

Niilo Vehmas

KUORMITUSAJAN JA -NOPEUDEN VAIKUTUS SAVEN LUJUUTEEN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Professori Tim Länsivaara
Mika Knuuti
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Niilo Vehmas: Kuormitusajan ja -nopeuden vaikutus saven lujuuteen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan koulutusohjelma
04 2021

Työssä tutkittiin muodonmuutosnopeuden ja kuormitusajan vaikutusta saven lujuuteen. Asiaa tutkittiin vertaamalla erisuuruksilla vakiomuodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kokeiden antamia murtolujuuksia sekä vertaamalla eri kuormitustasoilla kuormitettujen näytteiden pitkäaikaiskäyttäytymistä. Savien kuormittamista vakiomuodonmuutosnopeuksilla on jossain määrin tutkittu maailmalla, mutta korkealaatuista aineistoa on vähän. Muodonmuutosnopeuden ja saven staattisen kuormittamisen eli niin sanotun creep-kokeen vertailua keskenään on tehty myös vähän.

Tavoitteena työssä oli tuottaa lisää tietoa saven käyttäytymisestä vakiokuormalla ja -muodonmuutosnopeudella, sekä mallintaa saven käyttäytymistä tietojen pohjalta. Tuloksia käsiteltiin kriittisen tilan mallin mukaan. Työssä ei käsitelty tarkemmin lämpötilan vaikutusta tai karkeampi rakeisten maalajien käyttäytymistä eri kuormitusnopeuksilla tai kuormitusajoilla. Kirjallisuuskatsauksessa keskityttiin yleisesti käytettyihin tutkimusmenetelmiin kuten ödometri- ja kolmiakksiaalikoeksiin.

Työtä varten otettiin näytteitä kahdesta eri savilaadusta. Yksi näytteenottopaikka oli Perniö ja toinen Murro. Murron näytteet osoittautuivat huonolaatuiseksi, ja niistä tehdyt kokeet epäonnistuivat. Perniön savinäytteistä tehtiin ödometrikokeita ja kolmiakksiaalikoikeita. Ödometrikokeet tehtiin CRS-menetelmällä, jossa näytettä kuormitettiin vakiomuodonmuutosnopeudella. Työssä käytettiin neljää eri muodonmuutosnopeutta: 0,01; 0,0015; 0,0005 ja 0,0001 %/h. Ödometrikokeista määritetty esikonsolidaatiojännitys kasvoi n. 11 % kun muodonmuutosnopeus kasvoi dekadin verran. Creep-parametrin B:n arvoksi määritettiin 0,053. Kolmiakksiaalikoikeita tehtiin suljetussa tilassa eri muodonmuutosnopeuksilla. Näytteet konsolidoitiin isotrooppisesti in situ -jännitystilaan. Kokeissa käytetyt nopeudet olivat 10; 1; 0,1 ja 0,03 %/h. Muodonmuutosnopeutta ei muutettu kokeiden aikana. Kolmiakksiaalikoikeissa leikkauslujuus kasvoi noin 11 %, kun muodonmuutosnopeutta kasvatettiin dekadin verran. Creep-parametrin B arvoksi saatiin 0,053, joka vastasi ödometrikokeista saatua arvoa.

Työtä varten rakennettiin lisäksi oma laitteisto creep-kolmiakksiaalikoikeita varten. Kokeessa savinäytettä kuormitettiin staattisilla painoilla suljetussa tilassa. Näytteet konsolidoitiin anisotrooppisesti in situ -jännitystilaan. Kokeen aikana mitattiin kokoonpuristumaa sekä huokosvedenpainetta. Kokeiden leikkausvaiheessa käytettiin neljää eri deviatorista jännitystä. Suurin ja pienin jännitys valittiin vastaamaan eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kolmiakksiaalikoikeiden suurinta ja pienintä deviatorista jännitystä. Kokeet, joissa käytettiin kahta suurinta jännitystä, murtuivat. Kaksi muuta koetta eivät olleet murtuneet yli kuukauden odottamisen jälkeen, joten ne lopetettiin kesken. Osassa kokeista huokosvedenpaine alkoi selittämättömästi laskea, kun sellinesteenä käytettiin mäntyöljyä. Näiden kokeiden tuloksia ei käsitelty.

Creep-kokeiden murtokuorma verrattuna murtoajankohdan muodonmuutosnopeuteen olivat samansuuntaisia kuin eri muodonmuutosnopeuksilla tehdyissä kolmiakksiaalikoikeissa. Murtumisaikankohdan määrittäminen ei kuitenkaan ollut yksiselitteistä creep-kokeissa. Suurimmalla jännityksellä tehdyn creep-kokeen murtumisen alkamisajankohtana vallinnut muodonmuutosnopeus oli hyvin lähellä nopeimpien kolmiakksiaalikoikeiden nopeutta. Creep-kokeessa käytetty deviatorinen jännitys myös vastasi ja muodonmuutosnopeudella tehtyjen kolmiakksiaalikoikeiden suurinta saavutettua deviatorista jännitystä.

Creep-kolmiakksiaalikoikeissa jännityspolku lähestyi murtoviiva. Pienemmällä nopeuksilla murtoviivaa ei saavutettu ja niiden muodonmuutosnopeudet lähestyivät nolaa. Voi olla, että niissä murto olisi saavutettu vasta äärettömän pitkän ajan jälkeen. Kun murtuminen alkaa, muodonmuutosnopeuden pieneneminen ensin pysähtyy, jonka jälkeen se kasvaa. Tämän muutospiirteen enustaminen kuorman perusteella ei onnistu vielä tämän koesarjan perusteella.

Avainsanat: savi, creep, kolmiakksiaalikoike, ödometrikoe, muodonmuutosnopeus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Niilo Vehmas: The effects of loading time and strain rate on the strength of clay
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
04 2021

The effects of strain rate and loading time on the strength of clay was investigated. The subject was investigated by comparing the shear strengths given by experiments with different constant strain rates and by comparing the effects of different loads on long term behavior of soil samples. The loading of clay at constant rates of strain has been studied to some extent worldwide, but there is little high-quality data. There has also been little comparison between the rate of strain and the static loading of the clay, the so-called creep test.

The aim of the work was to produce more information about the behavior of clay at constant load and strain rate, and to model the behavior of clay based on the data. The results were processed according to the critical state model. The effect of temperature or the behavior of coarser granular soils at different strain rates or load times was not discussed in the work. The literature review focused on commonly used research methods such as oedometric and triaxial experiments.

Two different clay grades were sampled for the work. One sampling site was Perniö and the other Murro. The Murro samples proved to be of poor quality and the experiments on them failed. Perniö clay samples were subjected to oedometric and triaxial experiments. Oedometric experiments were performed with the CRS method, in which the sample was loaded at a constant rate of strain. Four different strain rates were used in the work: 0.01; 0.0015; 0.0005 and 0.0001 %/h. The pre-consolidation stress determined from the oedometric tests increased by about 11 % as the strain rate increased by a decade. The value of creep parameter B was determined to be 0.053. Triaxial experiments were performed in an undrained condition at different rates of strain. The samples were consolidated isotropically to the in-situ stress state. The rates used in the experiments were 10; 1; 0.1 and 0.03% / h. The rate of strain was not changed during the experiments. In the triaxial experiments, the shear strength increased by 11% when the strain rate was increased by a decade. The value of Creep parameter B was 0.053, which corresponded to the value obtained from oedometric experiments.

In addition, a separate piece of equipment for creep triaxial experiments was built for the work. In the experiment, the clay sample was loaded with static weights in an undrained state. Samples were consolidated anisotropically to the in-situ stress state. During the experiment, vertical displacement and pore water pressure were measured. Four different deviatoric stresses were used in the experiments. The maximum and minimum stresses were selected to correspond to the maximum and minimum deviatoric stresses of the triaxial experiments performed at different strain rates. Experiments using the two biggest stresses reached failure. The other two trials had not failed after more than a month of waiting, so they were discontinued. In some of the experiments, the pore water pressure began to drop inexplicably when pine oil was used as the cell fluid. The results of these experiments were not discussed.

The failure load of the creep experiments compared to the strain rate at the time of the failure were comparable to the triaxial experiments performed at different strain rates. However, the determination of the time of the failure was not unambiguous in the creep experiments. The rate of strain at the beginning of failure at the highest creep stress was very close to the rate of the fastest triaxial experiments and their maximum deviatoric stress was almost the same.

In creep triaxial experiments, the stress path approached the failure line. At lower rates, the failure line was not reached, and their strain rates approached zero. It may be that in them a failure would have been achieved only after an infinitely long time. When approaching failure, the decrease of the strain rate starts to increase. Predicting this change point based on the load is not yet possible based on this series of experiments and more research is needed.

Keywords: clay, creep, strain rate, triaxial test, oedometer test

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Hyvää kannattaa odottaa, mutta ei yleensä niin kauan kuin tämän työn tekemiseen kului. Työ melkein muodostui ikuisuusprojektiksi, mutta lopulta valmistui ja käynnisti vuoden 2021 ehkä hyvänä ennusmerkkinä tulevalle vuodelle.

Kiitokset Juha Selänpäälle ja Ville Lehtoselle neuvoista näytteenotossa ja laboratoriokokeiden ohjelmoinnissa. Kiitos Nuutti Vuorimiehelle avusta creep-kolmiakksiaalikoelaitteiston käyttöönotossa, sekä kiitokset geolaboratorion henkilökunnalle. Iso kiitos Jaakko Heikkilälle professori Tim Länsivaaralle työhön liittyvästä opastuksesta ja ohjauksesta tällä pitkällä ajanjaksolla, jonka työn valmistuminen on kestänyt.

Turussa, 4.2.2021

Niilo Vehmas

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SAVEN OMINAISUUDET.....	3
2.1 Saven rakenne.....	3
2.2 Saven leikkauslujuus.....	3
2.3 Esikonsolidaatiojännitys	5
2.4 Saven jännitystilat ja muodonmuutuskäyttäytyminen.....	6
2.5 Kriittisen tilan malli	6
2.6 Saven viruma	13
2.7 Fysikaalinen ilmiö viruman taustalla	14
3. AJAN VAIKUTUS SAVEN MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN	17
3.1 Aikatekijää kuvaavat parametrit.....	17
3.1.1 Reologiset mallit.....	17
3.1.2 Creep-parametrit.....	19
3.2 Aikatekijän vaikutus eri tutkimuksissa.....	27
3.2.1 Siipikairaus	27
3.2.2 Rasialeikkauskoe	30
3.2.3 Ödometrikokeet.....	33
3.2.4 Kolmiaksiaalikoheet	37
3.3 Hypoteesi kuormitusnopeuden ja -ajan vaikutuksesta suljettuun leikkauslujuuteen	44
4. LABORATORIOKOKKEET AJAN VAIKUTUKSEN TUTKIMISEKSI	46
4.1 Näytteenotto.....	46
4.1.1 Kohteet	46
4.1.2 Näytteenotin.....	47
4.1.3 Yhteenveto.....	49
4.2 Ödometrikokeet.....	51
4.3 Kolmiaksiaalikoheet eri muodonmuutosnopeuksilla	62
4.4 Creep-kolmiaksiaalikoheet	73
4.4.1 Laitteisto	74
4.4.2 Koeselostus	76
4.5 Koetulosten yhteenveto.....	85
5. YHTEENVETO.....	91
LÄHTEET	93
LIITE A: CREEP-KOLMIAKSIAALIKOEKUVAAJIA.....	96
LIITE B: AIKAISEMMAT KOKKEET PERNIÖSTÄ	101

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CRS	Vakiomuodonmuutosnopeus
VRS	Varioitava muodonmuutosnopeus
C_α	Sekundääripainumaparametri
C_c	Painumaparametri
B	Creep-parametri
c'	Tehokas koheesio
e	Huokosluku
K_0	Lepopainekerroin
M	Kriittisen tilan jännityssuhde
m	Moduuliluku
p	Hydrostaattinen jännitys
p'	Tehokas hydrostaattinen jännitys
q	Deviatorinen jännitys
R	Painumaparametri
r_s	Virumaluku
s_u	Suljettu leikkauslujuus
u	Huokosvedenpaine
α_s	Creep-parametri
α	Creep-parametri
σ'	Tehokas jännitys
σ'_1	Tehokas suurin pääjännitys
σ'_3	Tehokas pienin pääjännitys
σ'_c	Esikonsolidaatiojännitys
σ'_v	Tehokas pystyjännitys
$\dot{\sigma}'_v$	Kuormitusnopeus
ε	Muodonmuutos
$\dot{\varepsilon}$	Muodonmuutosnopeus
$\dot{\varepsilon}_v$	Muodonmuutosnopeus
φ'	Tehokas kitkakulma
Γ	Ominaisilavuus kriittisessä tilassa, kun $p' = 1$
λ	Kokoonpuristuvuusindeksi normaalikons. alueella
v	Ominaisilavuus
τ	Leikkauslujuus
μ	Siipikairauksesta mitatun lujuuden korjauskerroin

1. JOHDANTO

Saven rakenne on monimutkainen verrattuna karkearakeisempiin maalajeihin. Saven hienorakeisuus vaikuttaa vahvasti sen mekaanisiin, fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Eri alueilta ja syvyyksiltä otettujen savinäytteiden käyttäytyminen kuormituksessa eroaa toisistaan. Käyttäytymiseen vaikuttavat vahvasti mm. jännityshistoria, lämpötilan vaihtelut, syntyhistoria ja mineralogia. Savelle ominaista on viruma, joka ei ole yhtä voimakasta karkearakeisemmilla maalajeilla.

