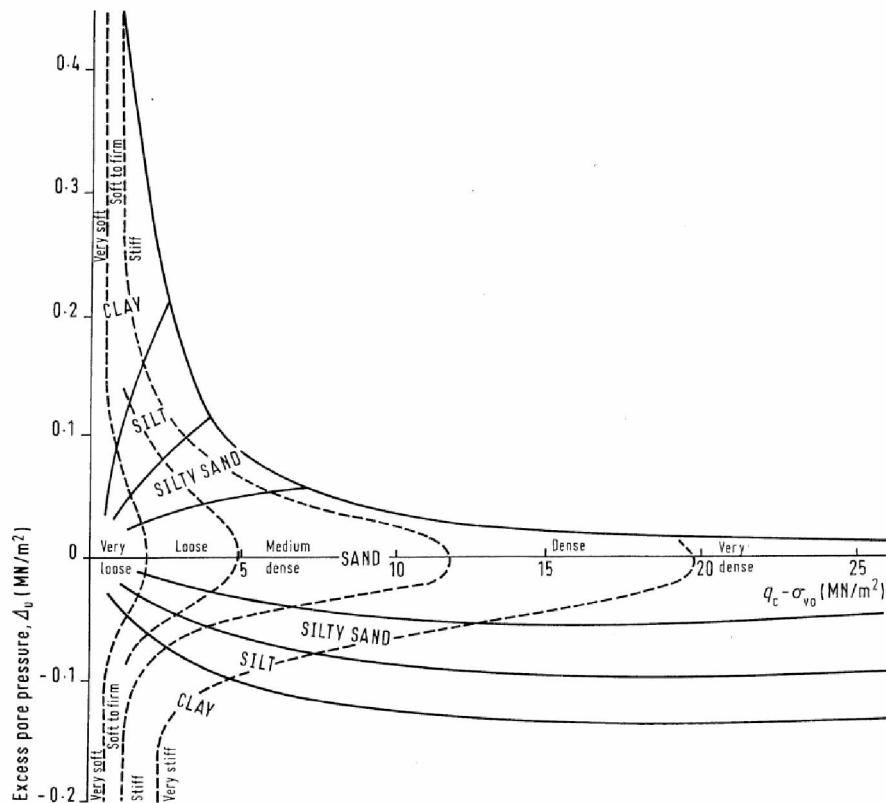
Kuva 10. CPTU kairan mitat. (SGY 2001)

Kohteen vaativuudesta riippuen välineistön tarkkuus valitaan taulukosta 1. Käytännössä suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen käy vain Kairausluokka 1:n mukaiset tai paremmat tarkkuudet. Kairausluokat 2-4 käyvät ainoastaan maan kerroksellisuuden ja muiden parametrien kuin leikkauslujuuden arviointiin.

Taulukko 1. CPTU-kairan tarkkuusluokitus. (SGY 2001)

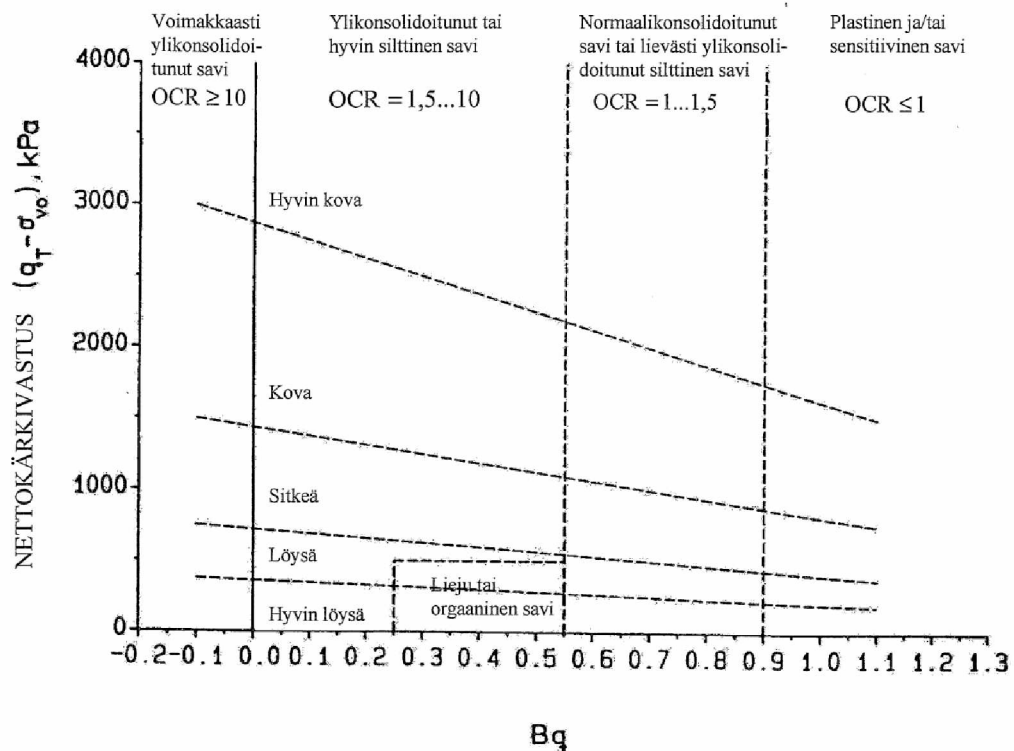
Kairausluokka	Mitattu parametri	Sallittu minimitarkkuus ^(1,2)	Mittavälin maksimi pituus
1	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairaussyvyys	50 kPa tai 3 % 10 kPa tai 10 % 5 kPa tai 2 % 0,1 m tai 1 %	20 mm
2	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairaussyvyys	100 kPa tai 3 % 25 kPa tai 15 % 25 kPa tai 3 % 0,2 m tai 2 %	20 mm
3	Kärkivastus Vaippakitka Huokospaine Kairaussyvyys	400 kPa tai 5 % 50 kPa tai 15 % 50 kPa tai 5 % 0,2 m tai 2 %	50 mm
4	Kärkivastus Vaippakitka Kairaussyvyys	500 kPa tai 5 % 50 kPa tai 20 % 0,1 m tai 1 %	100 mm

Maalajitulkintoihin CPTU-kairaustuloksista on käytettävissä lukuisia kokeellisia luokitusdiagrammeja sekä eräitä luokitusdiagrammin lailla toimivia tietokoneohjelmia. Ne perustuvat kärkivastuksen ja vaippakitkan suhteen vaihteluihin sekä huokospaineen vaihteluun eri maalajeissa. Kuvassa 11 on esitetty eräs tällainen luokitusdiagrammi.



Kuva 11. CPTU-kairaustulosten luokitusdiagrammi. (Meigh 1987)

Yllä oleva luokitusdiagrammi on hieman vanhentunut ja lukuisia uudempia ja tarkempia luokitusdiagrammeja on julkaistu vuosien kuluessa. Kairausopas VI esittää kuvassa 12 esitetyn nettokärkivastukseen ($q_T - \sigma_{vo}$) sekä huokospainesuhteeseen $B_q = \Delta u / (q_T - \sigma_{vo})$ perustuvan erikoisdiagrammin savelle ja orgaaniselle maalle.



Kuva 12. Saven ja orgaanisen maan luokitusdiagrammi. (SGI 1993)

3.2 Geoteknisten parametrien arviointi CPTU-kairauksen perusteella

3.2.1 Yleistä

Kairausopas VI toteaa, että 'Ainoastaan CPTU-kairausten perusteella arvioituja geoteknisiä parametrejä ei missään tapauksessa saa käyttää mitoitusparametreinä laskelemissa'. Oppaassa esitetyt käyrästöt ja kaavastot perustuvat ruotsalaiseen vastaavaan oppaaseen (SGI 1993) ja ne soveltuvat käytettäväksi myös Suomen olosuhteissa. (SGY 2001)

Taulukossa 2 on esitetty CPTU-kairaustuloksista määritettyjen geoteknisten parametrien luotettavuus eri maalajeissa. Vähintään yksi häiriintymätön/häiritty näyte tulkittavasta maakerroksesta tulee aina ottaa geoteknisten parametrien luotettavuuden parantamiseksi. Lisäksi in-situ maastokokeet, kuten esimerkiksi siipikairaukset parantavat vertailupohjaa.

Taulukko 2. CPTU-kairaustulosten perusteella määritettyjen geoteknisten parametrien luotettavuus eri maalajeissa. (SGY 2001)

Geotekninen parametri	Luotettavuus	
	Kitkamaa (hiekkä, karkea siltti)	Koheesiomaa (savi, hieno siltti)
1. Leikkauslujuus	-	•••
2. Kitkakulma	••	••
3. Suhteellinen tiiviys	•	•
4. Muodonmuutosominaisuudet	•	•
5. Paalun kantavuus	•	•

- Kohtuullisen luotettava (*ei saa käyttää mitoituservona laskelmissa*), mikäli rakeisuuskäyrän perusteella maalaji on kitkamaata.
- Suuntaa-antava ainoastaan siinä tapauksessa, että laboratoriotulokset varmistetaan maalajin rakeisuus, vesipitoisuus ja juoksuraja.
- Täysin riittämätön luotettavuus edes suuntaa-antavaksi parametriksi ilman täydentäviä esim. kolmiaksaali-/ödometrikokeen tuloksia.

3.2.2 Suljettu leikkauslujuus

Homogeenisen ja hienorakeisen maan suljettua leikkauslujuutta (s_u) voidaan arvioida melko hyvin nettokärkivastuksen ($q_t - \sigma_{v0}$) avulla. Leikkauslujuuden määrittystarkkuus riippuu lähinnä kairauskärkivastuksesta, on myös suositeltavaa kalibroida tulokset esimerkiksi siipikairaustulosten perusteella.

Kaavassa (4) on esitetty suljetun leikkauslujuuden määrittäminen nettokärkivastuksen avulla.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (4)$$

missä

q_t	on kärkivastus
σ_{v0}	pystysuora jännitys
N_{kt}	empiirinen kerroin

Kerroin N_{kt} on pehmeille saviille yleensä välillä 10-20, mutta se tulee määrittää tapauskohtaisesti. Kairausopas VI esittää kertoimelle arvoa 16,3 savella ja 24 liejulle. (SGY 2001) (SGI 1993)

Suljettu leikkauslujuus on myös mahdollista määrittää käyttäen pelkästään huokospaineen mitattuja arvoja. (Tavenas ja Leroueil 1987)

Leikkauslujuuden arviointi käyttäen huokospainetta on esitetty kaavassa (5).

$$s_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (5)$$

missä

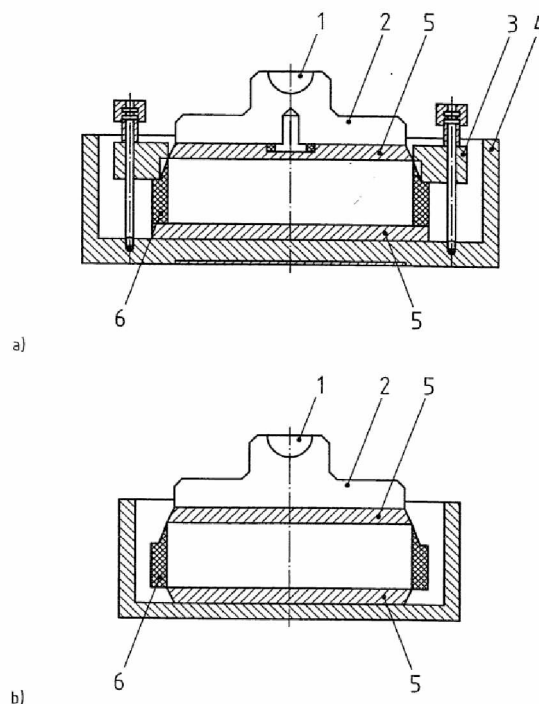
u_2	on	mitattu huokospaine
u_0		normaali huokospaine
$N_{\Delta u}$		empiirinen kerroin

Kerroin $N_{\Delta u}$ saa myös tapauskohtaisesti arvot noin väliltä 10–20. Kahden eri laskentatavan ideana on saada yhteneväiset tulokset suljetulle leikkauslujuudelle. Jos tulokset ovat yhtenäisiä, näin saatua suljettua leikkauslujuutta voidaan pitää kohtuullisen luotettavana. Jos taas leikkauslujuudet eroavat toisistaan, voidaan tätä pitää merkinä siitä, että tuloksiin olisi suhtauduttava varovaisemmin. (Mayne 2008)

4 Ödometri

4.1 Yleistä

Ödometrikokeella määritellään maalajien painumaominaisuuksia. Koekappale, joka on otettu St2-kairalla tai norjalaisella mäntäkairalla, asetetaan jäykkään ödometrirenkaaseen, joka estää sivusuuntaisen muodonmuutoksen ja sallii vain vertikaalista muodonmuutosta pystysuoran kuormituksen lisääntyessä. Kuvassa 13 on esitetty tyypillisten ödometrien poikkileikkaukset.



Key

- a) Fixed ring oedometer
- b) Floating ring oedometer
- 1 Seating
- 2 Loading cap
- 3 Lateral restraint for ring
- 4 Cell body
- 5 Porous plates
- 6 Oedometer ring

Kuva 13. Tyypillisten ödometrien rakenne. (CEN ISO/TS 17892-5:2004 2004)

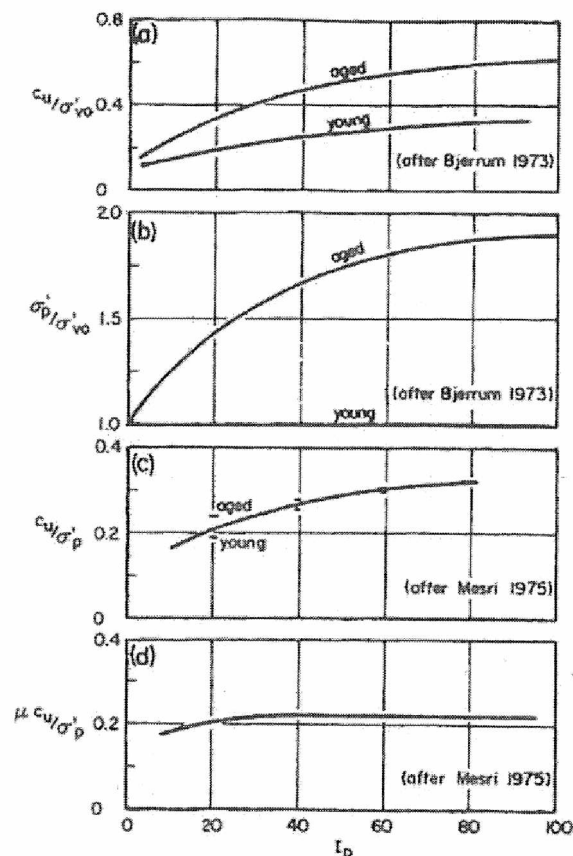
Koekappaleen asettamisen jälkeen sitä kuormitetaan portaittaisesti ja muodonmuutos mitataan. Ensimmäinen kuormitusporras tulee valita siten, että arvioitu esikonsolidaatiopaine saavutetaan aikaisintaan kolmannella kuormitusportaalle tai sen jälkeen. Esikonsolidaatiopainetta voidaan etukäteen arvioida esim. suljetun leikkauksisuuden avulla. Eurokoodissa esitetään kuormitusportaiksi 6, 12, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 ja 3200 kPa, mutta pehmeillä savilla yli 400kPa kuormitusportailta ei yleensä ole käytännön merkitystä. Useimmiten vähintään kolme kuormi-

tusporrasta esikonsolidaatiopaineen jälkeen on riittävää. (CEN ISO/TS 17892-5:2004 2004)

Normaali kuormitusaika on 24 tuntia, mutta aikaa voidaan lyhentää tai pidentää tilanteen mukaan. Esikonsolidaatiopainetta pienemmillä kuormitusportilla tulee välttää kuormitusaikaa, jonka aikana merkittävää sekundääripainumaa ehtii tapahtua. Yleensä kuormitusaika 15min... 1 tunti on riittävä pienemmillä kuormitusportilla. Kuormitusaika tulee valita siten, että maakerroksen ominaisuudet ja rakenteen aiheuttama kuormitustilanne tulevat parhaiten huomioon otetuksi. (CEN ISO/TS 17892-5:2004 2004)

4.2 Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen

Suljettu leikkauslujuus määritellään kokemusperäisesti esikonsolidaatiopaineesta. Kuvassa 14 on esitetty leikkauslujuuden ja plastisuusluvun suhde Bjerrumin kokoaamien tietojen pohjalta.