Tässä työssä tutkittiin muodonmuutosnopeuden ja kuormitusajan vaikutusta saven lujuuteen. Asiaa tutkittiin vertaamalla erisuuruksilla vakiomuodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kokeiden antamia murtolujuuksia sekä vertaamalla kuormitusajan vaikutusta mitattuun murtokuormaan. Savien kuormittamista vakiomuodonmuutosnopeuksilla on jossain määrin tutkittu maailmalla, mutta korkealaatuista aineistoa on vähän. Muodonmuutosnopeuden ja saven staattisen kuormittamisen eli niin sanotun creep-kokeen vertailua keskenään on tehty myös vähän.

Ajan vaikutusta saven lujuuteen ja muodonmuutosominaisuuksiin on tutkittu tarkemmin 1960-luvulta lähtien (Tavenas et al. 1978). Tutkimukset ovat osoittaneet, että muodonmuutosnopeus vaikuttaa myötöpinnan kokoon. Myötöpinta vaikuttaa taas huokospaineen kehitykseen kuormituksessa ja täten myös lujuuteen. Muodonmuutosnopeuden vaikutus suljettuun leikkauslujuuteen näyttäisi olevan riippumaton maan plastisuudesta, testityypistä tai jännityshistoriasta, kun näyte uudelleenkonsolidoidaan laboratoriossa. (Holzer et al. 1973; Graham et al. 1983) Muodonmuutosnopeuden vaikutus näyttäisi olevan myös ödometrikokeissa riippumaton maan plastisuudesta.

Jos saven aika-muodonmuutoskäyttäytymistä ymmärrettäisiin paremmin, voitaisiin luotettavammin arvioida esimerkiksi riskiä, joka syntyy, kun juna joutuu pysähtymään pehmeikölle tietynpituiseksi ajaksi. Kunnostus- ja parantamistoimenpiteet voitaisiin ohjata tällöin tehokkaammin niille rataosuuksille, joilla riski junan pitkäaikaiselle pysähtymiselle ja penkereen sortumiselle on suuri.

Tavoitteena työssä on tuottaa lisää tietoa saven käyttäytymisestä vakiokuormalla ja -muodonmuutosnopeudella, sekä mallintaa saven käyttäytymistä tietojen pohjalta. Tuloksia käsitellään kriittisen tilan mallin mukaan. Työssä ei käsitellä tarkemmin lämpötilan vaikutusta

tai karkeampi rakeisten maalajien käyttäytymistä eri kuormitusnopeuksilla tai kuormitusajoilla. Kirjallisuuskatsauksessa on keskitytty yleisesti käytettyihin tutkimusmenetelmiin kuten ödometri- ja kolmiaksaalikokeisiin.

2. SAVEN OMINAISUUDET

2.1 Saven rakenne

Geotekninen maalajiluokitus määrittää saveksi maalajin, joka sisältää savilajitetta yli 30 painoprosenttia. Savilajitteen rakeet ovat halkaisijaltaan alle 0,002 mm:ä. (Korhonen et al. 1974) Savi koostuu pääosin kiinteistä savimineraaleista, jotka ovat muodostuneet rapautumis- ja sedimentaatioprosesseissa. Lihavien savien savimineraalin määrä on noin 60 % mineraalikoostumuksesta. Savessa on myös kivilajien mineraaleja, joita on sitä vähemmän, mitä pienempi raekoko on. (Kujala 1985)

Savimineraalit ovat verkkosilikaatteja, jotka koostuvat tetraedri- ja oktaedrilevyistä. Tetraedrilevy rakentuu pii-happitetraedristä, jotka muodostavat heksagonisen verkoston. Piiatomin tilalla voi olla myös alumiiniatomi. Oktaedrilevy koostuu oktaedristä, jonka keskusatomina on yleensä alumiini. Alumiiniatomin tilalla voi olla myös magnesium- tai rauta- atomi. (Kujala 1985) Suomen yleisimpiä savimineraaleja ovat illiitti, kloriitti ja verkuliitti. Montmorillonittia ja kaoliniittia esiintyy myös rapautumistuotteina kallion heikkousvyöhykkeissä. (Kujala 1985; Uusinoka et al. 1975, Kauranne et al. 1972, Heikkisen 2000 mukaan)

Savimineraalien pinnalla on adsorptiovesivaippa, jonka kiinnittymismekanismista partikkelin pintaan on monta eri teoriaa. Yksi teoria on, vesimolekyylit ovat kiinnittyneet vetysidoksella savipartikkeliin tai sen pinnalla oleviin ioneihin. Toinen vaihtoehto on, että vesi kiinnittyy osmoottisella vetovoimalla ja ionien välityksellä partikkelin pintaan sähköisen kaksoiskerroteorian mukaisesti. On myös esitetty, että sähköstaattiset voimat saavat veden kiinnittymään vesimolekyyliliksi varautuneiden partikkelien väliin. (Kujala 1985)

Entisillä merenpohjilla olevien savikerrosten päällä on kuivakuorikerros, jonka paksuus Suomessa on 0,5...2 m (Rantamäki et al. 1979). Kuivakuorikerroksen muodostumiseen ovat vaikuttaneet kuivuminen, jäätyminen, eluutio ja hapettuminen (Bjerrum 1973). Kuivakuoren alla olevan savikerroksen paksuus voi olla Suomessa jopa 77 metriä (Haavisto et al. 1980).

2.2 Saven leikkauslujuus

Leikkauslujuudella tarkoitetaan maan kuormituksessa syntyvää maksimileikkausjännitystä, joka vastustaa maan muodonmuutosta. Leikkauslujuuden arvo on siis leikkausjännityksen suuruinen

murtotilassa. Kuormituksessa syntyy leikkaus- ja normaalijännityksiä. Kun leikkausvoimat ylittävät maan maksimileikkauslujuuden, maa murtuu.

Leikkauslujuus koostuu Mohr-Coulomb-murtokriteerin mukaan kahdesta osasta: sisäisestä kitkasta ja koheesiosta. Sisäinen kitka aiheutuu maapartikkelien välisestä kitkasta, jonka arvo on kitkakertoimen ja kitkapinnassa vaikuttavan normaalivoiman tulo. Koheesio kuvaa maahiukkasten välisiä kiinnevoimia sekä sähköstaattisia voimia mineraalihiukkasten ja niitä ympäröivien vesivaippojen välillä. Koheesioon vaikuttavat lähinnä rakeisuus ja vesipitoisuus. (Rantamäki et al. 1979) Leikkauslujuudesta käytetään maamekaniikassa yleisesti Terzaghin esittämää kaavaa 1, joka ottaa huomioon tehokkaat jännitykset (Head 1986)

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (1)$$

missä

τ on leikkauslujuus

c' on tehokas koheesio

σ' on leikkauspinnassa vaikuttava tehokas normaalijännitys ja

φ' on tehokas kitkakulma.

Maa murtuu, kun tapahtuu kriittinen yhdistelmä leikkausjännityksen ja tehokkaan jännityksen välillä. Mohr-Coulombin mallissa koheesio ja kitkakulma ovat matemaattisia vakioita, jotka määrittävät leikkauslujuuden ja tehokkaan pystyjännityksen lineaarisen suhteen. (Craig 2004) Koheesio on normaaliokonsolidoituneella savella likimain nolla.

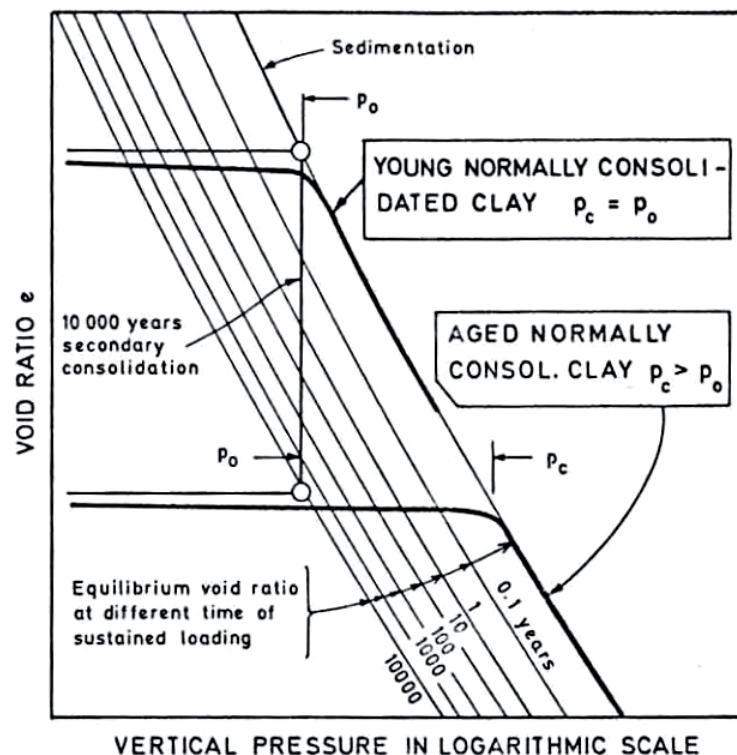
Maan leikkauslujuuden suuruuteen vaikuttaa moni asia: mineralogia, maapartikkelien muoto, jakauma sekä konfiguraatio. Lujuuteen vaikuttavat myös huokosluku, vesipitoisuus, jännityshistoria, in situ jännitykset ja maan kuormitusnopeus. Laboratoriokokeissa leikkauslujuuteen vaikuttavat lisäksi näytteen käsittelyssä syntyvät jännitysmuutokset, näytteen alkutila, jännitykset ennen koetta, koetyyppi, avoin tai suljettu koetilanne, syntyvä huokosvedenpaine ja leikkauslujuudelle asetettu kriteeri. (Head 1986)

Suljetussa tilassa maan tilavuus ja vesipitoisuus eivät muutu. Savi murtuu suljetussa tilassa, kun kuormitus tapahtuu niin nopeasti, että vesipitoisuus ja tilavuus murtopinnassa eivät ehdi muuttua. Poissonin luku on 0,5 ja tilavuudenmuutosmoduuli lähenee ääretöntä suljetussa tilassa. Suljettua leikkauslujuutta käytetään laskennassa lyhytaikaisessa rakentamisessa tai kuormituksessa. Suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää esimerkiksi siipikairalla, CPTU-kairauksella tai laboratoriokokeilla. (Laaksonen & Lojander 1990)

2.3 Esikonsolidaatiojännitys

Esikonsolidaatiojännityksellä tarkoitetaan yleisesti suurinta pystysuuntaista jännitystä, johon maaperä on joskus konsolidoitunut. Kun maan vallitseva jännitystila on pienempi kuin esikonsolidaatiojännitys, maa on ylikonsolidoitunutta. Kun jännitystila on sama kuin esikonsolidaatiojännitys, maa on normaalikonsolidoitunutta. Jännitystilan ollessa taas suurempi maa on alikonsolidoitunutta. Saven konsolidoituessa alikonsolidoitunut tila muuttuu normaalikonsolidoituneeksi. Jos esikonsolidaatiojännitys ylitetään, maan rakenne rikkoontuu. Tällöin syntyy suuria plastisia muodonmuutoksia. Maan pystysuuntainen esikonsolidaatiojännitys selvitetään yleisesti ödometrikokeella häiriintymättömästä näytteestä.

Kun hienorakeisessa maassa vallitsevat tehokkaat jännitykset ovat vakiot, esikonsolidaatiojännitys kasvaa ajan kuluessa. Tämä johtuu huokoisuuden pienentymisestä. Tästä johtuu, että esimerkiksi vanhoilta savikoilta voidaan mitata suurempia esikonsolidaatiojännityksiä kuin pelkkä suurimman pystyjännityksen arvo antaisi olettaa. (Bjerrum 1973) Kuvassa 1 on havainnollistettu esikonsolidaatiojännityksen kasvua ajan kuluessa. Huokoisuuden pienenemisen on arvioitu johtuvan hienorakeisessa maassa tapahtuvasta virumasta, jota on tarkemmin käsitelty kappaleessa 2.6.



Kuva 1. Ajan vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen. (Bjerrum 1973)

Kuvassa 1 on esitetty savikerroksen sedimentoitumista, ja pystyjännityksen kasvua pisteeseen p_0 , jossa sedimentoituminen loppuu. Esikonsolidaatiojännitys, p_c , on silloin samansuuruinen

kuin vallitseva jännitys p_0 . Kymmentuhannen vuoden kuluessa huokosluku pienenee eli maatiivistyy, vaikka pystyjännitys pysyy vakiona. Kun kymmentuhannen vuoden jälkeen savea kuormitetaan, voidaan havaita, että esikonsolidaatiojännitys, p_c , on suurempi kuin sedimentaation jälkeinen vallitseva jännitys p_0 .

2.4 Saven jännitystilat ja muodonmuutoskäyttäytyminen

Saven mekaanista käyttäytymistä eri jännitystiloiissa kuvataan usein myötöpinoilla. Myötöpinta on esikonsolidaatiojännityksen laajennettu esitystapa. Myötöpinnan sisäpuolella savi on ylikonsolidoitunutta. Muodonmuutosten oletetaan olevan tällöin täysin kimmoisia eli palautuvia. Myötöpinnalla savi on normaalikonsolidoitunutta. Muodonmuutoksien oletetaan olevan myötöpinnalla kimmo-plastisia.

Kun jännitystila siirtyy initiaalimyötöpinnan ulkopuolelle, puhutaan myötäämisestä. Silloin myötöpinta laajenee vastaamaan jännitystilaa. Tehokas jännitys ei voi olla myötöpinnan ulkopuolella. Myötöpinta voidaan esittää aksisymmetrisessä ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) kuormituksessa p' - q -koordinaatistossa, jossa p' ja q ovat kaavojen 2 ja 3 mukaisia jännitysinvariantteja. Tämä kuvaustapa on yleinen varsinkin kolmiaksaalikokeissa. (Lappalainen et al 1985)

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 - 2\sigma'_3) \quad (2)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$

missä

- p' on tehokas keskimääräinen jännitys,
- σ'_1 on tehokas pystysuuntainen jännitys,
- σ'_3 on tehokas vaakasuuntainen jännitys,
- q on deviatorinen jännitys.

Myötöpinnan muoto on yleensä elliptinen seuraten K_0 -suoraa. Savea kuormitettaessa voidaan erottaa kriittinen tila ja murtotila, joita käsitellään seuraavassa kappaleessa.

2.5 Kriittisen tilan malli

Kriittisen tilan malli kuvaa saven ideaalista, mekaanista, käyttäytymistä. Sillä voidaan mallintaa maan leikkauslujuutta. Roscoe et al. (1958) esittelivät käsitteen ensimmäisen kerran Cambridgessä vuonna 1958. Käsitteen pohjalta on myöhemmin kehitetty mm. Cam-Clay -malli (CCM) ja Modified Cam-Clay -malli (MCCM).

Malli esittää, että jos maata kuormittaa juoksevaan tilaan, maa saavuttaa kriittisen tilan. Tilassa maa on täydellisesti plastinen, mikä voidaan esittää kaavalla 4 avoimessa tilassa ja kaavalla 5 suljetussa tilassa. Kriittinen tila ja murtotila ovat normaalikonsolidoituneilla savilla samat. (Lerouiel et al. 1990; Wood 1990)

$$\frac{\partial p'}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial q}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial e}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial q}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial u}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (5)$$

missä

ε on muodonmuutos

e on huokosluku ja

u huokosvedenpaine.

Kun kriittinen tila saavutetaan, hydrostaattinen ja deviatorinen jännitys eivät muutu, mutta leikkausmuodonmuutokset jatkuvat. Näiden lisäksi avoimessa tilassa huokosluku ei muutu, ja suljetussa tilassa taas huokosvedenpaine ei muutu. (Lerouiel et al. 1990; Wood 1990) Kriittistä tilaa lähestytään, kun deviatorisen ja hydrostaattisen jännityksen suhde lähestyy arvoa M , mikä on esitetty kaavassa 6.

$$M = \frac{q}{p'} \quad (6)$$

missä

q on deviatorinen jännitys ja

p' on hydrostaattinen jännitys.

Kaavassa 6 esitetty jännitystila saavuttaa arvon M kriittisessä tilassa. Kriittisen tilan viiva M on sidottu origoon $p'q$ -koordinaatistossa, jolloin koheesio on nolla. Kriittisen tilan viivaa voidaan kuvailla Mohr-Coulombin murtoehdolla. Kolmiakσιαalisen puristuskokeen murtoehtojen suhde voidaan esittää kaavalla 7. (Wood 1990)

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (7)$$

missä

φ' on kriittisen tilan tehokas kitkakulma.

Kriittinen tila voidaan esittää myös ominaistilavuuden ja hydrostaattisen jännityksen avulla kaavalla 8. Ominaistilavuus määritetään kaavalla $v = e + 1$, jossa e on huokosluku.

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (8)$$

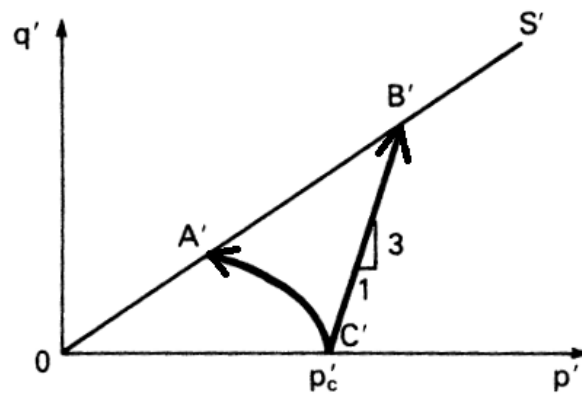
missä

v on ominaistilavuus

Γ on ominaistilavuus kriittisessä tilassa, kun $p' = 1$ ja

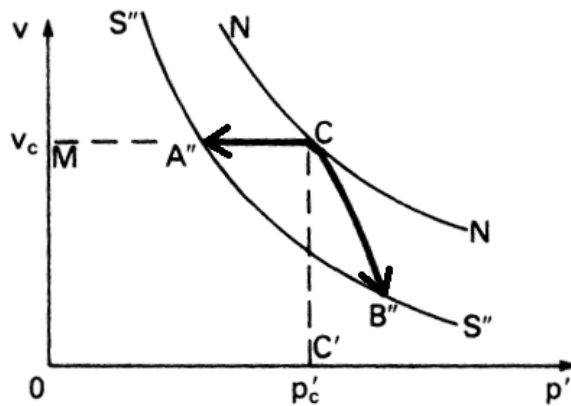
λ on kokoonpuristuvuusindeksi normaalikonsolidoituneella alueella.

Saven käyttäytyminen eroaa voimakkaasti riippuen siitä mikä on näytteen jännitystila. Kuvassa 2 on esitelty yksinkertaistetusti isotrooppisesti konsolidoitujen näytteiden käyttäytymistä suljetussa ja avoimessa kolmiaksaalikokeessa kriittisen tilan konseptin mukaan, kun näytteet ovat normaalikonsolidoituneita.



Kuva 2. Kriittisen tilan suora OS' esitetty $p'q'$ -koordinaatistossa. (Craig 2004)

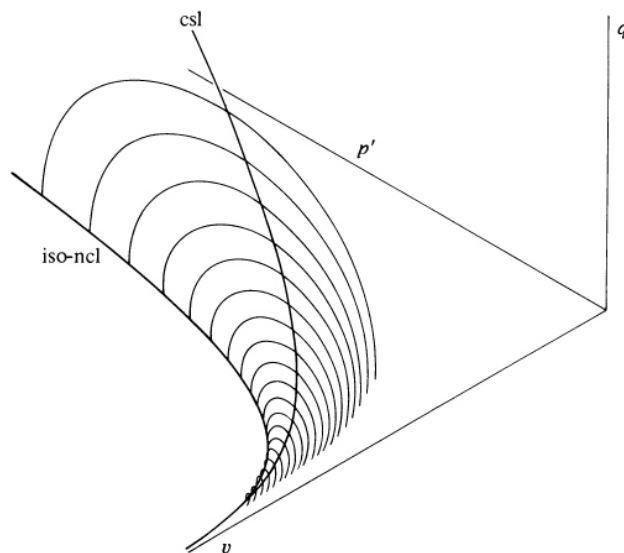
Vivian OS' kulmakertoimen arvo on M . Käyrä $C'-A'$ kuvaa suljetussa tilassa tapahtuvaa puristusta ja viiva $C'-B'$ avoimessa tilassa tapahtuvaa puristusta. Suljetussa tilassa huokosvedenpaine kasvaa pystyjännityksen kasvaessa ja täten tehokas keskimääräinen jännitys pienenee. Avoimessa tilassa huokosvedenpaine purkaantuu ja tehokas keskimääräinen jännitys kasvaa. (Craig 2004) Kuvassa 3 on esitetty vastaavat jännityspolut $v-p'$ -koordinaatistossa.



Kuva 3. Kriittinen tila esitettynä S'' -käyrällä. (Craig 2004)

Kuvassa 3 käyrä N-N kuvaa isotrooppisesti konsolidoidun saven käyrää. Kuvan mukainen näyte on konsolidoitu pisteeseen C. Käyrä S'' - S'' kuvaa kriittistä tilaa, joka saavutetaan suljetun tilan puristuksessa pisteessä A'' . Suljetussa tilassa tilavuus ei muutu, joten ominaistilavuus v on vakio. Avoimen tilan puristuksessa kriittisen tilan suora saavutetaan pisteessä B'' . Avoimessa tilassa huokosvedenpaine purkaantuu ja ominaistilavuus pienee, kun maa kokoonpuristuu.

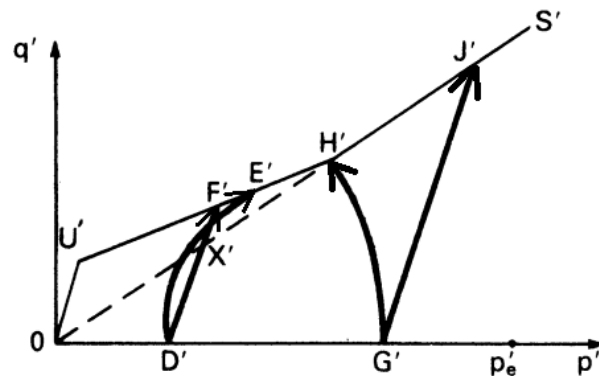
Kriittinen tila voidaan esittää myös kolmiulotteisessa p' - q - v -koordinaatistossa kuvan 4 mukaisesti. Käyrä csl vastaa kuvan 3 kriittisen tilan käyrää S'' - S'' ja käyrä $iso-ncl$ isotrooppisen konsolidoinnin käyrää N-N.



Kuva 4. 3D-esitys kriittisen tilan suorasta (csl), isotrooppisen konsolidoinnin suorasta ($iso-ncl$) ja Cam clay -myötöpinnoista. (Wood 1990)

Kuvassa 5 on esitetty kriittisen tilan mallin mukaiset jännityspolut avoimessa ja suljetussa kolmiaksaaliokokeessa konsolidoituna ylikonsolidoituneelle jännitysalueelle. Pisteestä D'

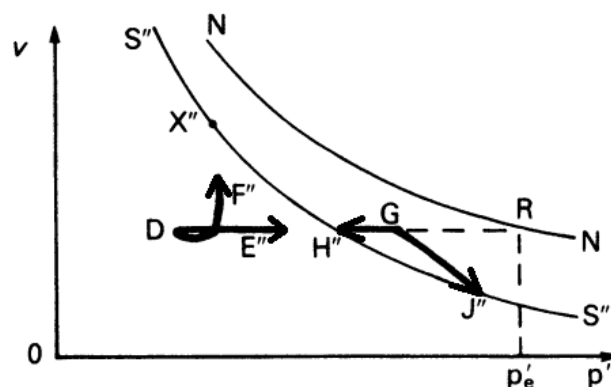
lähtevä jännityspolku on voimakkaasti ylikonsolidoituneella alueella ja pisteestä G' lähtevä on lievästi ylikonsolidoituneella alueella.