Kuva 14. Bjerrumin kokoamien tietojen perusteella määritetty leikkauslujuuden ja plastisuusluvun suhde. (Leroueil, ym. 1979)

Kuvasta seuraa että sekä yli- että normaalikonsolidoiduilla savilla redusoidun lujuuden s_{ur} (kuvassa μ_{Cu}) ja esikonsolidaatiojännityksen suhde voidaan kirjoittaa plastisuusluvusta riippumatta kuten kaavassa (6). (Ratahallintokeskus 2005):

$$s_u = \alpha * \sigma_p' \quad (6)$$

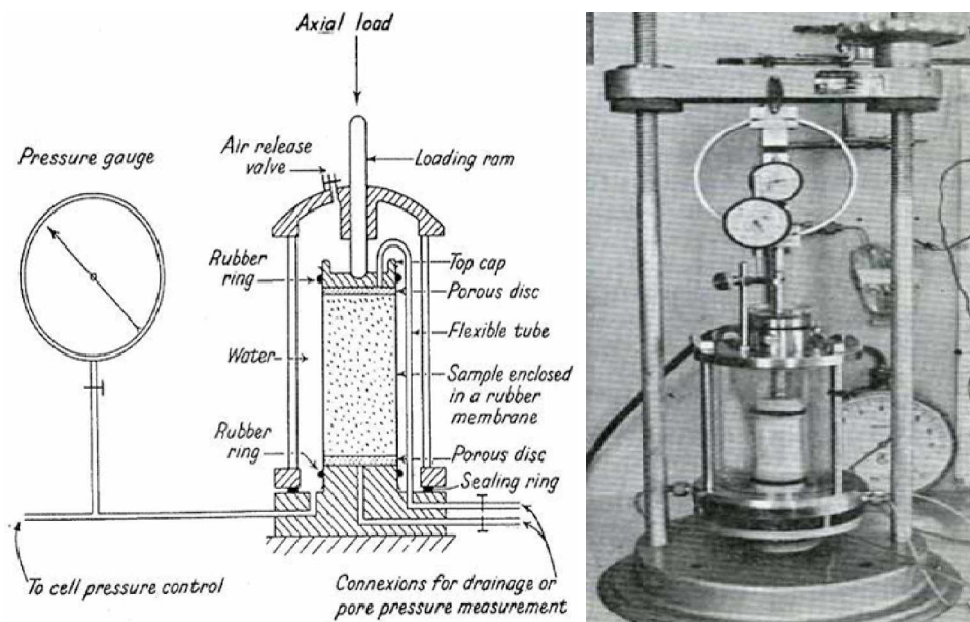
missä

α on 0,22.

5 Kolmiakiaaliko

5.1 Yleistä

Kolmiakiaaliko on yleisesti käytetty menetelmä geoteknisten parametrien määrittämiseen maalajeista, erityisesti hiekasta, siltistä ja savesta. Kuvassa 15 on esitetty tyypillinen kolmiakiaaliko laitteisto.



Kuva 15. Kolmiakiaaliko laitteisto.

Pääidea testissä on, että näytteeseen voidaan kohdistaa erisuuruiset jännitykset pysty- (σ_1) ja vaakasuunnille (σ_3).

Kolmiakiaalikoekokeesta on olemassa monta eri versiota. Savelle ja siltille tehdään pääasiassa suljettuja kolmiakiaalikoita:

CIUC	Isotrooppisesti konsolidoitu suljettu puristus
CAUC	Anisotrooppisesti konsolidoitu suljettu puristus
CAEC	Anisotrooppisesti konsolidoitu vetokoe (extension)

CADC Anisotrooppisesti konsolidoitu avoin puristus. Koe kestää viikkoja ja saatava lisähyöty suljettuun kokeeseen nähden on minimaalinen. Ei yleensä sovellu käytännön suunnitteluun.

Anisotrooppisen konsolidoidun suljetun puristuksen (CAUC) käyttö on suositeltavaa, koska alkujännitystila vastaa huomattavasti paremmin todellista in-situ jännitystä kuin isotrooppisella kokeella. (SFS-EN 1997-2, Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu 2007)

5.2 Tehokkaat lujuusparametrit

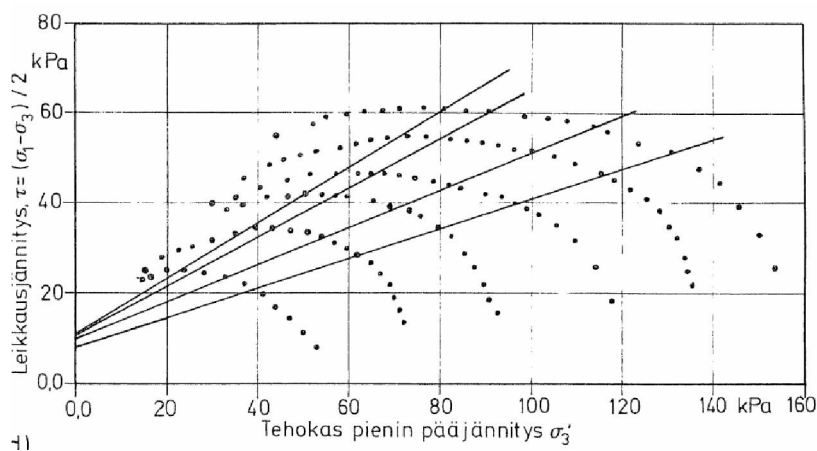
Tehokkaat leikkauslujuusparametrit voidaan laskea koetuloksista jännityspolkukuvajien avulla. Kuvassa 16 esitetystä jännityspolkukoordinaatistosta murtosuoran kaltevuus ja tehokkaan sellipaineen arvo nolla ($\sigma'_3=0$) vastaava leikkausjännityksen arvo määrittävät lujuusparametrit alla olevien kaavojen (7) ja (8) avulla. (Jambu 1970)

$$c' = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 + 2N}} \quad (7)$$

$$\tan \varphi' = \frac{N}{\sqrt{1 + 2N}} \quad (8)$$

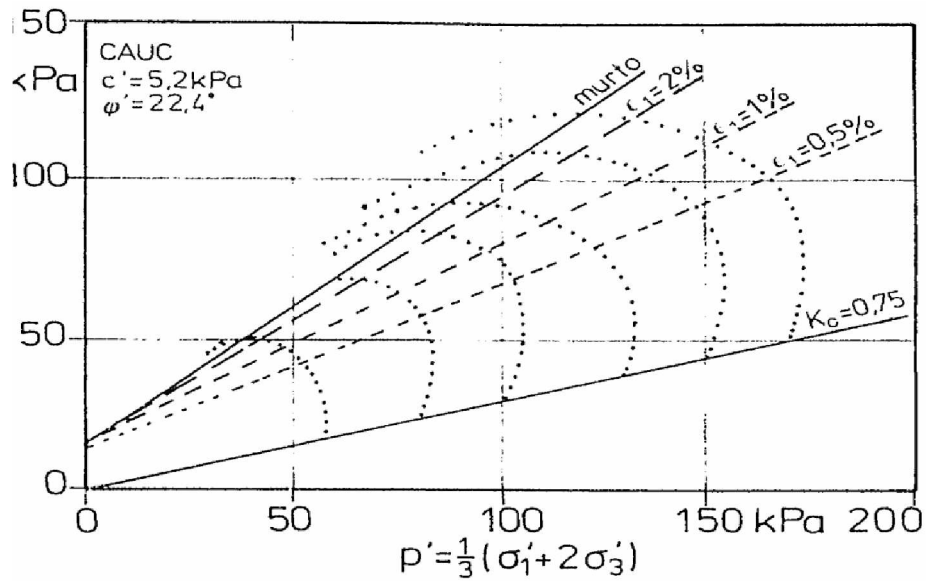
missä

c'	on	tehokas koheesio
τ_0		leikkausjännitys arvolla $\sigma'_3=0$
φ'		tehokas kitkakulma
N		murtosuoran kulmakerroin



Kuva 16. Jännityspolkukoordinaatisto. (Jambu 1970)

Kuvassa 17 on suljetun kolmiakselialikokeen tulokset esitetty jännityspolkuina p' - q koordinaatistossa. Tehokkaat leikkauslujuusparametrit lasketaan murtosuoraa kuvaavan suoran avulla kaavoista (9) ja (10). (Schofield ja Wroth 1968)



Kuva 17. Jännityspolku. Kriittisen tilan koordinaatisto. (Schofield ja Wroth 1968)

$$c' = \frac{q_0}{2} \left(\frac{3 + 2k_1}{3 - k_1} \right)^{-1/2} \quad (9)$$

$$\varphi' = \arcsin \frac{3k_1}{6 + k_1} \quad (10)$$

missä

c'	on	tehokas koheesio
φ'		tehokas kitkakulma
k_1		murtosuoran kaltevuuskulman tangentti
q_0		murtosuoran ja q -akselin leikkauspiste

5.3 Suljettu leikkauslujuus

Tehokkaista lujuusparametreista saadaan laskettua suljettu leikkauslujuus kaavan (11) osoittamalla tavalla. (Helenelund 1974)

$$s = c' + (\sigma - u_w) \tan \varphi' \quad (11)$$

missä

s	on	suljettu leikkauslujuus
c'		tehokas koheesio
σ		normaalijännitys
u_w		huokosvedenpaine
φ'		tehokas kitkakulma.

6 Kenttäkokeet

6.1 Perniö, pehmeä, normaalikonsolidoitunut savi

6.1.1 Yleistä

Syksyllä 2009 Ratahallintokeskus järjesti täysimittakaavaisen ratapenkereen sorrutuskokeen Perniössä. Alueelle tehtiin huolelliset pohjatutkimukset ennen sorrutuskoetta ja kokeen aikana alue oli instrumentoitu huolellisesti.



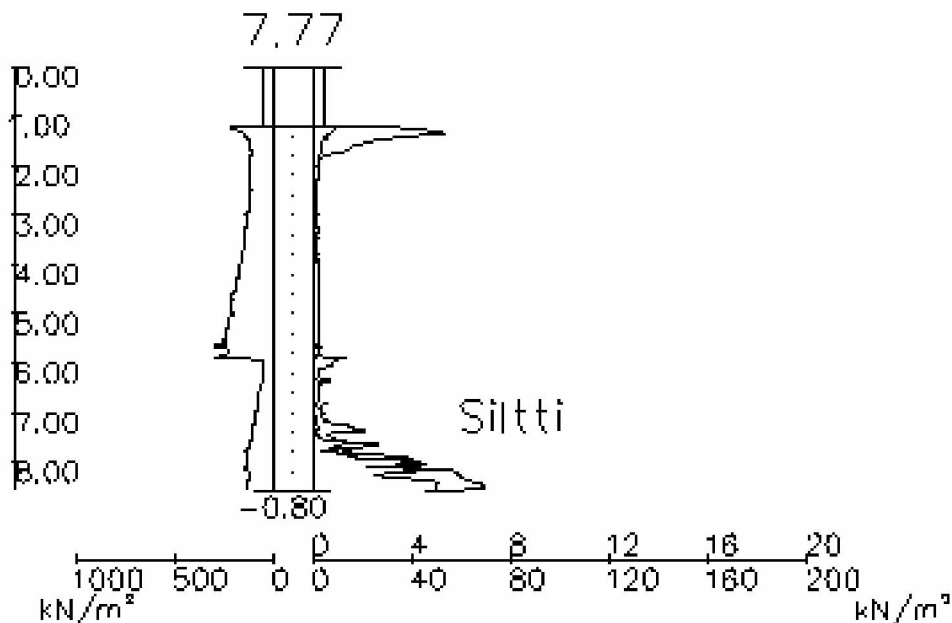
Kuva 18. Perniön sorrutuskoe. (Ratapenkereen stabiliteetti ja stabiliteetin parantaminen 2009)

6.1.2 Pohjatutkimukset

Alueelta tehtiin kuusi standardi siipikairausta sorrutuskoetta varten rakennettavan penkereen molemmin puolin. Alueella on noin 6-10 metrin paksuinen kerros pehmeää savea. Saven siipikairauslujuudet vaihtelivat välillä 6-20 kPa kerroksesta ja kairauksen paikasta riippuen.

Suurimmasta osasta alueen pohjatutkimuspisteistä tehtiin myös Kairausluokan 1 mukainen CPTU-kairaus herkällä kärjellä. Herkkä kärki mittaa kärkivastuksen 10 kPa tarkkuudella, joka leikkauslujuudeksi muutettuna vastaa alle 1 kPa tarkkuutta. CPTU-kairauksen kärkivastuksen voimakas vaihtelu ja huokospaineen selvä lasku osoittavat savessa olevat silttikerrostumat n. 6–6.5 metrin syvyydestä alaspäin. Silttikerrostumat on havainnollistettu kuvassa 19.

32



Kuva 19. CPTU-kairaus. Silttikerrostumat.

Alueelta otettiin myös useita näytteitä, joista tehtiin lukuisia luokituskoekteita, portaan CRS-koete ja useita ödometrikokeita. Saven tilavuuspaino vaihteli noin 15–17 kN/m³ näytteenotto paikasta ja syvyydestä riippuen ja vesipitoisuus vaihteli välillä noin 50–80 %.

6.1.3 Suljetut leikkauslujuudet

Siipikairauslujuudet yhdessä redusoitujen siipikairauslujuuksien, CPTU-kairauksista saatujen kärkivastuksen ja huokospaineen avulla laskettujen suljettujen leikkauslujuuksien ja esikonsolidaatiojännityksistä laskettujen suljettujen leikkauslujuuksien kanssa on esitetty pistekohtaisina vertailukäyrinä liitteessä 1.