Kuva 5. Kriittisen tilan suora S' esitetty p' - q' -koordinaatistossa. (Craig 2004)

Voimakkaasti ylikonsolidoitunut näyte saavuttaa suljetussa tilassa murtotilan pisteessä E' , joka sijaitsee $U'H'$ -viivalla. Jännityspolku ei koskaan saavuta kriittisen tilan suoran pistettä H' . Avoimessa tilassa kuormitettu näyte murtuu taas pisteessä F' käyrällä $U'H'$. Murtumisen jälkeen avoimen kokeen jännityspolun voitaisiin olettaa palaavan pisteeseen X' , joka sijaitsee kriittisen tilan suoralla. Näin ei kuitenkaan tapahdu, koska ylikonsolidoidun näytteen tilavuus kasvaa lähellä murtoa ja sen jälkeen. Tämä johtuu näytteen murtumiskohdissa tapahtuvasta rakenteen heikkenemisestä, jolloin koko näyte ei voi saavuttaa kriittistä tilaa. (Craig 2004)

Kuvassa 5 esitetystä käyrästä $U'H'$ käytetään nimitystä Hvorslevin pinta (Craig 2004). Murtuminen ylikonsolidoituneilla savilla tapahtuu siis normaalikonsolidoituneita savia suuremmalla jännityssuhteen arvolla Hvorslevin pinnalla. Näytteiden käyttäytyminen suljetussa ja avoimessa tilassa on esitetty lisäksi kuvassa 6 p' - v -koordinaatistossa.

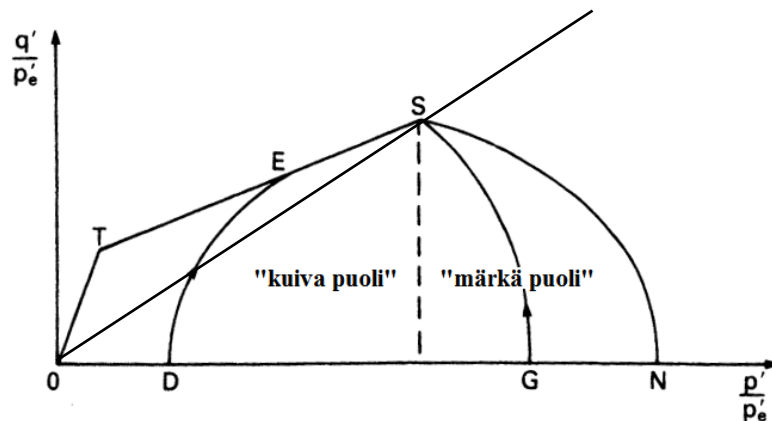


Kuva 6. Kriittisen tilan suora S'' esitetty p' - v -koordinaatistossa. (Craig 2004)

Kuvassa 6 käyrä S'' - S'' edustaa kriittisen tilan suuraa p' - v -koordinaatistossa. Käyrä N - N on isotrooppisen konsolidoinnin käyrä. Pisteestä G lähtevät jännityspolut edustavat lievästi

ylinkonsolidoituneen näytteen jännityspolkuja avoimessa ja suljetussa tilassa, ja pisteestä D lähtevät taas vastaavia jännityspolkuja voimakkaasti ylikonsolidoituneessa tilassa. Kuten kuvaajasta nähdään, ylikonsolidoidut näytteet eivät saavuta kriittisen tilan viivaa $S''-S''$ pisteissä H'' ja X'' .

Craigin (2004) yksinkertainen myötöpintamalli on esitetty kuvassa 7. Siinä on esitetty Hvorslevin pinta, kriittisen tilan suora sekä isotrooppisen konsolidaation käyrä viivoilla vastaavasti T-S, S-N ja O-N. Koordinaatiston deviatroinen ja keskimääräinen jännitys on normalisoitu kuvaan sellaisella p' :n arvolla p'_e , jossa on tietty vakioilavuus leikkaa kuvan 4 normaalikonsolidoituneen isotrooppisen tilan käyrän N-N.

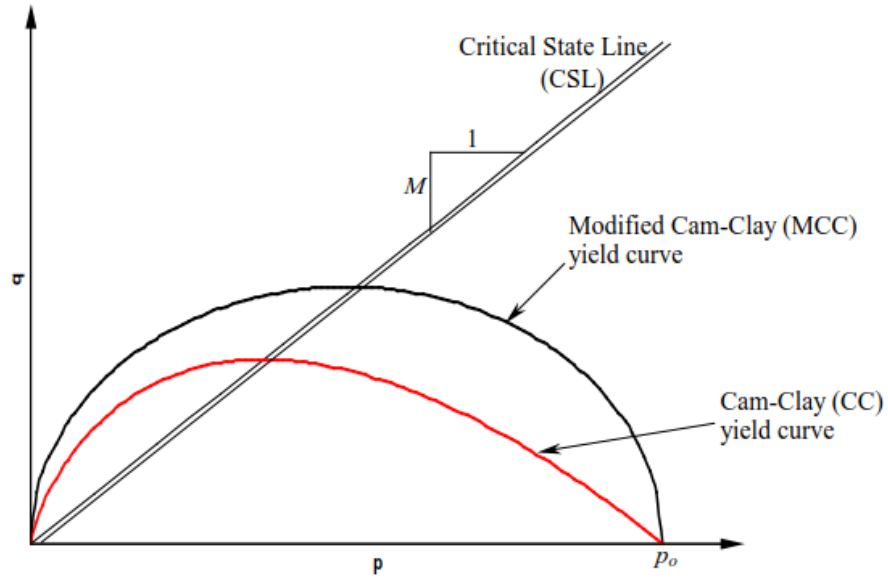


Kuva 7. Yksinkertainen isotrooppinen myötöpintamalli (Craig 2004)

Piste N edustaa kuvassa isotrooppisesti konsolidoitua jännitystilaa. S on piste kriittisen tilan suoralla. T kuvaa pistettä, jossa vetojännitys "katkaistaan". Kun näytteen vesipitoisuus on suurempi kuin näytteellä kriittisessä tilassa samalla p' :n arvolla, näyte on ns. märällä puolella kriittistä tilaa. Tämä tila on esitetty kuvassa jännitysvälillä S ja N. Näyte, jonka jännitystila on taas välillä D ja S, on niin sanotusti kuivalla puolella kriittistä tilaa. (Craig 2004)

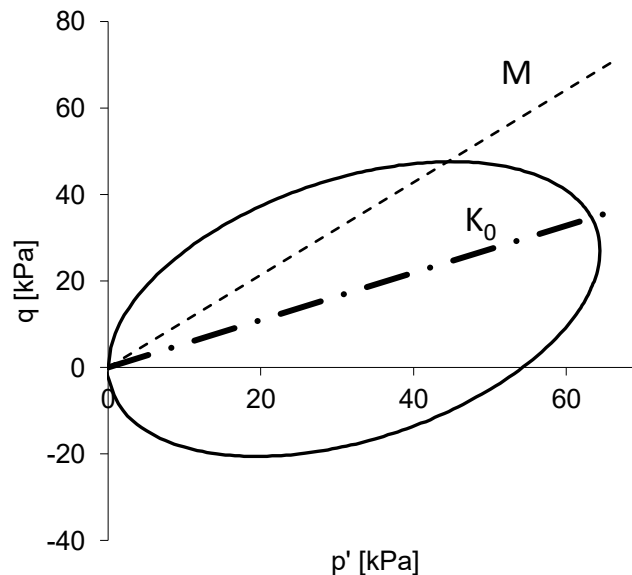
Yhteenvetona voimakkaasti ylikonsolidoituneen saven jännityspolku liikkuu myötöpinnan sisäpuolella ja murtuu täten kuivalla puolella. Silloin se ei hyvin todennäköisesti saavuta kriittisen tilan suoraa. Normaalikonsolidoituneet ja lieveästi ylikonsolidoituneet savet taas pysyvät märällä puolella ja saavuttavat kriittisen tilan suoran.

Kuvassa 7 esitetty malli oli yksinkertaistettu tapaus isotrooppisen materiaalin myötöpinnasta. Kriittisestä tilasta on kehitetty myös muita myötöpintamalleja. Kuvassa 8 on esitetty CC- ja MCC-mallien mukaiset myötöpinnat.



Kuva 8. Cam-Clayn ja Modified Cam-Clayn myötöpintamalli. (Description of Cam-Clay and Modified-Cam-Clay Critical State Strength Models)

Yllä esitetyt myötöpintamallit ovat isotrooppisille materiaaleille, ja niissä myötöpinnat ovat olleet symmetrisiä vaaka-akselin suhteen. Länsivaara (1999) on esittänyt myötöpintamallin anisotrooppiselle materiaalille. Mallin oletuksena on, että K_0 -suoran ja myötöpinnan leikkauspiste voidaan arvioida kokeellisesti. Tämän lisäksi assosiatiivisen myötösäännön oletetaan olevan voimassa kyseisessä pisteessä, jolloin myötöpinnan kaltevuus voidaan määrittää. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki tällaisesta myötöpinnasta.



Kuva 9. Esimerkki anisotrooppisen materiaalin myötöpintamallista.

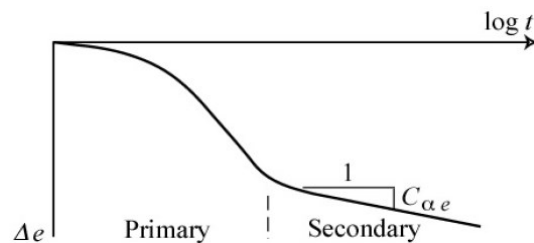
Myötöpintamallissa lujuusparametri M arvioidaan kolmiakselikokeesta ja myötöpinnan koon määrittävä parametri p'_0 määritetään ödometrikokeesta määritetystä

esikonsilidaatiojännityksestä. Maan lepopaineerroin K_0 vaikuttaa myötöpinnan muotoon. Lepopaineerroin määritetään kitkakulman avulla Jakyn yhtälöllä $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$. Kitkakulma voidaan taas määrittää parametrilla M soveltaen aiemmin esitettyä kaavaa 7. Mitä pienempi lepopaineerroin on, sitä voimakkaammin myötöpinta on epäsymmetrinen vaaka-akselin suhteen. (Länsivaara 1999)

2.6 Saven viruma

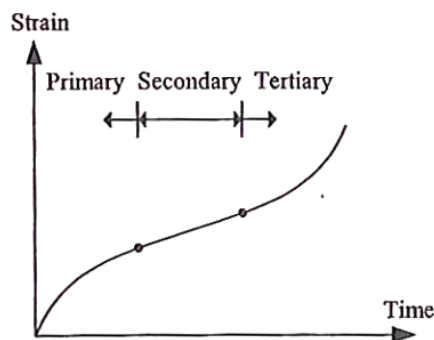
Klassisessa konsolidaatioteoriassa hienorakeisen maan painuminen kuormituksen alla jaetaan yleensä kahteen vaiheeseen: primääriseen ja sekundääriseen painumaan. Primäärisessä painumassa huokosvedenpaine pienenee ja tehokas jännitys kasvaa. Sekundäärinen painuma tapahtuu taas lähes tasaisilla tehokkailla jännityksillä. (Bjerrum 1973)

Kuvassa 10 on esitetty tyypillinen painumakäyrä yksidimensionaalisessa puristuksessa (Lerouiel 2006). Virumasta aiheutuva painuma näkyy kuvassa, kun huokosveden ylipaine on poistunut primääripainuman jälkeen.



Kuva 10. Tyypillinen konsolidaatiokäyrä yksidimensionaalisessa puristuksessa (Lerouiel 2006)

Virumalla tarkoitetaan yleisesti materiaalissa tapahtuvaa muodonmuutosta vakiojännityksessä. Saven viruma voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: primääriseen, sekundääriseen ja tertiääriseen virumaan kuvan 11 mukaisesti. Primäärisessä vaiheessa muodonmuutosnopeus laskee, sekundäärisessä pysyy vakiona ja tertiäärisessä kasvaa. Tertiäärinen viruma johtaa lopulta maan murtumiseen. (Augestesen et al. 2004)



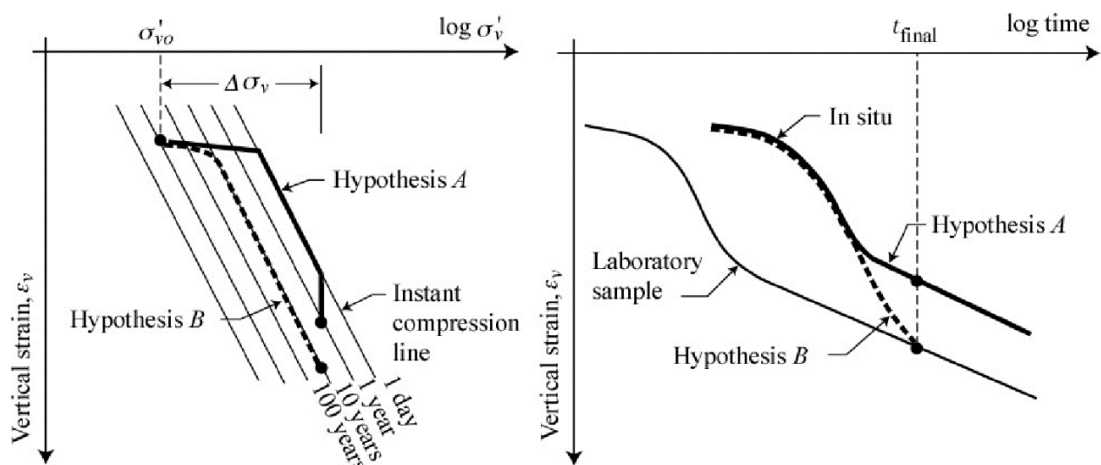
Kuva 11. Viruman jako kolmeen vaiheeseen. (Augestesen et al. 2004)

Saven viruma voidaan jakaa myös kahteen osaan, jotka kuvaavat saven käyttäytymistä eri jännitystilanteissa. Tilavuudellinen viruma (volumetric creep) aiheutuu tilavuusjännityksestä,

joka on vakio. Se vastaa aiemmin esitettyä viruman primääristä vaihetta, joka klassisessa konsolidaatioteoriassa vastaa sekundääripainumaa. Deviatorinen viruma (deviatoric creep) voi vastata kaikkia kolmea vaihetta tai ainoastaan primääristä vaihetta, jos jännitys ei ole tarpeeksi suuri, jotta maa murtuisi. (Havel 2004)

Kun pystyjännitys pysyy vakiona, deviatorinen viruma voi aiheuttaa maan murtumisen oikeissa olosuhteissa. Varsinkin pehmeät savet ovat alttiita viruman aiheuttamalle murtumalle suljetuissa olosuhteissa ja voimakkaasti ylikonsolidoituneet savet taas avoimessa tilassa. (Havel 2004)

Viruman alkamisajankohdasta on esitetty kaksi eri hypoteesia. Hypoteesi A olettaa, että virumaa alkaa vasta primääripainuman jälkeen. Hypoteesi B taas olettaa, että virumaa tapahtuu myös primääripainuman aikana (Lerouiel 2006). Kuvassa 12 on esitetty, kuinka teoreettinen painuma riippuu valitusta hypoteesista. Hypoteesilla B lopullinen painuma on suurempi ja vastaa todellista, mitattua, painumaa. Lerouiel (2006) on esittänyt, että hypoteesi A ei pidä paikkaansa.



Kuva 12. Eripaksuisten savikerrosten painumat hypoteesilla A ja hypoteesilla B. (Ladd et al. 1997, Lerouiel 2006 mukaan)

2.7 Fysikaalinen ilmiö viruman taustalla

Tässä kappaleessa esitellään vaihtoehtoisia teorioita fysikaaliselle ilmiölle viruman taustalla. Viruman mekanismeja ei täysin tunneta. Barden (1969) on jakanut savessa tapahtuvan viruman syntymismekanismit kolmeen eri vaihtoehtoiseen syyhyn: sidosten liikkeitä (*jumping of bonds*), rakenteellinen viskositeetti sekä mikro- ja makrohuokosten rakenne (katso Holzer et al. 1973). Saven viruman mekanismeja tutkittaessa täytyy tehdä oletus joko kontaktista partikkelien välillä tai tavasta, jolla voimat välittyvät kontaktpisteiden välillä. Holzer et al. (1973) kävivät läpi tutkimuksia aiheesta ja totesivat, että suuri osa viruman mekanismeista koskevista tutkimuksista

ovat tuloksettomia, koska lähtöoletuksia voidaan muokata niin, että ne noudattavat tehtyjä havaintoja.

Sidosten liikkeiden mekanismi olettaa, että rakeisen materiaalin perusteellinen sitoutumisyksikkö (*fundamental bonding unit*) siirtyy, kun maassa tapahtunut työ on loppunut. Rakenteellisen viskositeetin malli olettaa, että savisella maalla on luontainen viskositeetti, joka syntyy partikkelien vaippavesien välille rasiuksessa. Tässä mallissa savimineraalien pinnalla olevalla vaippavedellä oletetaan olevan sellaisia fysikaalisia ominaisuuksia, jotka eroavat vapaan veden ominaisuuksista. Mikro- ja makrohuokosmekanismi taas olettaa, että maalla on enemmän kuin yksi rakenteellinen taso, ja että viruma tapahtuu, kun vesi virtaa mikrohuokosesta makrohuokoseen. (Holzer et al. 1973)

Terzaghi (1941) esitti että kiinteän ja nestemäisen olomuodon välillä oleva vesi käyttäytyy kuin hyvin viskoosinen neste (katso Bjerrum 1973). Bjerrum (1973) ehdotti, että kun kaksi hiukkasta puristetaan yhteen, niiden vesivaipat yhdistyvät, ja kosketuspinnalla tapahtuvasta lämpöväärähtelystä aiheutuu tällöin hiukkasten välinen viruma (*interparticle creep*). Yhdistyminen tapahtuu sillä oletuksella, että puristava voima ei ole liian suuri. Hiukkasten välisessä virumassa tasaisella nopeudella tapahtuva leikkausvoiman suuntainen suhteellinen liike välittyy kosketuspinnan läpi. Viruman nopeus kasvaa leikkausjännityksen lisääntyessä ja puolijäykän (*semirigid*) vesikalvon paksuuden eli plastisuuden kasvaessa. (Bjerrum 1973)

Bjerrumin (1973) mukaan siirtymän saavuttaessa tietyn suuruuden, tapahtuu murtuminen, liukuminen tai suuri äkillinen siirtymä. Nämä johtuvat muutoksista geometriassa tai siitä, että kontaktipiste saavuttaa savipartikkelin pinnan rajan. Jokaisella kontaktipinnalla on siis kriittinen siirtymä, jolla murtuminen tapahtuu. Tämän jälkeen kontaktipiste ei voi enää välittää tehokkaita jännityksiä, joita se aiemmin kantoi. Tämä kriittinen ehto (*critical condition*) saavutetaan jatkuvassa jännityksessä tietyn ajan kuluttua. Aika on sitä lyhyempi, mitä suurempi jännitys on.

Kontaktipinnan stabiliteetti ei siis riippuisi pelkästään siitä onko leikkausjännitys pienempi tai suurempi kuin kontaktipinnan leikkauslujuus. Murtuminen tapahtuu suhteellisen siirtymän jälkeen, joten leikkausjännityksen lisäyksen ja tapahtuvan murtuman välillä on viive. Kontaktipinnassa tapahtuu lopulta aina murtuminen leikkausjännityksen vaikutuksesta, ja murtumisen ajankohta riippuu leikkausjännityksen suuruudesta. (Bjerrum 1973)

Savi koostuu suuresta määrästä kontaktipisteistä, ja hiukkasten välistä virumaa tapahtuu useammassa kohdassa savea samaan aikaan. Tämä viruma on hyvin pieni, eikä se vaikuta suoraan saven dimensioihin. Murtumiset kontaktipinnoissa ja niiden aiheuttama ketjureaktio kuitenkin aiheuttavat havaittavia muodonmuutoksia saveen. Lämpöväärähtely vaikuttaa siis vain

savielementin muodonmuutoksen (tasaiseen) nopeuteen, joka kasvaa elementin leikkausjännitysten kasvaessa. Kontaktipisteissä tapahtuvista murtumista ja niiden ketjureaktiosta aiheutuvasta muodonmuutoksesta, jotka tapahtuvat viiveellä, käytetään nimitystä virumamuodonmuutos (*creep deformation*). (Bjerrum 1973)

3. AJAN VAIKUTUS SAVEN MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN

Ajan vaikutus saven leikkauslujuuteen nousi maamekaniikassa esille Terzaghin (1931) julkaistessa artikkelin "The static rigidity of plastic clays". Artikkelissa todettiin, että plastiset muodonmuutokset voivat alkaa huomattavasti alemmalla leikkausjännityksellä kuin perinteisessä laboratoriokokeessa on määritelty. Terzaghin artikkelin jälkeisissä tutkimuksissa onkin todettu, että kuormitusaika ja -nopeus vaikuttavat voimakkaasti hienorakeisen maan lujuuteen. Bjerrum (1973)

Myöhemmissä tutkimuksissa on todettu, että laboratoriokokeissa aikatekijä vaikuttaa voimakkaasti pehmeän saven käyttäytymiseen. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että ödometrikokeessa esikonsolidaatiojännitys on sitä suurempi mitä nopeammin näytettä on kuormitettu. Samansuuntaisia tuloksia on saatu myös kolmiaksoaalikokeissa, joissa taas suljettu leikkauslujuus on ollut sitä suurempi mitä nopeammin kuormitus on tehty. (Länsivaara et al. 2011).

3.1 Aikatekijää kuvaavat parametrit

Ajan vaikutusta saven käyttäytymiseen on kuvattu kirjallisuudessa monella eri menetelmällä. Tässä kappaleessa esitellään pehmeiden savien kanssa yleisesti käytetyt parametrit, joilla aikatekijää on mallinnettu. Lisäksi voidaan esittää koekohtaisia lujuuden muutoksia muodonmuutosnopeuden suhteen. Näitä arvoja on esitetty seuraavassa kappaleessa 3.2, jossa on käsitelty yleisesti käytettyjä saven lujuuden tutkimusmenetelmiä, ja niistä saatuja tuloksia.

3.1.1 Reologiset mallit

Reologisilla malleilla kuvataan materiaalin muodonmuutosta jännityksen alaisena. Maamekaniikassa on esitetty maalle neljää eri matemaattista mallia, joilla aikakäyttäytymistä voidaan kuvata. Mallit on esitetty kaavoilla 9...12 (Lerouiel 2006).

$$R(\sigma'_v, e) = 0 \quad (9)$$

$$R(\sigma'_v, e, t) = 0 \quad (10)$$

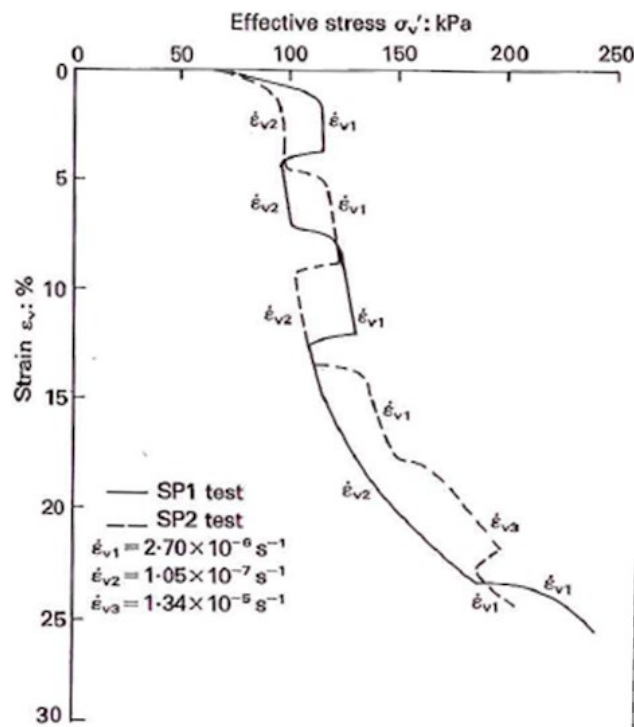
$$R(\sigma'_v, e, \dot{\sigma}'_v, \dot{e}) = 0 \quad (11)$$

$$R(\sigma'_v, e, \dot{e}) = 0 \quad (12)$$

e	on huokosluku,
t	on aika,
σ'_v	on tehokas pystyjännitys
$\dot{\epsilon}$	on muodonmuutosnopeus ja
$\dot{\sigma}'_v$	on kuormitusnopeus.

Kaava 9 on Terzaghin klassisen konsolidaatioteorian mukainen malli, jossa konsolidaatio ei riipu ajasta tai kuormitusnopeudesta. Kaava 10 esittää, että konsolidaatio riippuu huokosluvun ja tehokkaan pystyjännityksen lisäksi ajasta. Molemmassa malleissa ongelmaksi muodostuu tapaukset, joissa kuormitus muuttuu. Kaavassa 10 on lisäksi ongelmana referenssiajan määrittäminen (Lerouiel 2006). Mallit ovat täten puutteellisia kuvaamaan savelle tehtyjä laboratoriokeiteita, joissa jännityksen ja muodonmuutoksen välinen suhde on todettu ajasta riippuvaksi.

Kaavat 11 ja 12 ottavat huomioon muodonmuutosnopeuden, ja kaava 12 ottaa lisäksi huomioon kuormitusnopeuden. Molemmat kaava kuvaavat maan käyttäytymistä täten vallitsevien kuormitusolosuhteiden mukaisesti. Lerouiel et al. (1985) totesivat, että kaava 11 riittää kuvaamaan saven muodonmuutoskäyttäytymistä riittävän tarkasti. Kaavan 11 mukainen malli voidaan kuvata e - σ'_v -diagrammeilla, joissa on esitetty vakiomuodonmuutosnopeutta kuvaavat käyrät (isotaches). (Lerouiel 2006) Mallia vastaavat käyrät voidaan nähdä esimerkiksi kuvasta 13, jossa ödometrikokeen muodonmuutosnopeutta vaihdellaan.