Siipikairauslujuuksien redusoimiseen on käytetty kuvassa 5 esitettyä menetelmää ja vesipitoisuutta on käytetty juoksurajan likiarvona.

Saatujen kärkivastusten ja huokospaineiden avulla on laskettu suljetut leikkauslujuudet kappaleessa 3.2.2 esitetyillä tavoilla. Empiiriset kertoimet N_{kt} ja $N_{\Delta u}$ on valittu siten, että saadut suljetut leikkauslujuudet vastaisivat mahdollisimmat hyvin siipikairauksista saatuja leikkauslujuuksia koko alueella. Suljetun leikkauslujuuden laskemisessa kärkivastuksesta kertoimena N_{kt} on käytetty Kairausoppaan antamaa arvoa 16.3. Samaa arvoa 16.3 on käytetty myös kertoimen $N_{\Delta u}$ arvona laskettaessa suljettuja leikkauslujuuksia huokospaineen avulla.

Laboratoriokokeiden avulla saaduista esikonsolidaatiojännityksistä lasketuissa suljetuissa leikkauslujuuksina on kaavassa (5) käytetty kertoimen α arvona $\alpha=0,22$.

Pisteessä P10 on huokospaineen mittauksessa tapahtunut jonkinlainen virhe ja sen avulla saadut leikkauslujuudet eivät ole käyttökelpoisia.

Eri tutkimustavoilla saadut suljetut leikkauslujuudet korreloivat hyvin keskenään ja voidaankin todeta kaikkien soveltuvan, ainakin tässä tapauksessa, suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen.

6.2 Tampere-Seinäjoki, silttinen savi

6.2.1 Pohjatutkimukset

Ratahallintokeskuksen julkaisua *B15 Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet* varten Tampere-Seinäjoki radalta, kilometriväliltä 312+954-312+962 on tehty 9 siipikairausta. Siipikairaukset tehtiin kolmessa linjassa radan suuntaisesti siten, että jokaiseen linjaan (kv-15, kv-7.5 ja kv+3.5) tuli kolme siipikairausta. Siipikairauksista yksi suoritettiin standardin mukaisesti, yhdessä pyöritysnopeus oli normaalia hitaampi, ja yhdessä aina siiven kerrokseen painamisen jälkeen odotettiin tunti huokospaineen tasaantumista ennen siiven pyöritystä. Alueella on noin 10–12 metrin paksuinen kerros savea. Siipikairalla saadut leikkauslujuudet vaihtelivat välillä 10–20 kPa.

Tätä tutkimusta varten samalta kilometriväliltä, linjoilta kv-15 ja kv-7.5, tehtiin kuusi Kairausluokka 1 vaatimukset täyttävää CPTU-kairausta herkällä kärjellä huhtikuussa 2010. CPTU-kairausten kärkivastuksen voimakkaan vaihtelun ja huokospaineen selvä laskun perusteella on selvästi havaittavissa savessa olevat silttikerrostumat tason -4.5 yläpuolella.

Julkaisua B15 varten kyseiseltä kilometriväliltä otettiin näytteitä suoraan ratapenkeren alta sekä sen vierestä. Näytteille on tehty luokituskokeet perusominaisuuksien määrittämiseksi ja kattavat ödometri- ja kolmiaksiaalikoheet. Saven tilavuuspaino vaihtelee välillä 17–19 kN/m³ ja vesipitoisuus 25–50 %.

6.2.2 Suljetut leikkauslujuudet

Siipikairauslujuudet yhdessä CPTU-kairauksista saatujen kärkivastuksen ja huokospaineen avulla laskettujen suljettujen leikkauslujuuksien kanssa on esitetty pistekohdaisina vertailukäyrinä liitteessä 2.

Siipikairauslujuuksien redusoinnissa on käytetty kuvassa 5 esitettyä menetelmää ja vesipitoisuutta on käytetty juoksurajan likiarvona. Saven alhaisesta vesipitoisuudesta johtuen redusointikertoimeksi muodostuu 1.0.

Saatujen kärkivastusten ja huokospaineiden avulla on laskettu suljetut leikkauslujuudet kappaleessa 3.2.2 esitetyillä tavoilla. Empiiriset kertoimet N_{kt} ja $N_{\Delta u}$ on valittu siten, että saadut suljetut leikkauslujuudet vastaisivat mahdollisimmat hyvin siipikairauksista saatuja leikkauslujuuksia koko alueella. Suljetun leikkauslujuuden las-

kemisessä kärkivastuksesta kertoimena N_{kt} on käytetty arvoa 10. Laskettaessa suljettuja leikkauslujuuksia huokospaineen avulla, on kertoimena $N_{\Delta u}$ käytetty arvoa 15.

Liitteessä 2 sivulla 7 on esitetty Ratahallintokeskuksen julkaisua B15 varten tehdyistä tutkimuksista lasketut suljetut leikkauslujuudet.

Hitaat ja odotusajalla tehtyjen siipikairausten leikkauslujuudet ja CPTU-kairausten avulla saadut suljetut leikkauslujuudet vastaavat kaikissa pisteissä todella hyvin toisiaan. Standardi siipikairauksien ja CPTU-kairausten lujuuksissa on pientä vaihtelua, joka todennäköisesti johtuu siipikairan suorittamisen aiheuttamasta maaperän häiriintymisestä.

Siipikairaustulokset ja esikonsolidaatiojännityksen avulla määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot vastaavat penkereen vieressä melko hyvin toisiaan. Kolmiaksaalikoikeilla suljetun leikkauslujuuden hajonta on isompaa, riippuen näytteen ottopaikasta ja kokeen suoritustavasta.

6.3 Kotka–Kouvola, ylikonsolidoitunut savi

Tutkimuksen tarkoituksena oli tehdä Kotka-Kouvola kilometriväliltä 236+415-236+429 herkkiä CPTU-kairauksia samoista pisteistä, joista julkaisua B15 varten tehdyt siipikairaukset oli tehty. Paikanpäällä tämä osoittautui mahdottomaksi maaston vetisyyden takia ja CPTU-kairaukset tehtiin samalta kilometriltä kuin siipikairaukset, mutta toiselta puolen rataa. Valitettavasti toiselta puolen rataa tehdyt CPTU-kairaukset epäonnistuivat ja ne saatiin painettua vain n. 1,5 metrin syvyydelle maanpinnasta, kärkivastuksen antaessa arvoja, jotka olisivat vastanneet yli 100 kPa suljettuja leikkauslujuuksia. Syy kairausten epäonnistumiseen saattaa johtua siitä, että maaperä on toisella puolen rataa tyystin erilaista tai voimakkaasti ylikonsolidoitunut savi ei sovellu herkällä kärjellä tehtäviin CPTU-kairauksiin.

Liitteessä 3 on esitetty Ratahallintokeskuksen julkaisua B15 varten tehdyistä tutkimuksista lasketut suljetut leikkauslujuudet.

6.4 Turku–Uusikaupunki, lihava savi

6.4.1 Pohjatutkimukset

Turku-Uusikaupunki rataväliltä julkaisua B15 varten on tehty kilometriltä 222+600 kolmesta pisteestä kolme erilaista siipikairausta. Kuhunkin pisteeseen on tehty siipikairaukset standardin mukaisesti, hitaalla pyöritysnopeudella ja leveällä siivellä. Kairauspisteet sijaitsevat vasemmalla puolen rataa etäisyydellä kv -3m, -9m ja -20m. Savikerroksen paksuus alueella on n. 16 m ja leikkauslujuus yläosassa noin 6-15 kPa. Saven leikkauslujuus pysyy suhteellisen vakiona n. 10 m syvyydelle asti, jonka jälkeen saven leikkauslujuus kasvaa huomattavasti.

Kaikista kolmesta pisteestä tätä tutkimusta varten tehtiin Kairausluokan 1 mukaiset CPTU-kairaukset herkällä kärjellä huhtikuussa 2010. Kärkivastuksesta ja huokospaineesta puuttuvat siltille ominaiset piikit ja tämä vahvistaa saven tasalaatuisuuden.

Julkaisua B15 varten kyseiseltä kilometriväliltä otettiin näytteitä suoraan ratapenkeen alta sekä sen vierestä. Näytteille on tehty luokituskokeet perusominaisuuksien määrittämiseksi ja kattavat ödometri- ja kolmiaksiaalikoheet. Saven tilavuuspaino vaihtelee välillä 14–16 kN/m³ ja vesipitoisuus 65–100%.

6.4.2 Suljetut leikkauslujuudet

Siipikairauslujuudet yhdessä redusoitujen siipikairauslujuuksien, CPTU-kairauksista saatujen kärkivastuksen ja huokospaineen avulla laskettujen suljettujen leikkauslujuuksien ja esikonsolidaatiojännityksistä laskettujen suljettujen leikkauslujuuksien kanssa on esitetty pistekohtaisina vertailukäyriä liitteessä 4.

Redusoitu leikkauslujuus on saatu redusoimalla standardi siipikairauksella saatu siipikairauslujuus Tielaitoksen ohjeissa esitettyllä menemällä (Kuva 6) hienousluvun perusteella.

CPTU-kairauksista kärkivastuksen ja huokospaineen avulla laskettavia suljettuja leikkauslujuuksia varten tarvittavat empiiriset kertoimet N_{kt} ja $N_{\Delta u}$ on taas pyritty valitsemaan niin että eri tutkimustavoilla saadut suljetut leikkauslujuudet vastaisivat mahdollisimman hyvin toisiaan. Suljetun leikkauslujuuden laskemisessa kärkivastuksesta kertoimena N_{kt} on käytetty arvoa 15. Samaa arvoa 15 on käytetty myös kertoimen $N_{\Delta u}$ arvona laskettaessa suljettuja leikkauslujuuksia huokospaineen avulla.

CRS-kokeesta saadun esikonsolidaatiojännityksen perusteella laskettu suljettu leikkauslujuus on määritetty yhtälöllä (5) käyttäen kertoimena $\alpha=0,22$.

Kaikilla kokeilla saadut suljetut leikkauslujuudet vastaavat hyvin toisiaan, ainoastaan linjalla kv-20m kärkivastuksen avulla saatu leikkauslujuus on selvästi heikompi kuin muilla tavoilla saatu.

Kohteen muista pisteistä tehdyistä tutkimuksista saadut suljetut leikkauslujuudet on esitetty liitteessä 4 sivulla 4. Kuten muissakin kohteissa, aktiivipuolen kolmiakselikokeilla on saatu suurimmat suljetut leikkauslujuudet ja passiivipuolen kokeilla on saatu lähimpänä siipikairauslujuuksia olevat arvot.

6.5 Valtatie 9, Turku-Lieto

6.5.1 Pohjatutkimukset

Tiehallinnon Turun tiepiirin urakkaa Vt9, Turku-Lieto varten otettiin 14 näytepistettä noin 7 kilometrin matkalta. Kaikista näytteistä tehtiin kartio- ja indeksikoheet sekä vähintään kolmelta syvyydeltä tehtiin CRS-koe painumaominaisuuksien määrittämiseksi. Indeksikoheiden perusteella alueen savi on tilavuuspainoltaan noin 15–17 kN/m³ ja vesipitoisuus vaihtelee välillä 40–90 % paikasta riippuen.

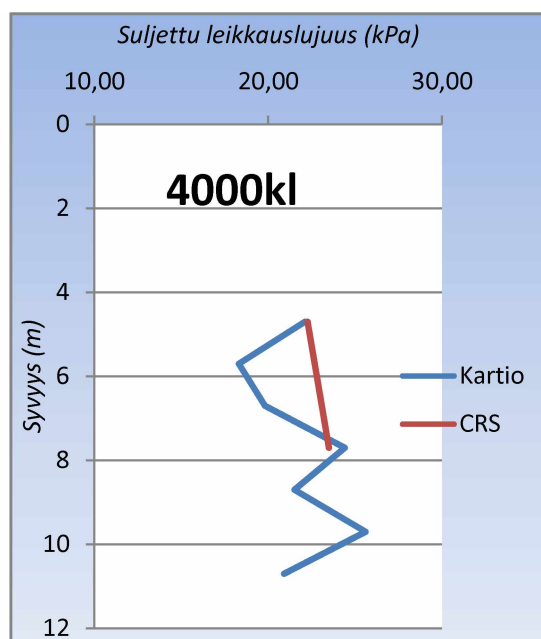
6.5.2 Suljetut leikkauslujuudet

Kaikista 14 näytepisteestä tehtiin kartiokokeet, joilla saadut suljetut leikkauslujuudet vaihtelivat noin välillä 19–30 kPa, näytteenotto paikasta ja syvyydestä riippuen. CRS-kokeiden esikonsolidaatiojännityksistä lasketut suljetut leikkauslujuudet korreloivat

heikosti kartiokokeiden perusteella määritettyihin suljettuihin leikkauslujuuksiin verrattuna. Näytteenotto paikalla ei suljetun leikkauslujuuden vaihtelun kannalta ollut merkitystä. Sekä penkan alta, että vierestä otettujen näytteiden määritetyt suljetut leikkauslujuudet vaihtelivat epäsäännömukaisesti toisiinsa verrattuna.

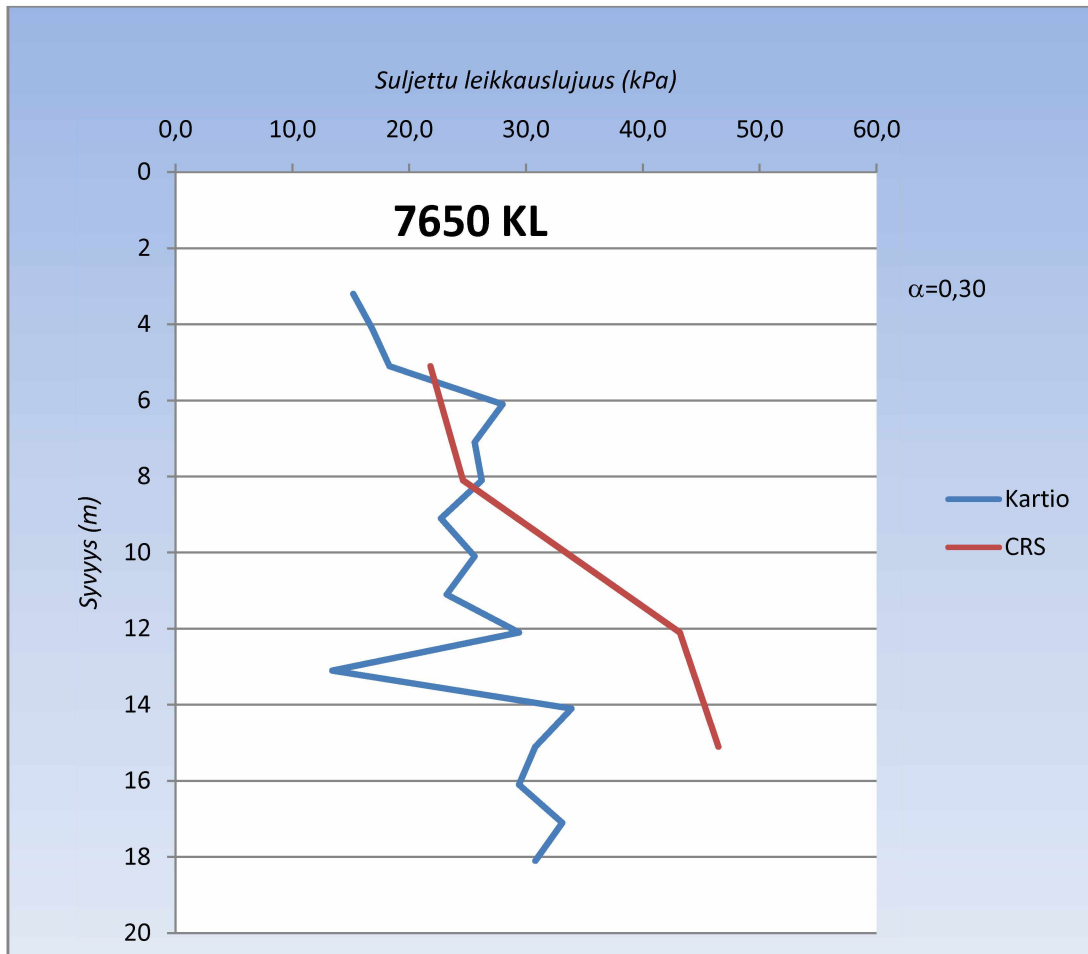
CRS-kokeesta saadun esikonsolidaatiojännityksen perusteella lasketut suljetut leikkauslujuudet on määritetty yhtälöllä (5) käyttäen kertoimena aluksi $\alpha=0,22$. Tällä kertoimella saadut leikkauslujuudet olivat järjestään noin 30% pienempiä kuin vastaavilta kohdilta ja syvyyksiltä saadut kartiokokeilla määritellyt leikkauslujuudet. Kertoimella $\alpha=0,30$ päästään esikonsolidaatiojännityksistä määritellyillä suljetuilla leikkauslujuuksilla useimmissa pisteissä 5-10% sisään kartiokokeilla saaduista leikkauslujuuksista, mutta vaihtelu on silti epäsäännöllistä ja tarkan suljetun leikkauslujuuden arvioiminen vaikeaa.

Neljästätoista pisteestä ainoastaan yhdestä, paalulta 4000 keskilinjalta otetusta näytteestä saatiin määritettyä toisiaan hyvin vastaavat suljetut leikkauslujuudet. Tässäkin pisteessä CRS-koe oli tehty vain kahdelta syvyydeltä, joten aineisto ei ole riittävän laaja korrelaation toteamiseksi. Paaluluvun 4000 keskilinjalta määritetyt suljetut leikkauslujuudet on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Paaluluku 4000kl. Suljetut leikkauslujuudet.

Kuvassa 21 on esimerkki paaluluvulta 7650, kartiokokeella saadusta ja esikonsolidaatiojännityksen perusteella lasketun suljetun leikkauslujuuden eroista. Myös muissa tutkimuspisteissä leikkauslujuuserojen vaihtelu oli vastaavanlaista.



Kuva 21. Kartiokoe vs. CRS. Suljetut leikkauslujuudet.

7 Yhteenveto ja päätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida eri tavoin määriteltyjen suljettujen leikkauslujuuksien soveltuvuutta geotekniseen suunnitteluun ja mitoitukseen. Herkällä kärjellä tehdyistä CPTU-kairauksista ja ödometrikokeella määritetystä esikonsolidaatiojännityksestä saatuja suljettuja leikkauslujuuksia vertailtiin siipikairauksella saatuihin. Perinteisesti stabiliteettilaskentaa varten tarvittava suljettu leikkauslujuus on saatu siipikairaustuloksista ja laboratoriokokeista.

CPTU-kairausta on käytetty lähinnä maalajirajojen määrittämiseen ja maaparametrien alustavaan arviointiin. Suljetun leikkauslujuuden määrittämiseksi tarpeeksi tarkkaan karkivastuksen mittaamiseen pystyvät CPTU-kärjet ovat maksaneet paljon ja ne ovat olleet rikkoutumisherkkiä. Tilanne on kuitenkin viime vuosina muuttunut tekniikan kehittymisen myötä. Vaikka tätä tutkimusta tehtäessä Suomesta löytyi vain tasan yksi tällainen kärki, hinnat ovat laskeneet ja kärkien rikkoutumisen estämiseksi on kehitetty erilaisia tekniikoita.

Siipikairauksien osittainen korvaaminen CPTU-kairauksilla stabiliteettilaskentaa varten tehtävissä pohjatutkimuksissa sekä helpottaisi, että nopeuttaisi pohjatutkimustöitä. Varsinkin rataympäristössä, jossa joudutaan usein työskentelemään lyhyillä rataliikennekatkoilla, CPTU-kairauksen suorituksen nopeus verrattuna siipikairaukseen tarjoaisi huomattavan edun. Lyhyellä rataliikennekatkolla saataisiin tehtyä enemmän tutkimuksia ja työhön käytettävä kokonaisaika lyhenisi.

CPTU-kairauksen lisätuihin voidaan lukea siitä saatava jatkuva leikkauslujuuden kuvaaja. Tällöin eivät paikalliset ohuet heikkouskerroksetkaan jää huomaamatta toisin kuin siipikairauksessa saattaa tapahtua. Kaikkia siipikairauksia ei leikkauslujuuden määrittämisessä voida korvata CPTU-kairauksilla, koska siipikairauksia tarvitaan referenssikairauksiksi sopivien empiiristen kertoimien määrittämiseksi.

Herkällä kärjellä saadut karkivastuksen ja huokospaineen avulla lasketut suljetut leikkauslujuudet vastaavat tutkimusaineiston perusteella hyvin siipikairauksen ja ödometrikokeiden avulla saatuja suljettuja leikkauslujuuksia Perniön, Tampere-Seinäjoen ja Turku-Uudenkaupungin kohteissa.

Siipikairauksien osittainen korvaaminen herkällä kärjellä tehtävillä CPTU-kairauksilla pehmeikkötutkimuksissa on tutkimuksen pohjalta perusteltua. Menetelmä soveltuu hyvin ainakin pehmeän saven suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen.

Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen CPTU-kairauksien avulla turpeesta ja siltistä ei tässä yhteydessä tutkittu ja suljetun leikkauslujuuden määrittäminen CPTU-kairauksella voimakkaasti ylikonsolidoituneesta savesta epäonnistui. Nämä asiat vaativat lisätutkimusta.

Lähdeluettelo

CEN ISO/TS 17892-5:2004. "Geotechnical Investigations and testing. Laboratory testing of soil. Part 5: Incremental loading oedometer test." *Technical Specification*. 2004.

Chandler, R.J. "The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane." Teoksessa *Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and laboratory Studies*, toimittanut Adrian F Richards. Baltimore: STP 1014, ASTM, 1988.
Helenelund, K.V. *Maarakennusmekaniikka*. 4. uusittu painos. Otaniemi: Teknillisen Korkeakoulun Ylioppilaskunta, 1974.

Jambu, Nilmar. *Grundlag i geoteknikk*. Trondheim, 1970.

Korhonen, K-H, ja A Leskelä. *Siipikaira pohjatutkimusvälineenä*. Vuosik. Sarja III. VTT, Tiedotus, 1970.

La Rochelle, P, M Roy, ja F Tavernas. "Field Measurements of Cohesion in Champlain Clays." *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Moscow, 1973. 229-236.

Larsson, P, ja H Åhnberg. *Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök*. Linköping: SGI, 2003.
Leroueil, La Rochelle, Roy, Tavernas, ja Trak. "A new approach to the stability analysis of embankments on sensitive clays." *32nd Canadian Geotechnical Conference*. Quebec, 1979.

Lojander, M, E Slunga, ja E Rauhala. "Undrained Shear Strength of Clay and Silt." *XI ECSMFE Copenhagen, vol. 1*. Copenhagen: Danish Geotechnical society, 1990.
Mayne, Paul W. "11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Geotechnics in Maritime Engineering." *Piezocone profiling of clays for maritime site investigations*. Gdansk: ISSMGE, 2008.

Meigh, A.C. *Cone penetration testing, methods and interpretation*. Lontoo: CITIA, 1987.

Ratahallintokeskus. *Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet*. Helsinki: Ratahallintokeskuksen julkaisuja A10 ja B15, 2005.

Ratapenkereen stabiliteetti ja stabiliteetin parantaminen. 21. 10 2009.
<http://www.rhk.fi/hankkeet/tutkimus/penkansorutus/> (haettu 2. 5 2010).

Roy, M, ja A Leblanc. "Factors Affecting the Measurements and Interpretation of the Vane Strength in Soft Sensitive Clays." Teoksessa *Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and laboratory Studies*, toimittanut Adrian F Richards. Abtlimore: STP 1014, ASTM, 1988.

Schofield, A, ja P Wroth. *Critical state soil mechanics*. London, 1968.

SFS-EN 1997-2, Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Vuosik. 2: Pohjatutkimus ja koestus. Suomen Standardoimisliitto, 2007.

SGI. *CPT-sondering, utrustning - utförande - utvärdering*. SGI Information 15, Linköping: SGI, 1993.

SGY. *Kairausopas II*. Helsinki: Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y., 1995.

SGY. *Kairausopas VI*. Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y., 2001.

Slunga, E. "Maa- ja Kallioluiskien vakavuus." Teoksessa *RIL157-II Geomekaniikka II*, 433. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y., 1990.

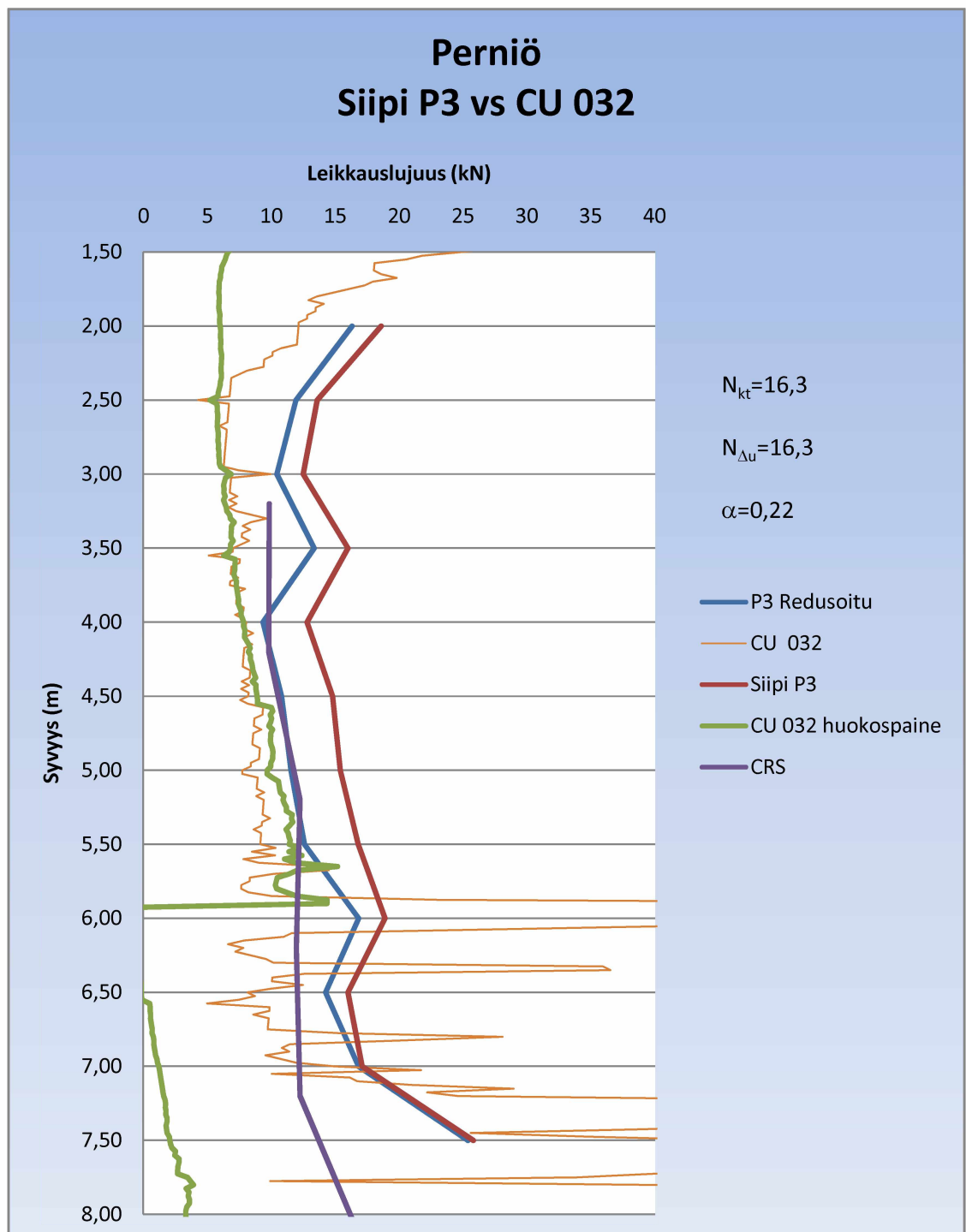
Tavenas, F, ja S Leroueil. *State-of-the-art on laboratory and in-situ stress-strain-time behaviour on soft clays*. Mexico City: Proc.Intl. Symp. on Geotechnical Engrg. of Soft Soils, 1987.