Kuva 13. Ödometrikokeet vaihtelevilla muodonmuutosnopeuksilla Batiscan-savella. (Lerouiel et al. 1985)

3.1.2 Creep-parametrit

Taylor (1942) esitti alun perin sekundääripainumaparametrin C_α kuvaamaan saven virumaa. Sen määritelmä on esitetty kaavassa 13.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (13)$$

missä

e on huokosluku ja

t on aika.

Mesri & Godlewski (1977) kehittivät sekundääripainuman analysointiin C_α - C_c -menetelmän. Menetelmä perustuu havaintoon, että C_α :n suuruus ja käyttäytyminen ovat riippuvaisia ajasta ja C_c taas konsolidaatiojännityksestä. He esittivät, että kokoonpuristuvuusparametrien C_α ja C_c välinen suhde on jokaisella maalajilla vakio.

Painumaparametri C_c kuvaa saven kokoonpuristuvuutta esikonsolidaatiojännitystä suuremmissa jännityksissä. Sen määritelmä on esitetty kaavassa 14.

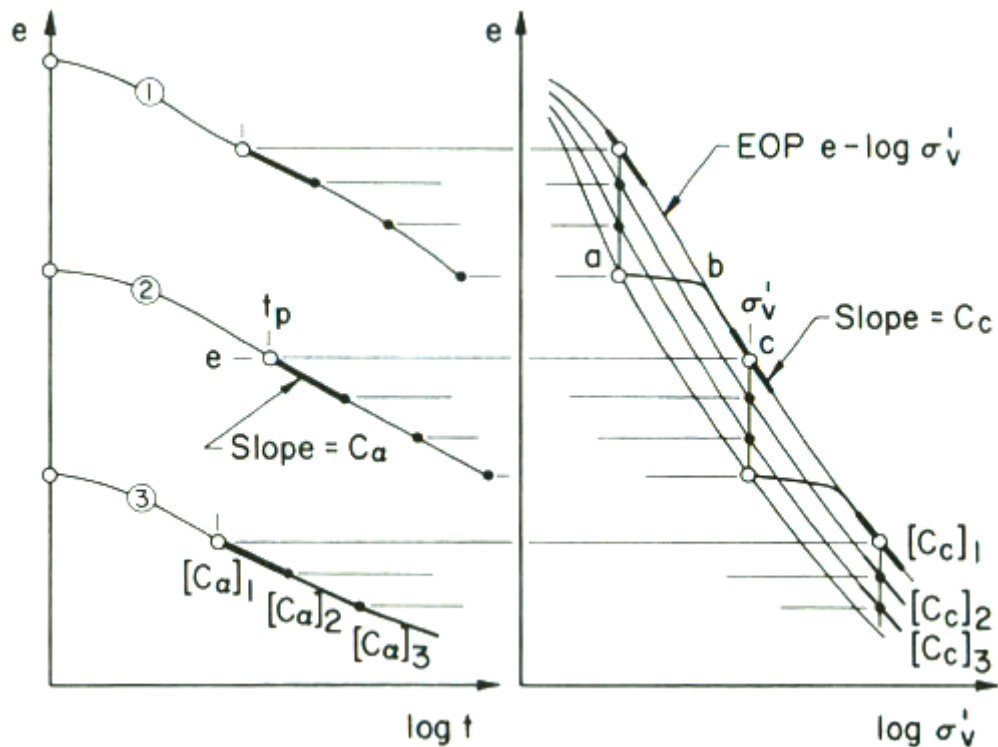
$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (14)$$

missä

e on huokosluku ja

σ'_v on tehokas pystyjännitys.

Parametrit voidaan määrittää portaattaisen ödometrikokeen aika-painuma-kuvaajan perusteella graafisesti kuvan 14 mukaisesti. Parametrin C_α arvo jokaisella pystyjännityksellä σ'_v saadaan heti primäärisen konsolidaation loppumisen jälkeen lineaarisen e - $\log t$ -käyrän osuuden kulmakertoimesta. Vastaava C_c parametrin arvo saadaan saman pystyjännityksen kohdalta e - $\log \sigma'_v$ -käyrän osuuden kulmakertoimesta. (Mesri et al. 1987)



Kuva 14. Parametrien C_α ja C_c määrittäminen kolmen eri pystyjännityksen avulla sekundaarikonsolidaatiokuvaajista. (Mesri et al. 1987)

Konseptin mukaan C_c voi muuttua huokosluvun muuttuessa, mutta on riippumaton muodonmuutosnopeudesta. C_α :n käyttäytyminen ajan suhteen on lisäksi riippuvainen C_c :n käyttäytymisestä esikonsolidaatiojännityksen suhteen, jolloin niiden suhde, C_α/C_c , on vakio missä tahansa maalajissa normaalikonsolidoituneella alueella. (Mesri & Godlewski (1977)

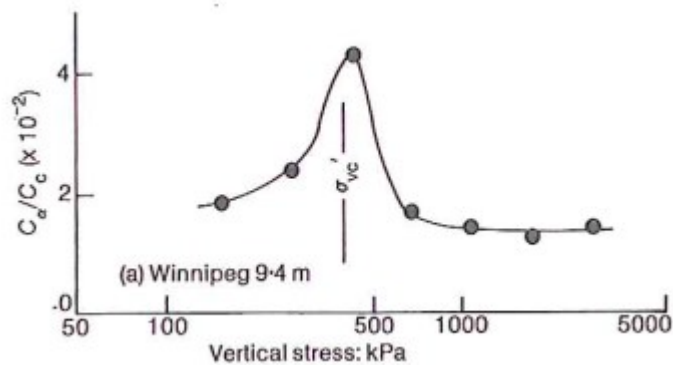
Mesri et al. (1995) ovat määrittäneet, että C_α/C_c :n arvo on välillä 0,03...0,05 epäorgaanisilla pehmeillä savilla ja välillä 0,04...0,06 orgaanista ainesta sisältävillä plastisilla savilla. Taulukkoon 1 on koottu eri saville määritettyjä arvoja.

Taulukko 1. C_α/C_c -arvoja pehmeillä savilla. (Mesri luentokalvo)

Savi	w [%]	w _i [%]	w _p [%]	σ'_c/σ'_v	C_α/C_c
Atchafalaya	60-70	80	30	1,1-1,2	0,022
Batiscan	71-88	49	22	1,6-1,7	0,030
Boston Blue	24-29	33	18	3,2	0,026
Broadback	42-48	36	25	2,6-3,2	0,040
Brown Mexico City	313-340	361	91	1,4	0,046
La Grande 15b	55-59	62	26	2,8-3,0	0,057

La Grande 23a	55-58	64	26	1,8-2,0	0,052
Saint Alban	58-64	43	21	2,1-3,3	0,025
Saint Esprit	74-91	75	27	3,4-3,7	0,038
Saint Hilaire	62-71	55	23	1,4-1,5	0,031
Vasby	114-122	122	41	1,5-1,9	0,055

Jos portaittaisen ödometrikokeen jokaista jännityslisäystä tarkastellaan suhteen C_α/C_c avulla huomataan, että suhde on kuitenkin suurempi esikonsolidaatiojännityksen kohdalla. (Graham et al. 1983) Asia on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Suhteen C_α/C_c riippuvuus jännityksestä (Graham et al. 1983)

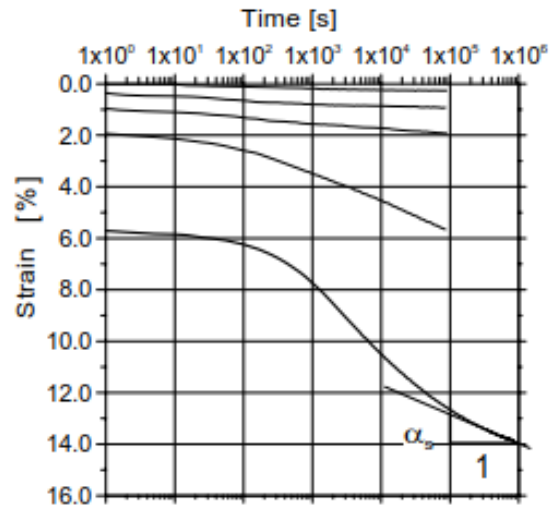
Ruotsissa käytetään sekundääripainuman kuvaamisessa parametria α_s , joka on määritelty kaavassa 15. Parametrin määrittäminen on esitetty graafisesti kuvassa 16. (Claesson 2003)

$$\alpha_s = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \log t} \quad (15)$$

missä

ε on virumasta aiheutuva muodonmuutos ja

t on aika.



Kuva 16. Sekundääriparametrin α_s ödometrikokeesta (Claesson 2003)

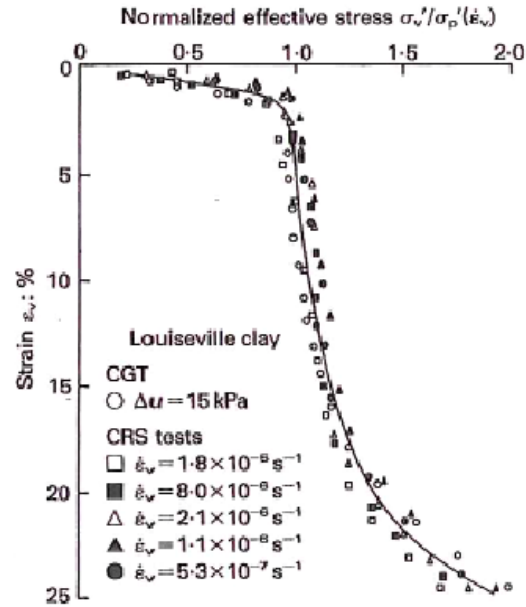
Parametri α_s on muodonmuutoksen ja ajan muutoksen suhde primäärikonsolidaation jälkeen. Parametri α_s voidaan yhdistää sekundääripainumaparametriin C_α , kaavan 16 mukaisesti. Parametrit eroavat siten, että α_s on muodonmuutoksen ja C_α on huokosluvun funktio.

$$\alpha_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \quad (16)$$

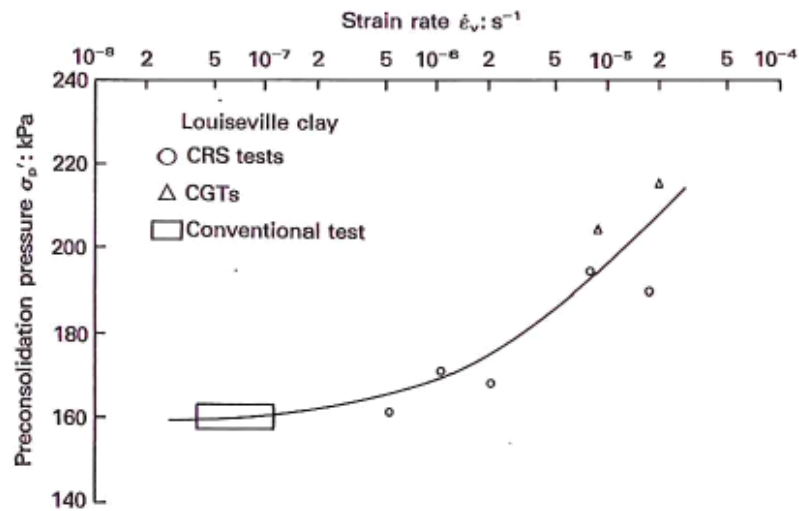
missä

e_0 on initiaalihuokosluku.

Lerouiel et al. (1985) ovat esittäneet, että maalajin vastaavanlainen käyttäytyminen voidaan ilmaista myös kahdella eri kuvaajalla, jotka on esitetty kuvissa 17 ja 18. Kuvassa 17 on esitetty eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen ödometrikokeiden jännitys-koonpuristuvuus-käyrä. Kuvaajan tehokas jännitys on normalisoitu ödometrikokeen esikonsolidaatiojännityksen suhteen. Kuvassa 18 on esitetty muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen.



Kuva 17. Eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen ödometrikokeiden jännitys-koonpuristuvuus-käyrät, joissa tehokas jännitys on normalisoitu koekohtaisella esikonsolidaatiojännityksellä. (Lerouiel et al. 1985)



Kuva 18. Muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen (Lerouiel et al. 1985)

Eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen ödometrikokeiden jännitys-koonpuristuvuus-käyrät yhtenevät kuvassa 17, kun tehokas jännitys normalisoidaan koekohtaisella esikonsolidaatiojännityksellä. Kuvassa 18 huomataan, että esikonsolidaatiojännitys riippuu koonopeudesta ja on pienempi hitaammilla nopeuksilla. Leroueil (2006) on esittänyt että kuvissa esitettyä saven muodonmuutoskäyttäytymistä voi kuvailla kahdella periaatteellisella yhtälöllä. Kaava 17 kuvaa jännitys-muodonmuutos-käyrää, joka on riippuvainen saven ominaisuuksista.

Kaava 18 taas kuvaa esikonsolidaatiojännityksen muodonmuutosnopeusriippuvuutta, joka kuvaa saven rakenteen virumapotentialia.

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_c}(\dot{\varepsilon}_v) = g(\varepsilon_v) \quad (17)$$

$$\sigma'_c = f(\dot{\varepsilon}_v) \quad (18)$$

missä

σ'_c on esikonsolidaatiojännitys,

$\dot{\varepsilon}_v$ on muodonmuutosnopeus,

σ'_v on tehokas pystyjännitys ja

ε_v on muodonmuutos.

Lerouiel et al. (1985) esittivät kaavojen 17 ja 18 perusteella parametrin α kuvaamaan saven aikakäyttäytymistä. Parametrin määrittely on esitetty kaavassa 19.

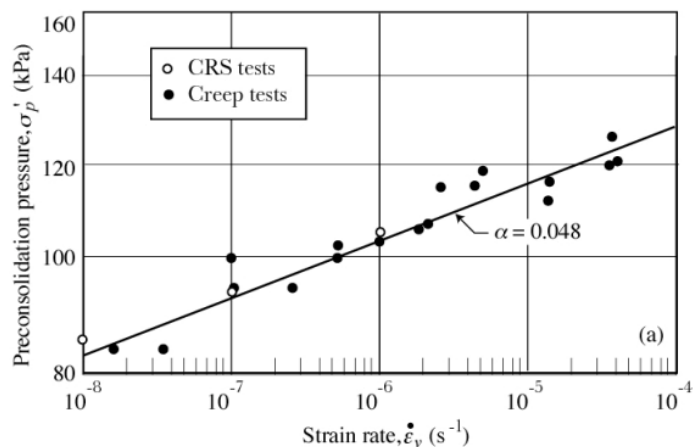
$$\alpha = \Delta \log \sigma'_c / \Delta \log \dot{\varepsilon}_v \quad (19)$$

missä

σ'_c on esikonsolidaatiojännitys,

$\dot{\varepsilon}_v$ on muodonmuutosnopeus.

Parametri α vastaa siis kulmakerrointa esikonsolidaatiojännitys-muodonmuutosnopeuskuvaajassa logaritmisessa asteikossa. Lerouiel et al (1986) määrittivät parametrin arvon Batiscan savelle. Määrittäminen on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Parametrin α määrittäminen Batiscan-savelle. (Lerouiel 1985, Lerouiel 2006 mukaan)

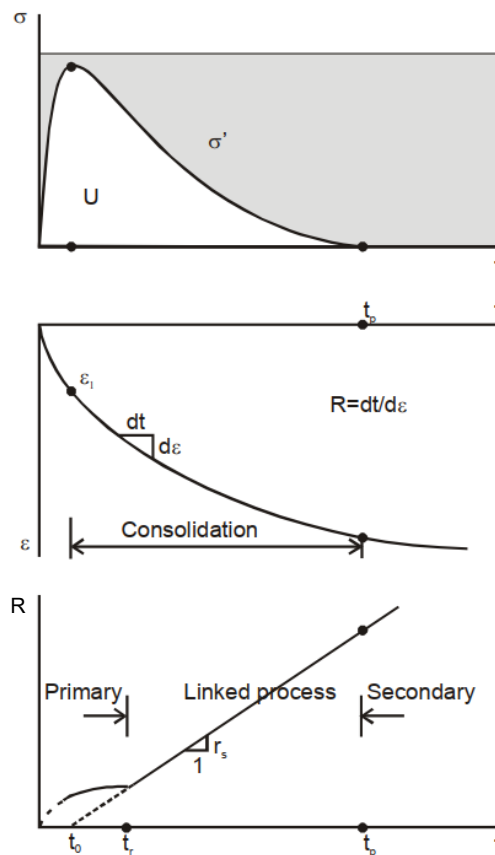
Yksi tapa kuvata virumaa on käyttää Janbun (1969) esittämää parametria R . Se kuvaa ajan aiheuttamaa vastustusta muodonmuutoksessa (engl. the time resistance concept). Parametrin määrittäminen on esitetty kaavassa 20.

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}} \quad (20)$$

missä

t on aika [s],
 ε on muodonmuutos ja
 $\dot{\varepsilon}$ on muodonmuutosnopeus.

Parametrin R on siis aika-muodonmuutoskuvaajan tangentti tietyllä ajan hetkellä. Primääripainuman aikana R-aika -käyrä on parabolinen, mikä on esitetty kuvassa 20. Tietyn ajanhetken, t_0 , jälkeen käyrä muuttuu lineaariseksi.



Kuva 20. Parametrin R ja r_s graafinen määrittely (Janbu 1998, Havel 2004 mukaan)

Primäärisen konsolidaation jälkeisen lineaarisen osan kulmakertoin kuvataan virumaluvulla r_s (creep number), joka on määritelty kaavassa 21.

$$r_s = \frac{dR}{dt} \quad (21)$$

missä

t on aika.

Virumaluku voidaan esittää myös muodonmuutoksen funktiona kaavalla 22.

$$r_s = \frac{\Delta \ln t}{\Delta \varepsilon} \quad (22)$$

missä

t on aika ja

ε on muodonmuutos.

Kaavasta 22 voidaan johtaa virumaluvun r_s yhteys parametriin α_s . Kaavan johtamista ei ole esitetty tässä työssä: lisätietoa löytyy esimerkiksi teoksesta Claesson (2003). Yhteys on esitetty kaavalla 23.

$$r_s = \frac{\ln 10}{\alpha_s} \quad (23)$$

Janbu (1985) määrittäi parametrien C_α suhteelle C_c sekä virumaluvun r_s ja moduuliluvun m suhteelle yhteyden. Yhteyttä voidaan kuvata parametrilla B , jonka määritelmä on esitetty kaavassa 24 (Länsivaara 1999).

$$B = \frac{m}{r_s} = \frac{C_\alpha}{C_c} \quad (24)$$

missä

m on moduuliluku.

Yhteyden avulla on mahdollista määrittää virumaparametreja VRS-ödometrikokeista, joissa yhdessä kokeessa vaihdellaan muodonmuutosnopeutta vähintään kahden eri nopeuden välillä. Yhteys perustuu Lerouielin (2006) esittämään kahteen kuvaan 17 ja 18. Parametrin avulla voidaan kuvata tehokaiden jännitysten ja esikonsolidaatiojännitysten yhteys muodonmuutosnopeuksiin kaavalla 25. (Länsivaara 1995, Länsivaara 1999 mukaan) Alaindeksit kuvaavat kahta eri muodonmuutosnopeutta, sekä niiden avulla määritettyjä jännitysten arvoja.

$$\frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}} = \frac{\sigma'_{cv1}}{\sigma'_{cv2}} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_2} \right)^B \quad (25)$$

missä

σ'_v on tehokas pystyjännitys ja

σ'_{cv} on tehokas esikonsolidaatiojännitys ja

$\dot{\varepsilon}$ on muodonmuutosnopeus.

Pehmeiden skandinaavisten ja kanadalaisten savien B-parametrin arvo on Länsivaaran (1999) mukaan välillä 0,05...0,07. Savilla, joiden humuspitoisuus on suuri, parametrin arvo on suurempi

– laihoilla ja silttisillä savilla taas pienempi. Mitä suurempi B:n arvo on, sitä enemmän aikatekijä vaikuttaa maalajin käyttäytymiseen.

Eri creep-parametrien määrittäminen eroaa toisistaan. Voidaan kuitenkin todeta, että ne ovat voimakkaasti riippuvaisia toisistaan ja kuvaavat samaa ilmiötä.

3.2 Aikatekijän vaikutus eri tutkimuksissa

Aikatekijän on huomattu vaikuttavan useissa eri koetyypeissä. Tähän kappaleeseen on koottu Suomessa yleisesti käytettyjä menetelmiä, joita käytetään pehmeän saven tutkimiseen.

3.2.1 Siipikairaus

Siipikairauksella voidaan määrittää saturoituneen saven suljettu leikkauslujuus in situ. Koetta käytetään paljon pehmeille saville, jotka häiriintyvät helposti näytteenottotilanteessa ja näytteiden käsittelyssä. (Craig 2004) Kokeessa siipi upotetaan tavoitesyvyyteen, jossa sitä sen jälkeen kierretään. Kokeessa maahan painettavan siiven periaatekuva on esitetty kuvassa 21.



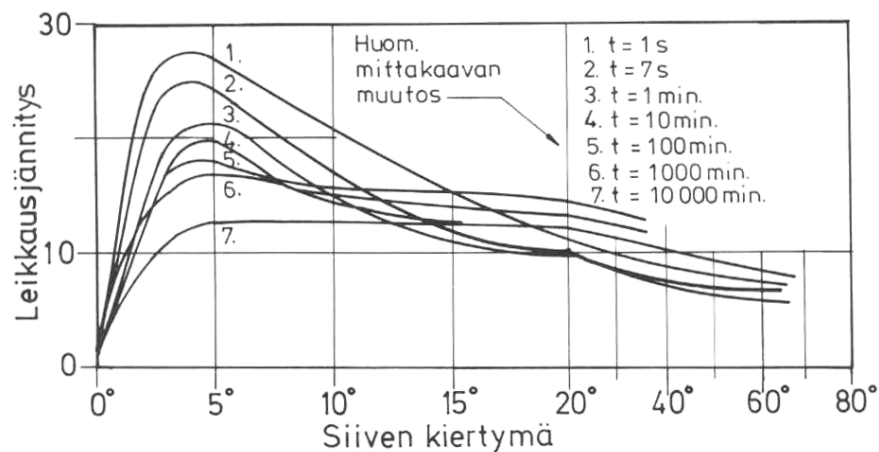
Kuva 21. Siipikairauksen periaate. (Craig 2004)

Siipikairauksesta saatavaa leikkauslujuutta redusoidaan yleisesti. Suomessa käytetään Helenelundin (1977) esittämää hienouslukuun perustuvaa reduktiota. Bjerrum (1973) esitti alun perin reduktiota saven anisotrooppisuuden ja aikatekijän huomioimiseksi

Maan suljettua leikkauslujuutta tutkittaessa siipikairalla on huomattu, että lujuuden arvo riippuu leikkausmuodonmuutoksen nopeudesta. Hitaammilla koenopeuksilla on saatu tavallisesti 20...30 % pienempiä lujuuksia kuin standardinopeuksilla. (Slunga 1990) Siipikairan kiertonopeuden vaikutuksesta suljettuun leikkauslujuuteen on tehty useita tutkimuksia, ja yksi

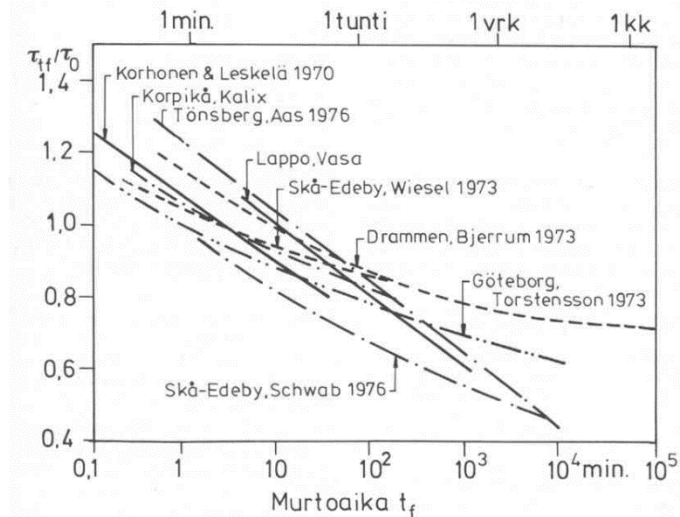
laajimmista on Torstenssonin (1977) tutkimus. Tutkimuksessa tehtiin yli 300 siipikairausta kahdessa eri paikassa. Tutkitut savet olivat normaalikonsolidoituneita ja hyvin plastisia. Tutkimuksessa todettiin, että maksimivääntömomentti riippuu siiven asentamisen ja kokeen aloittamisen välisestä ajasta sekä kokeessa käytettävästä pyörittämisnopeudesta.