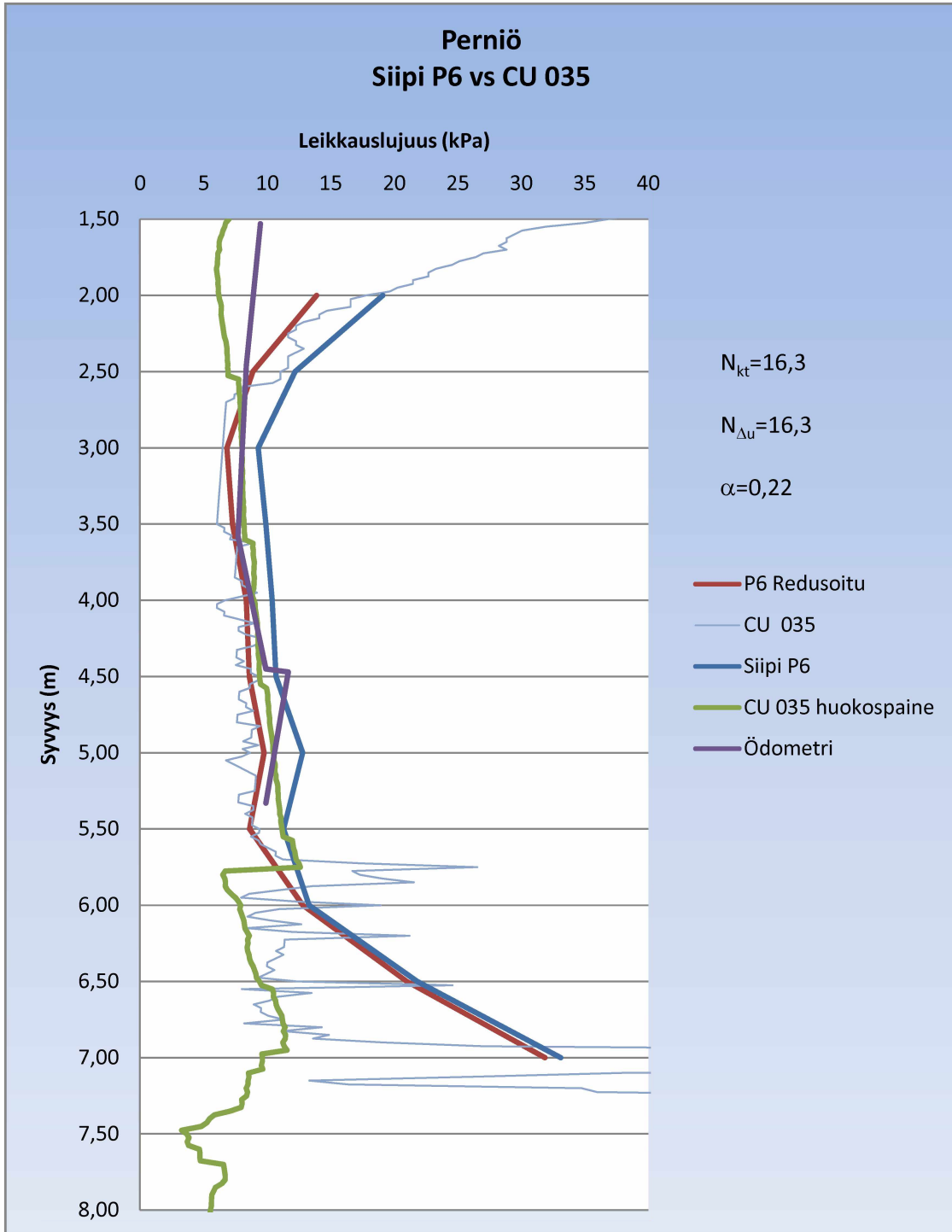
Torstensson, B.A. "Time-Dependent Effects in the Field Vane Test." *International Symposium on Soft Clay*. Bangkok, 1977. 387-397.

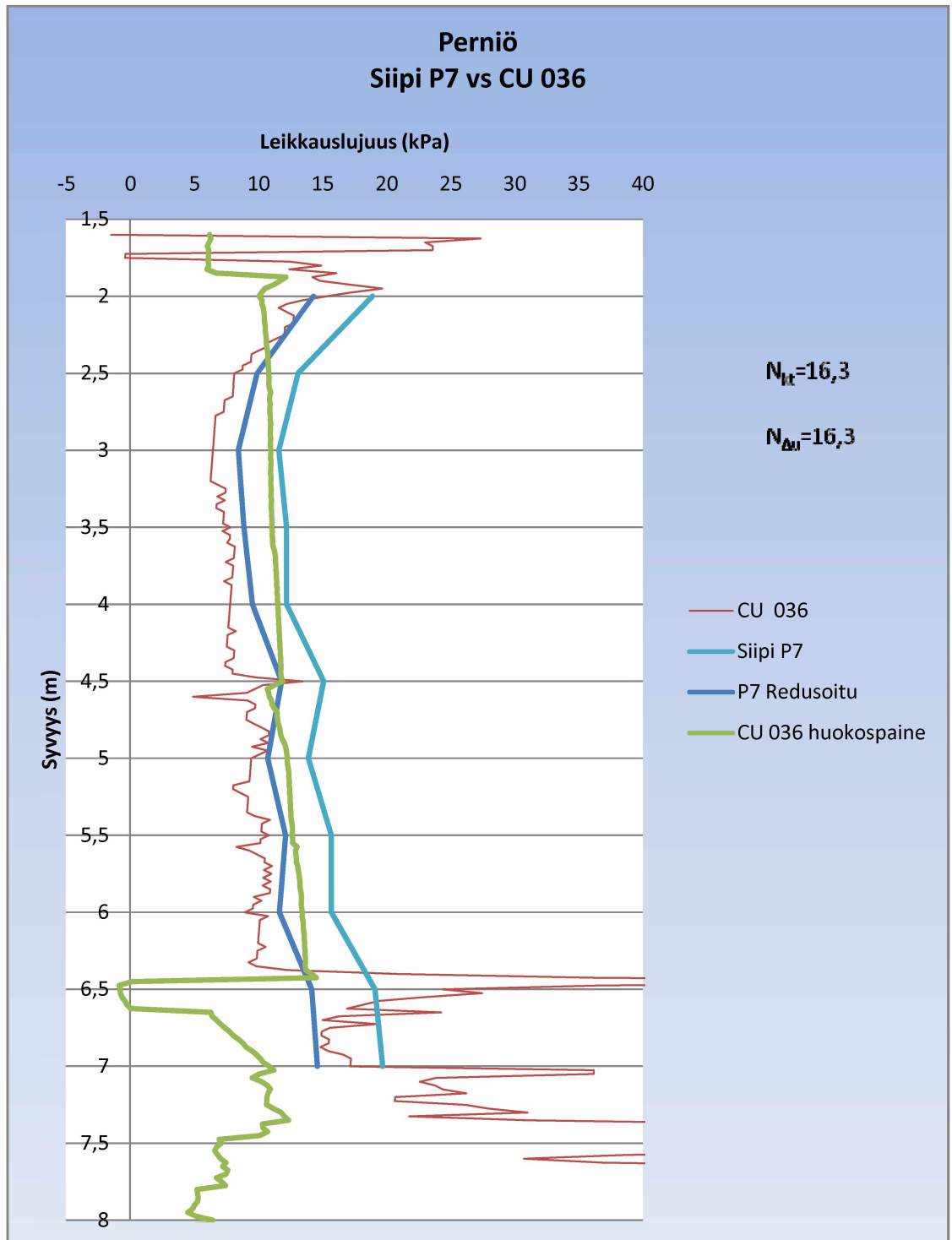
Weisel, C.E. "Some Factors Influencing In Situ Vane Test Result." *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol 1.2. Moscow, 1973. 475-479.

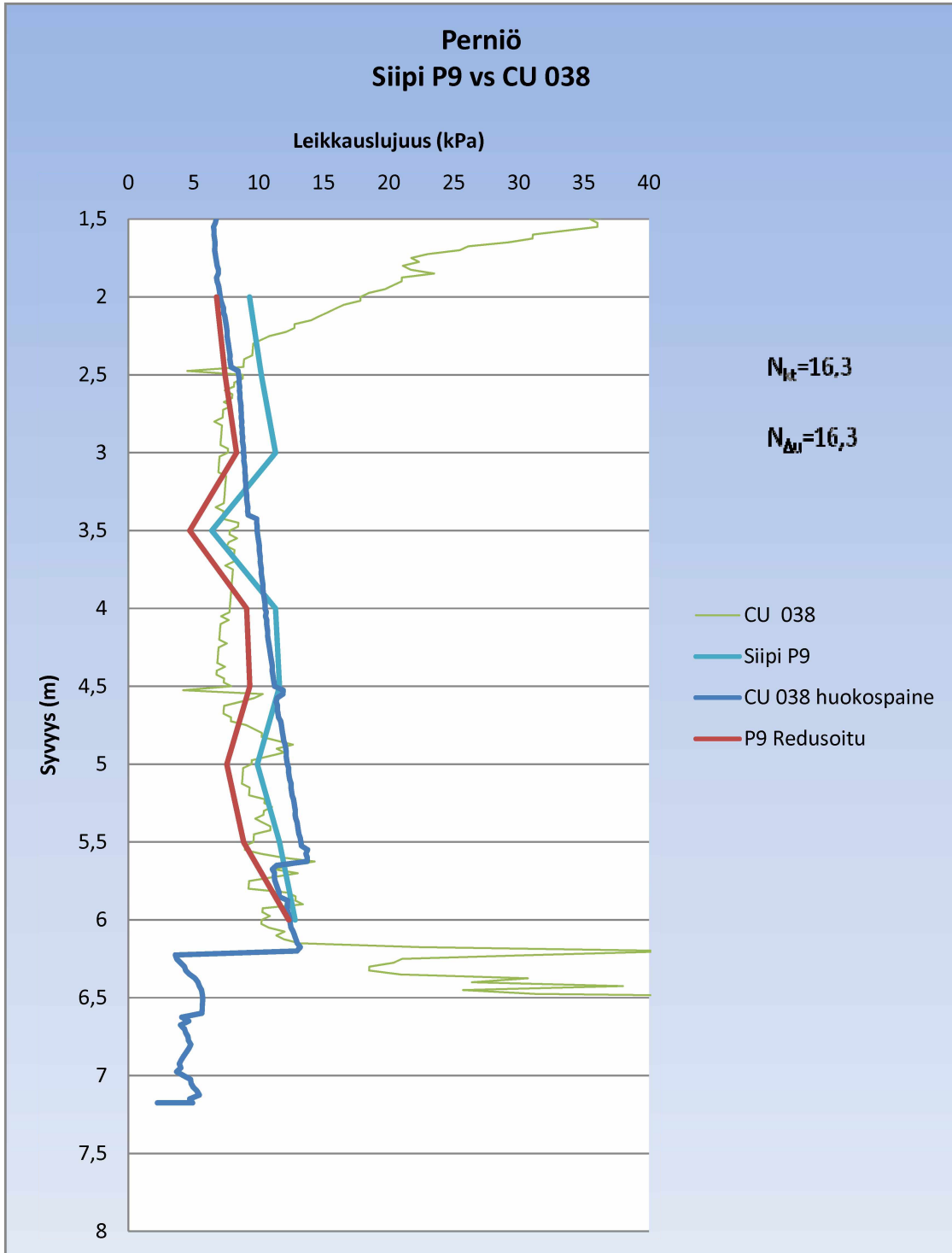
Young, A, B McClland, ja G Quiros. "In-Situ Vane Shear Testing at Sea." Teoksessa *Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies*, toimittanut Adrian F Richards. Baltimore: STP 1014, ASTM, 1988.

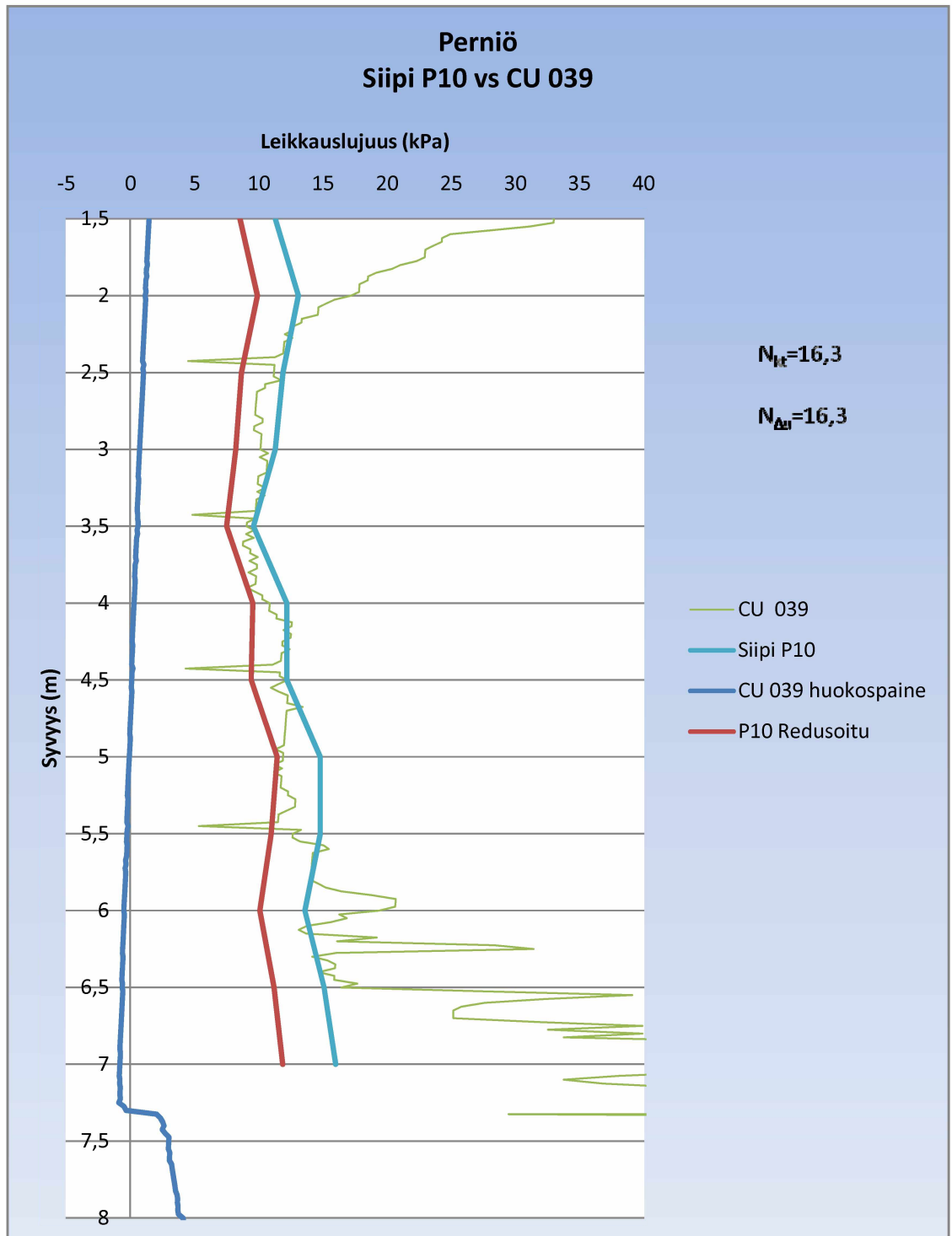
Perniön suljetut leikkauslujuudet

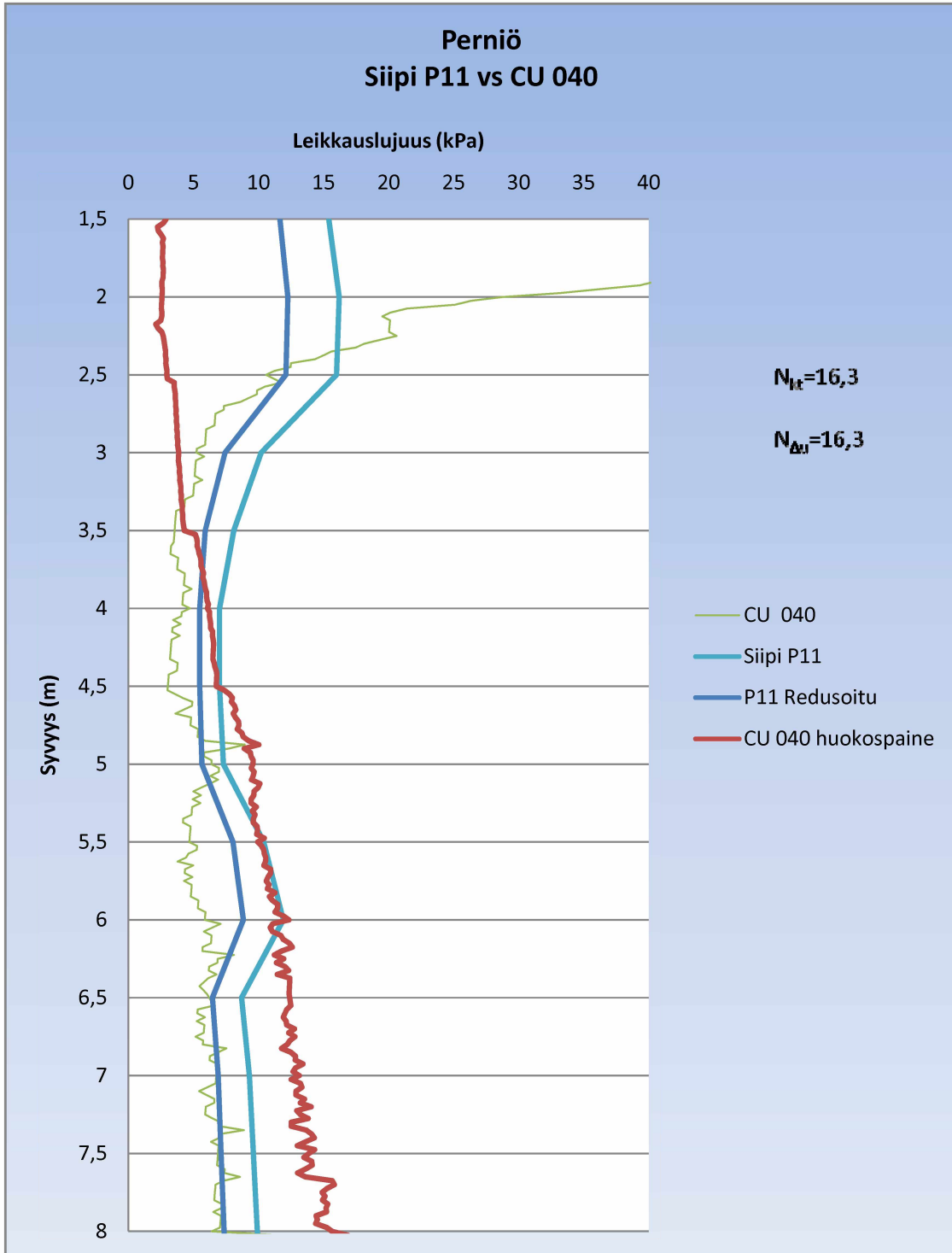




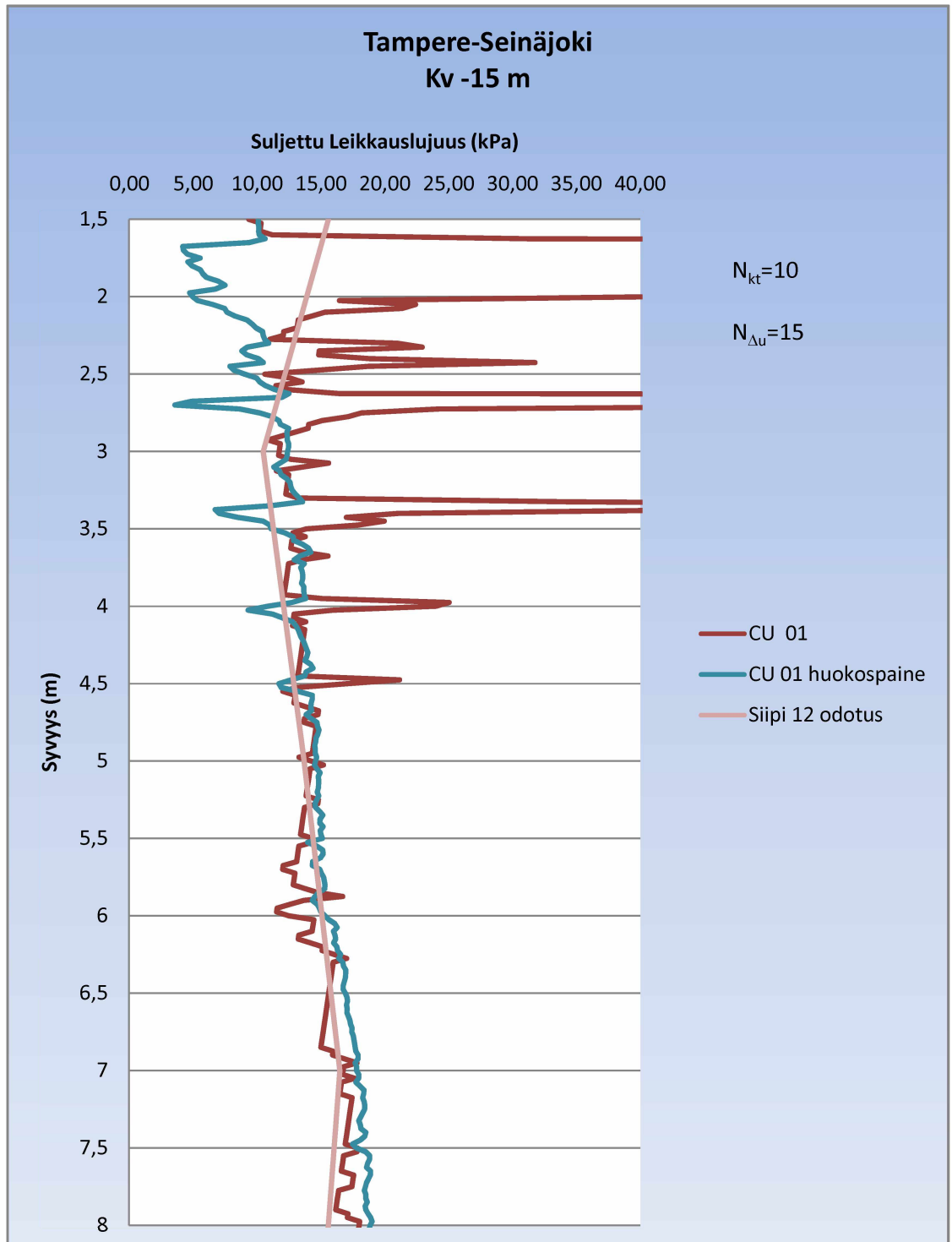


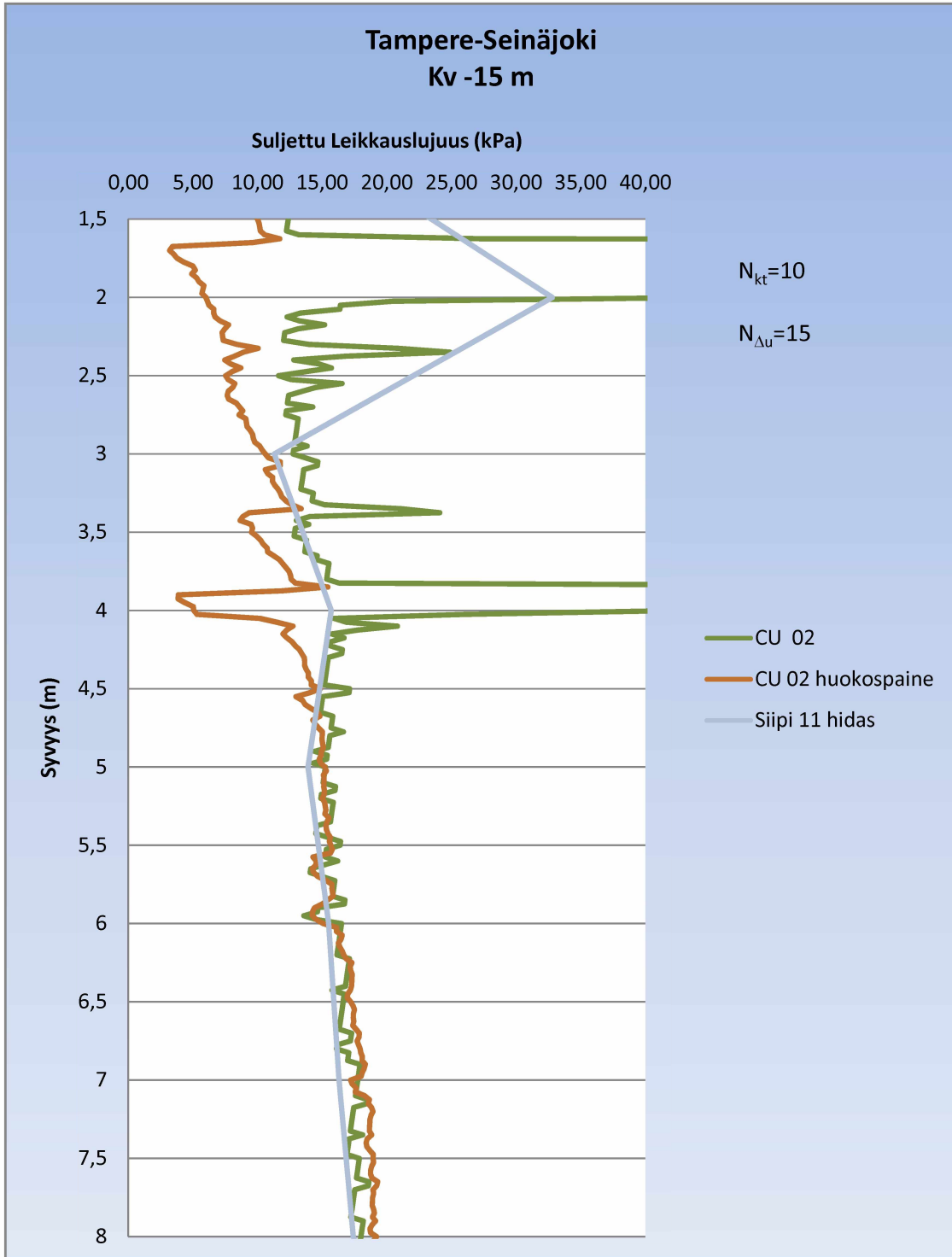


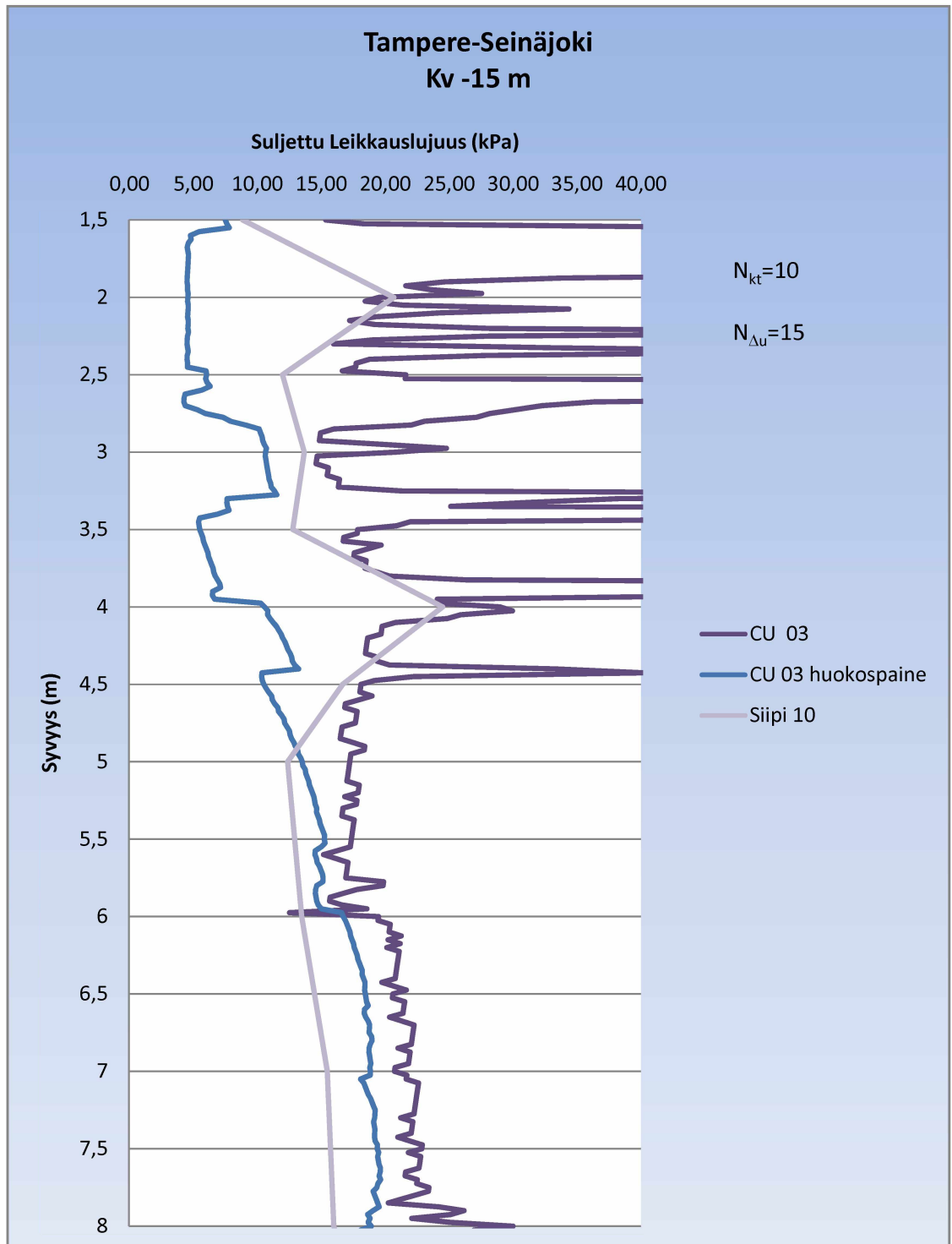


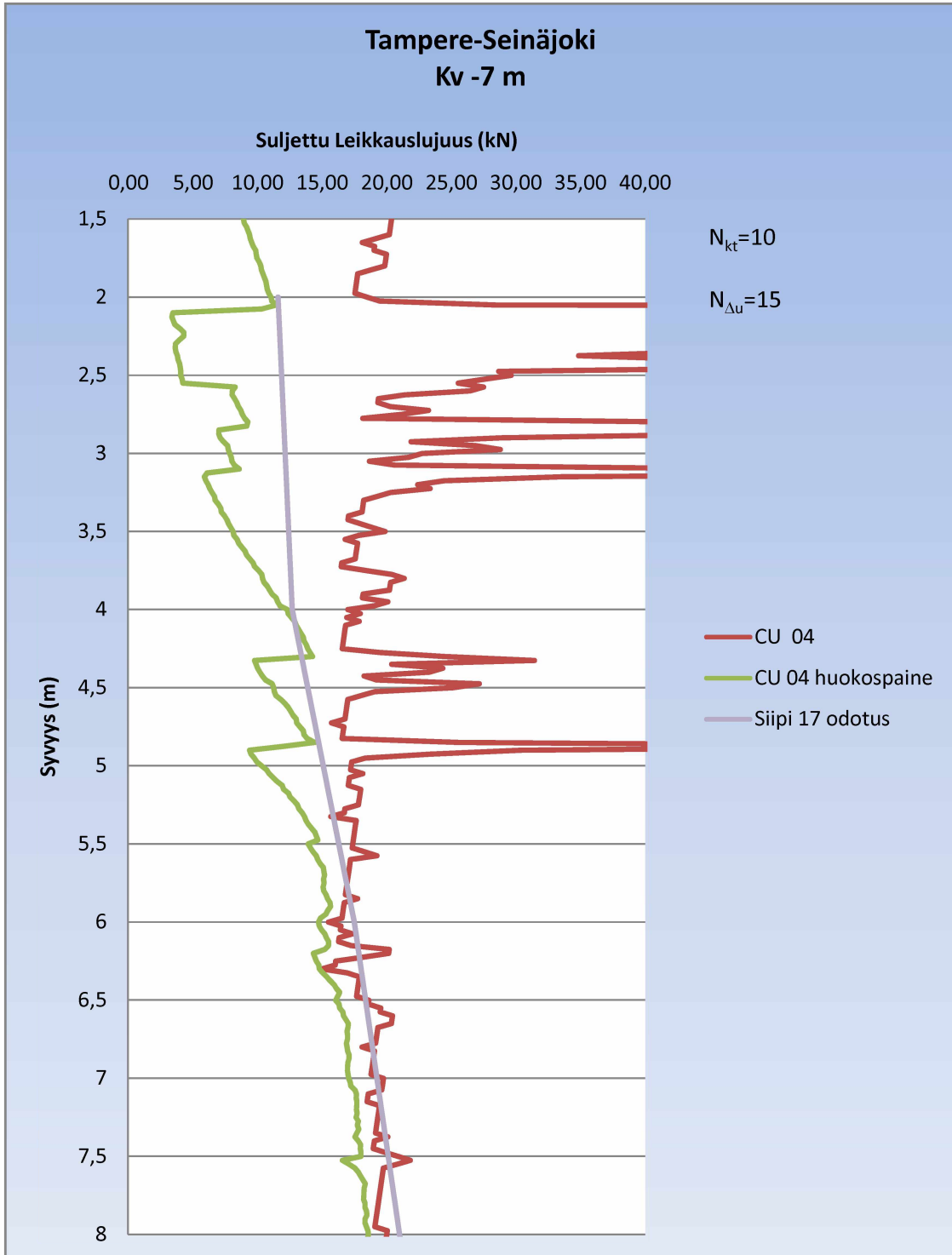


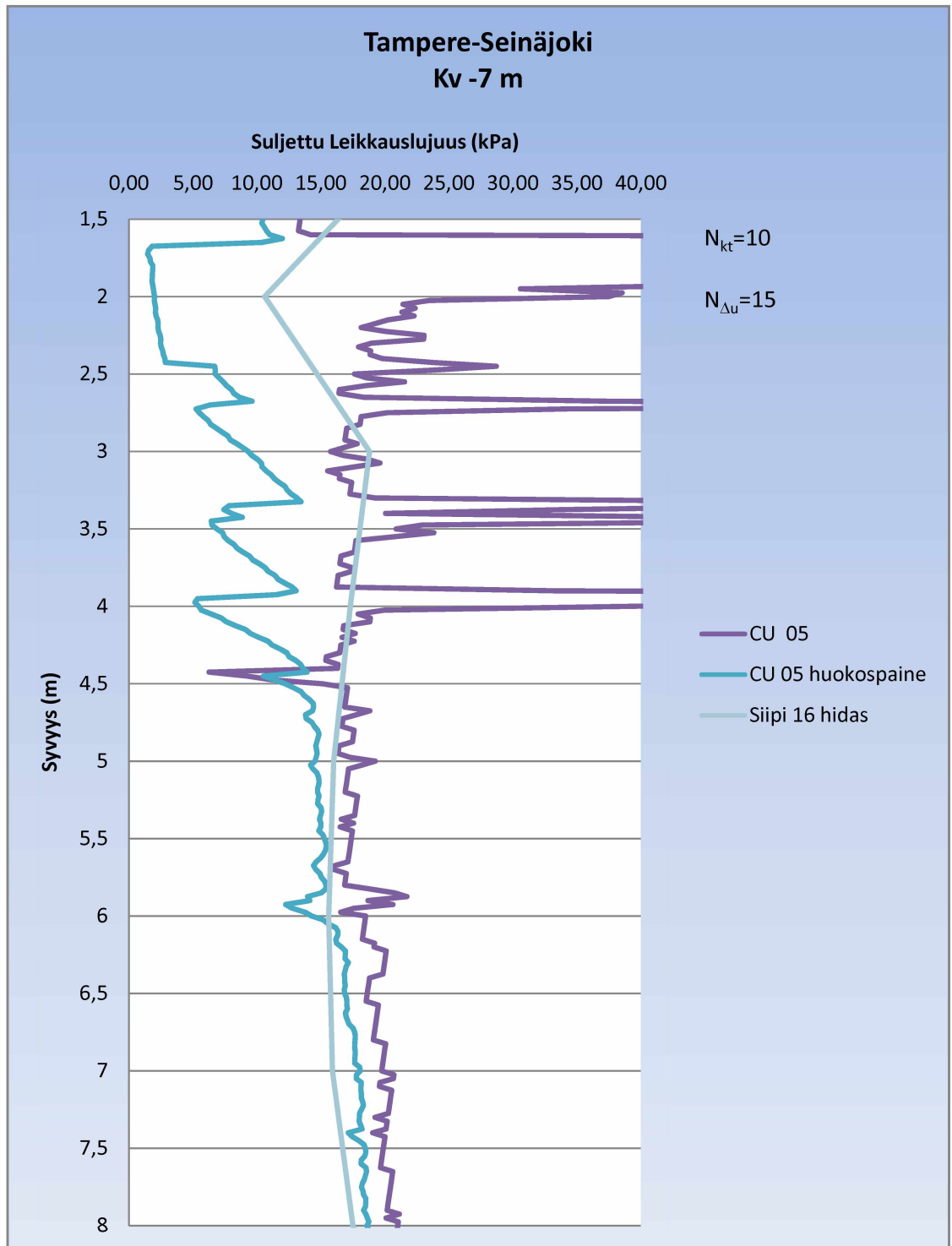
Tampere–Seinäjoki suljetut leikkauslujuudet

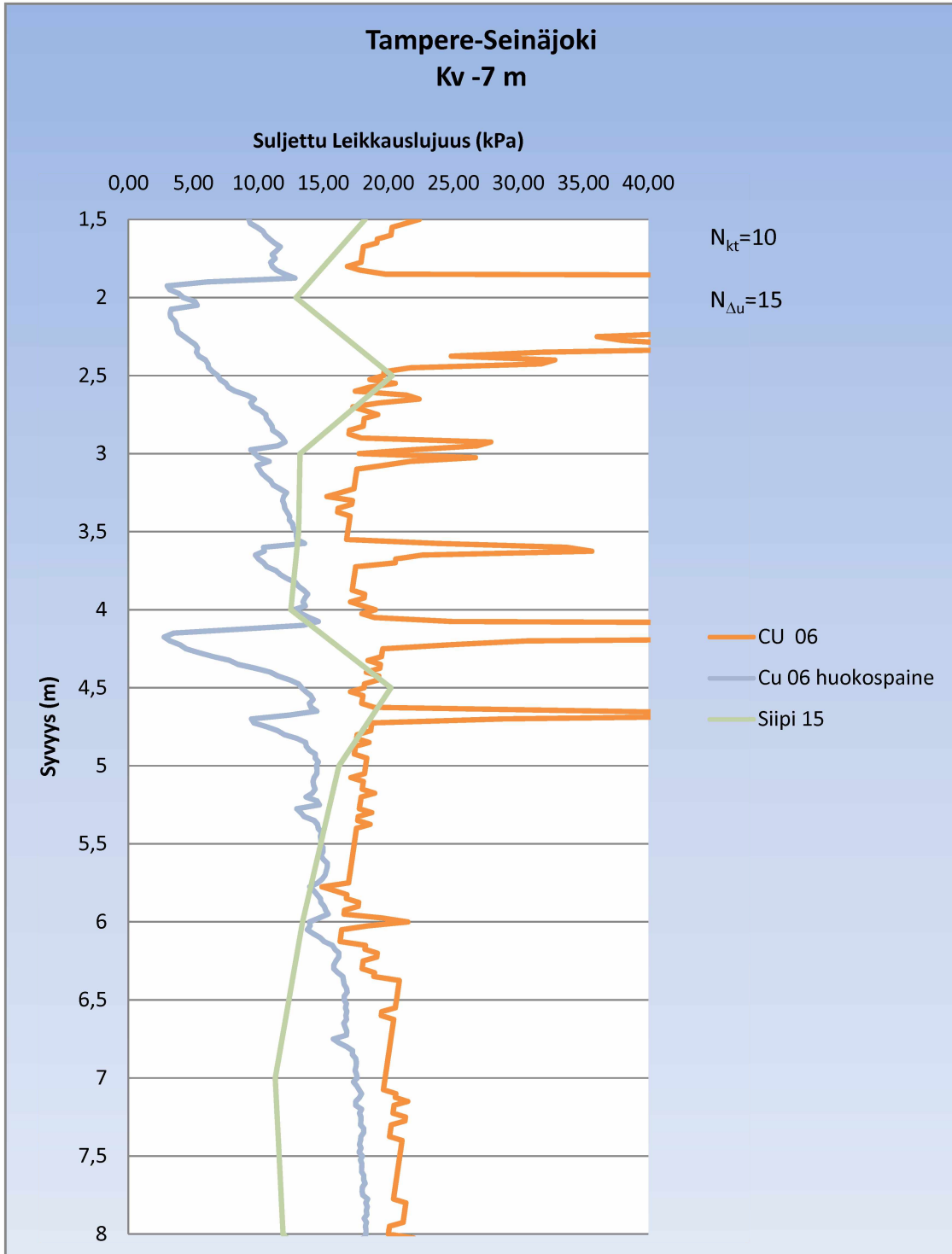


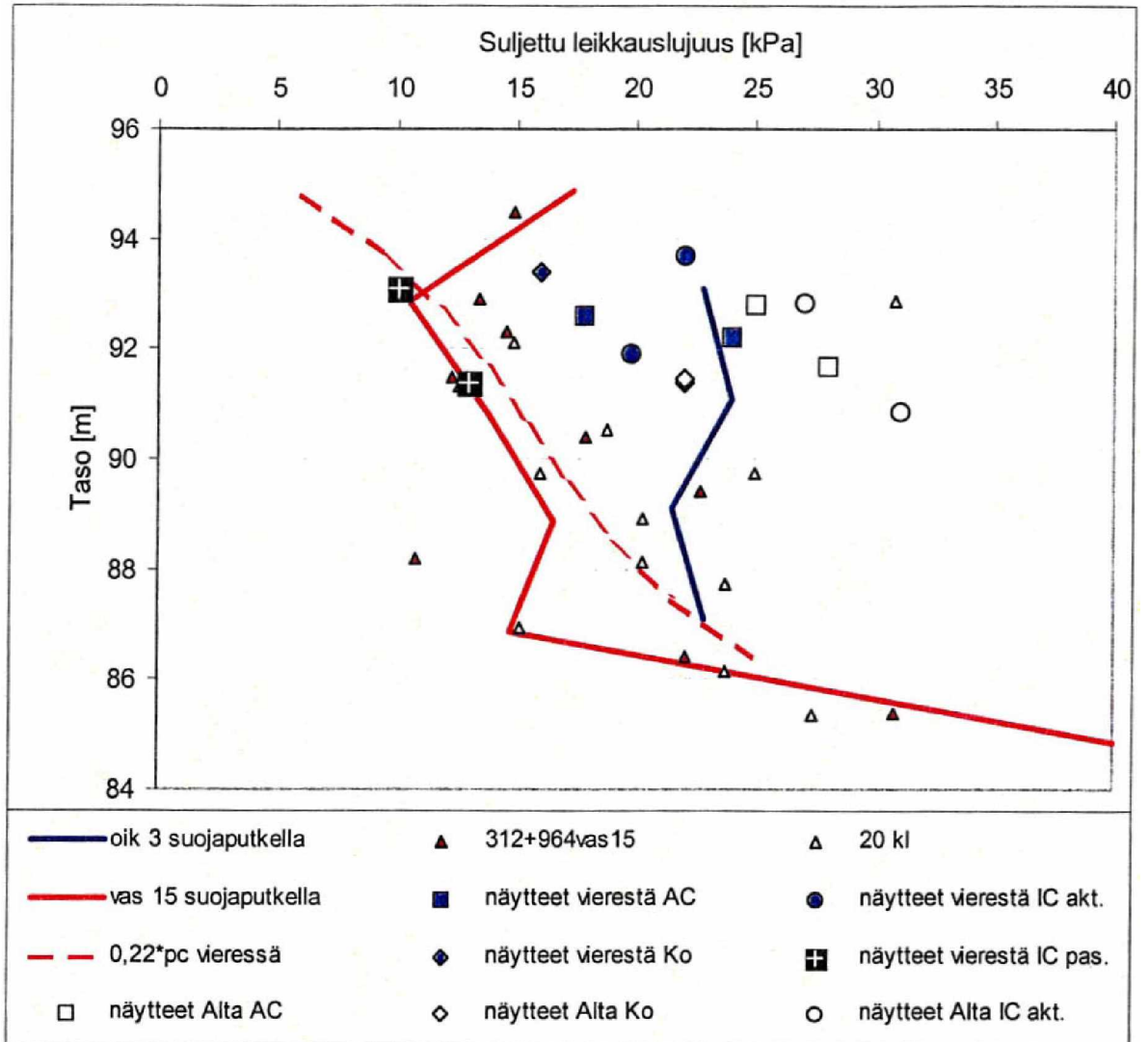






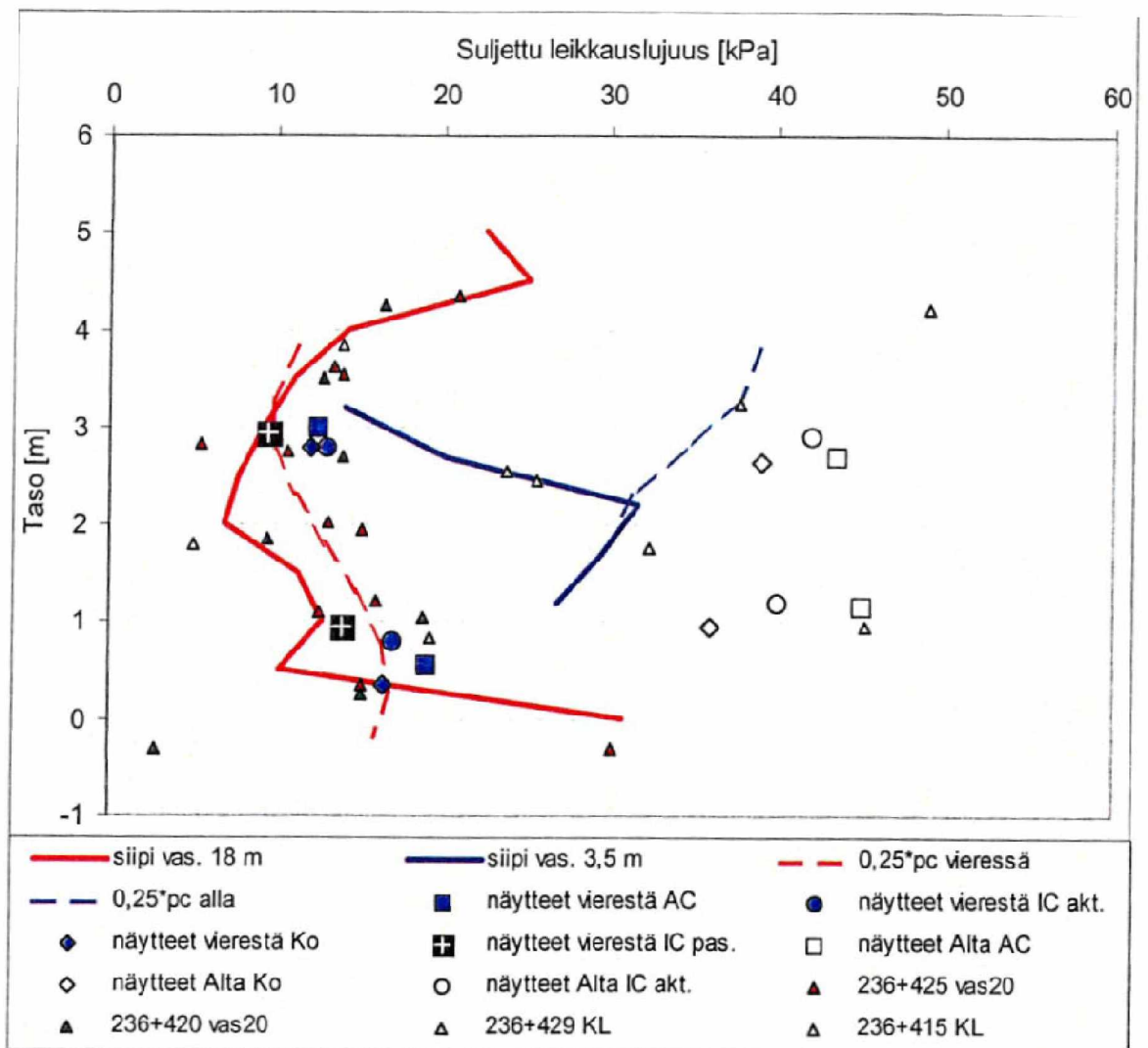






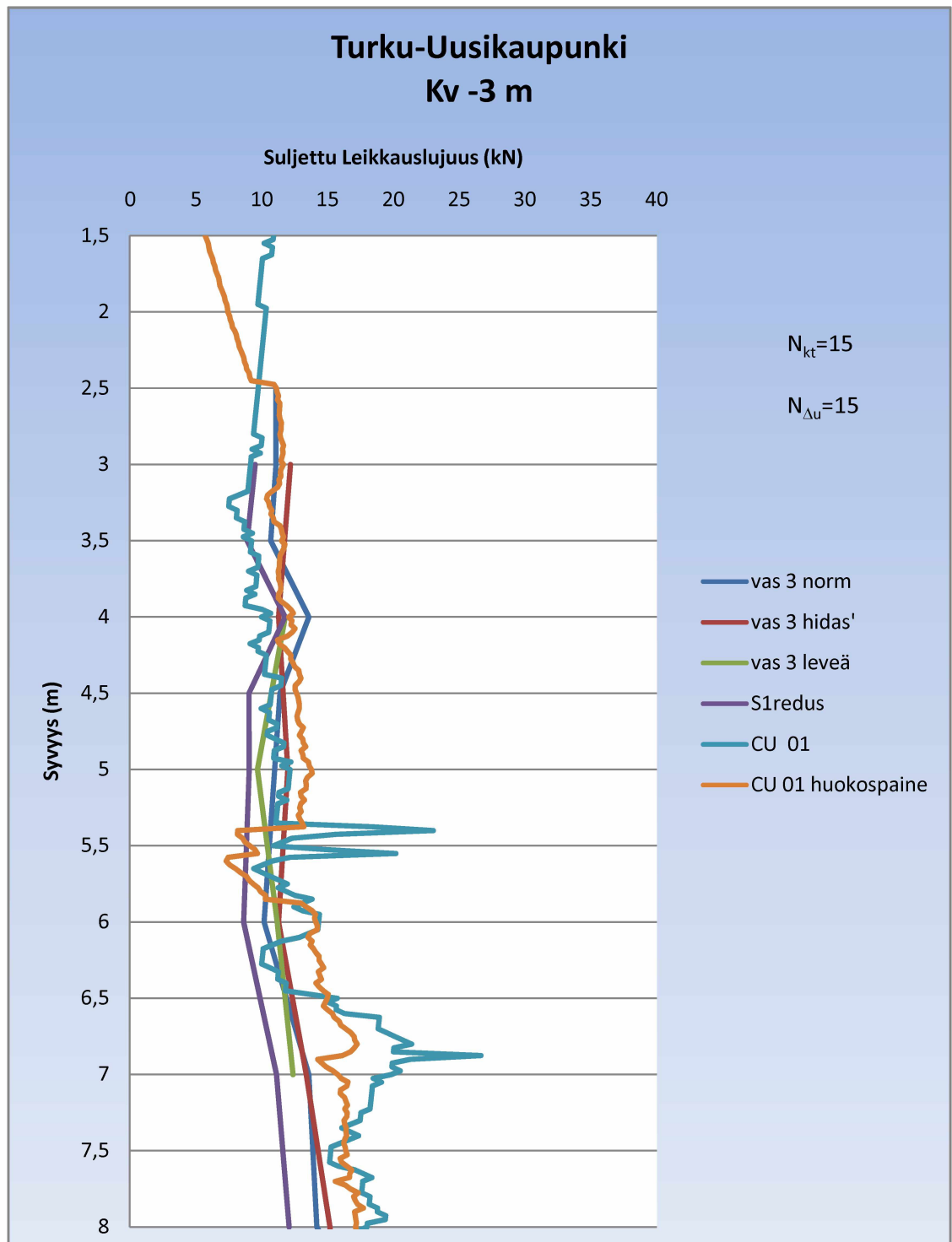
Kohteen Tampere-Seinäjoki suljetun leikkauslujuuden arvot (Ratahallintokeskus 2005)

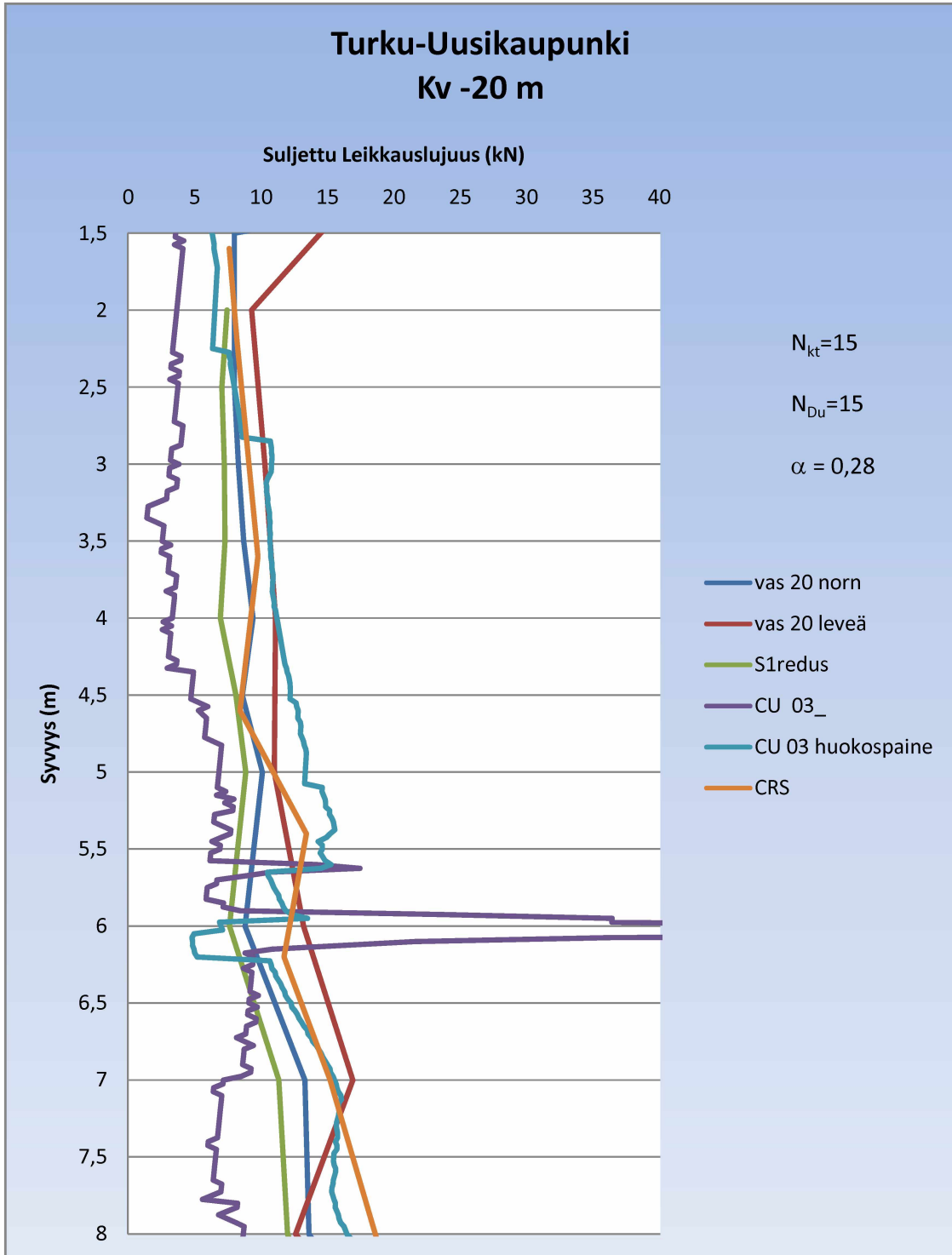
Kotka–Kouvola suljetut leikkauslujuudet

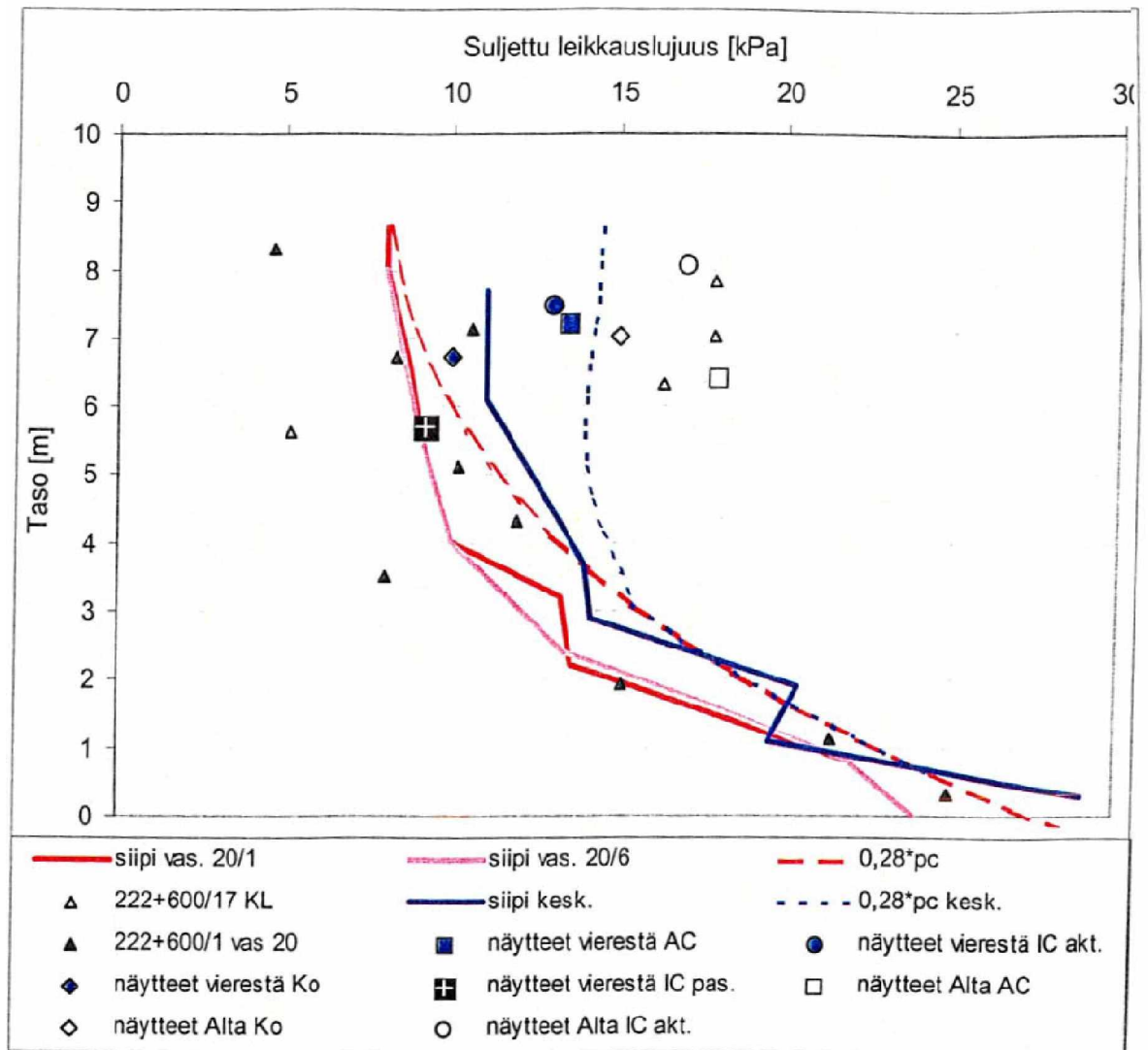


Kohteen Kotka-Kouvola suljetun leikkauslujuuden arvot (Ratahallintokeskus 2005)

Turku-Uusikaupunki suljetut leikkauslujuudet







Kohteen Turku-Uusikaupunki suljetun leikkauslujuuden arvot (Ratahallintokeskus 2005)

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-517-5

www.liikennevirasto.fi