Tutkimuksessa tehtyjen siipikairausten pyörittämisnopeuksien vaikutus leikkauslujuuteen on esitetty kuvassa 22. Pienimmällä koe nopeudella maksimivääntömomentti pieneni standardikokeeseen verrattuna 0,66...0,70 kertaiseksi. (Torstensson 1977)



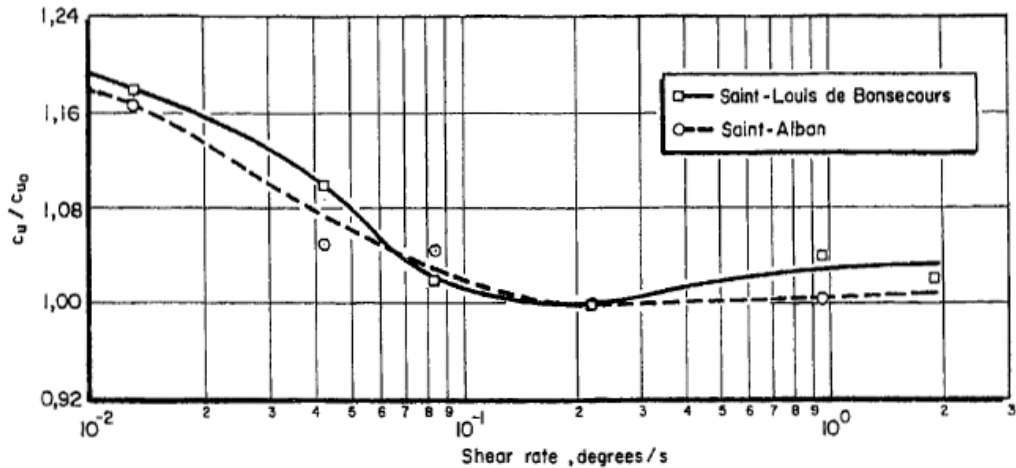
Kuva 22. Siiven kiertonopeuden vaikutus saven leikkauslujuuteen (Torstensson 1977, Slungan 1990 mukaan)

Kuvasta 22 nähdään myös, että pienemmillä nopeuksilla jäännöslujuus on suurempi kuin isommilla nopeuksilla, ja käyrät että leikkaavat toisensa. Muissa siipikairatutkimuksissa on saatu vastaavia tuloksia skandinaavisilla savilla (Helenelund 1977). Tutkimusten tuloksia on koottu kuvaan 23. Vastaavia tuloksia ovat saaneet myös Slunga & Helander (1985) suomalaisilla savilla.

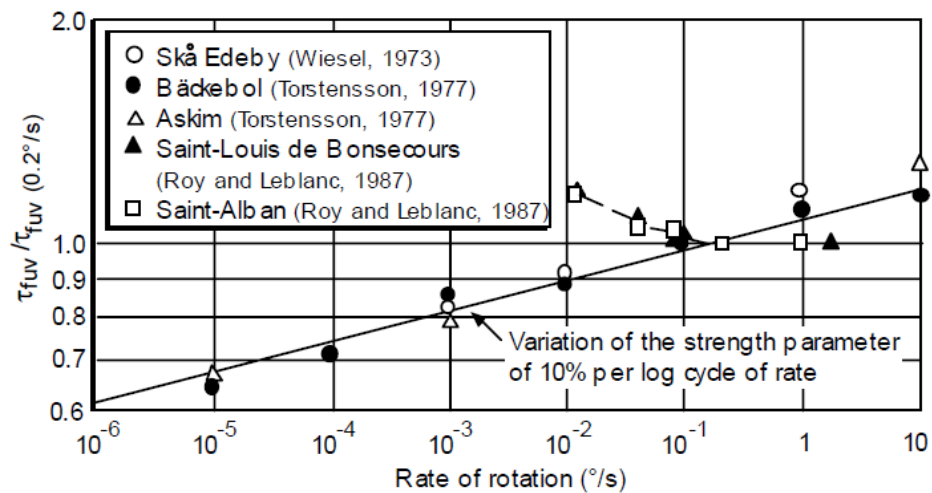


Kuva 23. Siiven kiertonopeuden vaikutus eri savien suljettuihin leikkauslujuuksiin. Kuvaajassa τ_{tf} on leikkausjännitys murtohetkellä t , ja τ_0 on leikkauslujuus standardikokeessa. (Helenelund 1977, Slungan 1990 mukaan)

Edellä mainituissa tutkimuksissa kiertämisnopeuden hidastaminen pienensi suljetun leikkauslujuuden arvoa, mutta kiertämisnopeuden vaikutuksesta on saatu vastakkaisuuntaisia tuloksia. Royn & Leblancin (1988) siipikairakokeet kanadalaisilla St-Louis-de-Bonsecours ja St-Alban -savilla osoittivat, että hitaammilla nopeuksilla suljettu leikkauslujuus voi myös kasvaa. Kiertämisnopeuden pienentäminen ja kasvattaminen suurensivat tutkittujen savien suljettua leikkauslujuutta. Tulokset on esitetty kuvassa 24. Tuloksia on vertailtu muihin tehtyihin siipikairatuloksiin kuvassa 25.



Kuva 24. Siipikairan kiertonopeuden vaikutus leikkauslujuuteen. Kuvaajassa c_u/c_{u0} on eri kiertonopeuksilla saadun suljetun leikkauslujuuden suhde standardinopeudella saatuun suljettuun leikkauslujuuteen. (Roy & Leblanc 1988)



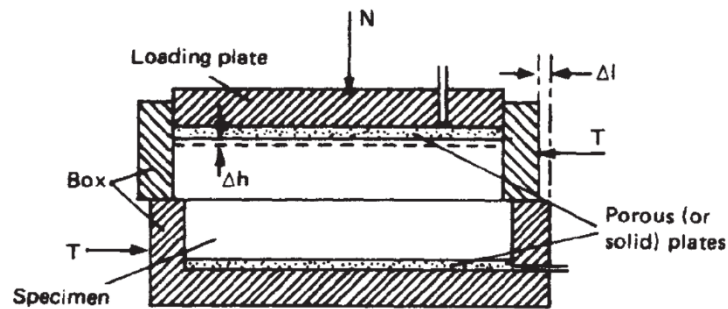
Kuva 25. Siipikairan kiertonopeusvaikutus eri saviin. Kuvaajassa $\tau_{fuv}/\tau_{fuv(0,2^\circ/s)}$ on ko-keessa saavutetun suljetun leikkauslujuuden suhde standardikokeella saatuun suljettuun leikkauslujuuteen. (Lerouiel & Marques 1996, Lerouielin 2006 mukaan)

Kuvasta 25 nähdään, että toisin kuin muilla savilla, Saint-Louis de Bonsecours ja Saint Alban -savilla suljettu leikkauslujuus kasvoi, kun kiertämisnopeus oli alle $0,1^\circ/s$. Suljetun leikkauslujuuden kasvu kyseisillä savilaaduilla johtuu Lerouielin (2006) mukaan todennäköisesti saven osittaisesta konsolidoitumisesta leikkaantumisen aikana.

3.2.2 Rasialeikkauskoe

Rasialeikkauskokeessa näyte asetetaan ympyrän tai neliön muotoiseen metallirasiaan. Rasia on halkaistu vaakasuuntaisesti kahtia keskeltä, ja kahden osan välissä on pieni rako. Huokoskivet asetetaan metallilaatikon ylä- ja alaosaan, jos näytteen halutaan olevan avoimessa tilassa.

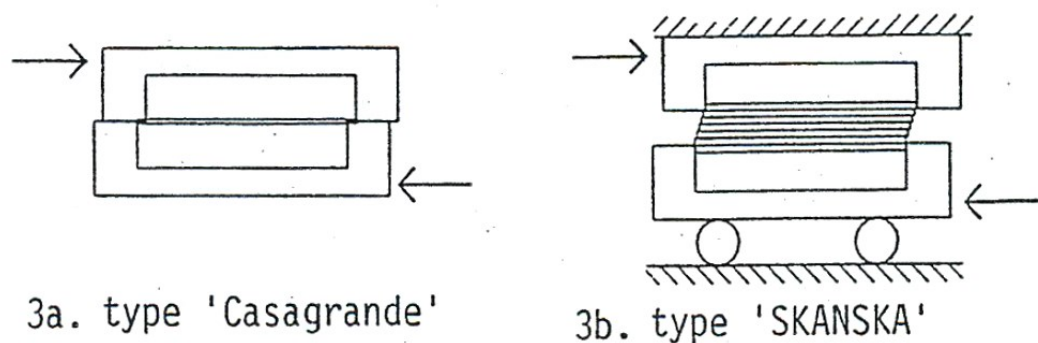
Suljetussa tilassa käytetään huokoskivien tilalla metallilevyjä. (Craig 2004) Kokeen periaate on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Rasialeikkauskokeen periaate. (Craig 2004)

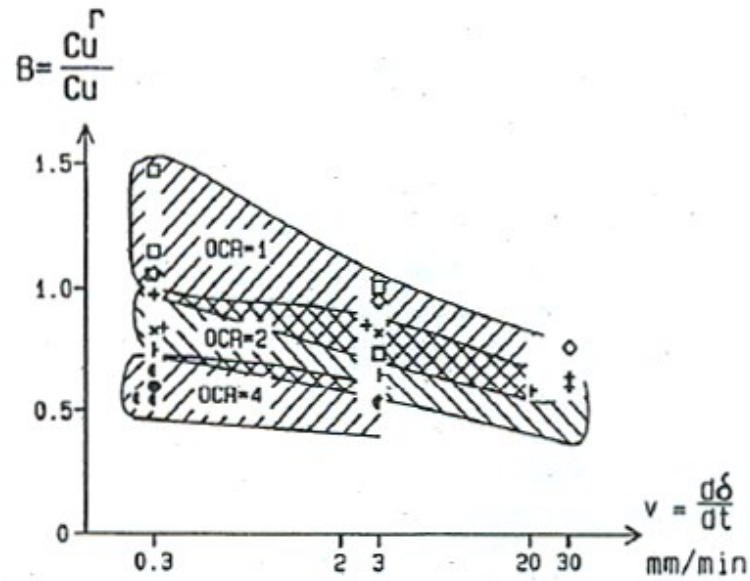
Leikkausjännitys saadaan aikaiseksi kohdistamalla rasian yläosaan pystysuuntainen voima N ja liikuttamalla ylä- ja alaosaa suhteessa toisiinsa. Kokeessa mitataan leikkausvoimaa, vaakasiirtymää sekä tarvittaessa myös näytteen pystysiirtymää. Leikkausmuodonmuutos voidaan kokeen lopussa laskea vaakasiirtymän ja näytteen lähtökorkeuden suhteesta. Tilavuusmuodonmuutos taas saadaan näytteen pystysiirtymän ja lähtökorkeuden suhteesta. (Craig 2004)

Maanvyörymiin liittyviä murtomekanismeja tutkiakseen Bernander et al. (1985) selvittivät muodonmuutosnopeuden ja ylikonsolidoitumisasteen vaikutuksia rasialeikkauskokeen tuloksiin. Kokeessa käytettiin kuvan 27 mukaisia rasialeikkauskoetyyppejä.

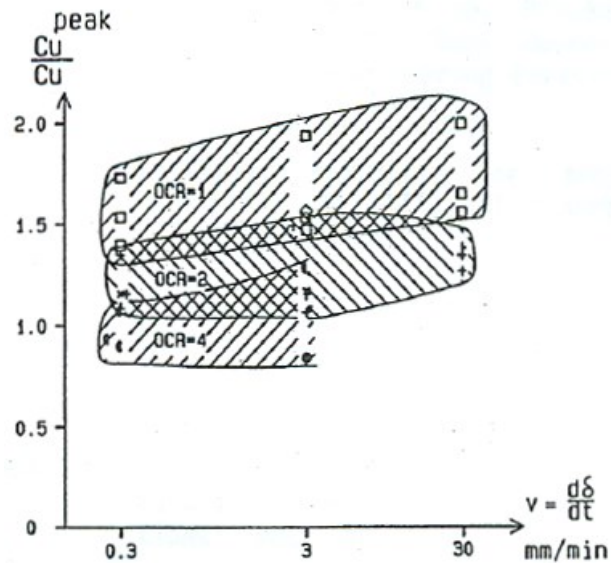


Kuva 27. Tutkimuksessa käytetyt rasialeikkauskoetyypit. (Bernander et al. 1985)

Kokeiden tuloksista nähdään, että kriittisen tilan leikkauslujuus laskee, kun sekä muodonmuutosnopeus että ylikonsolidoitumisaste kasvavat kuvan 28 mukaisesti. Maksimileikkauslujuus taas kasvaa muodonmuutosnopeuden kasvaessa ja pienenee ylikonsolidoitumisasteen lisääntyessä kuvan 29 mukaisesti. (Bernander et al. 1985)



Kuva 28. Suhde C_u^r/C_u muodonuutosnopeuden funktiona. C_u^r on kriittisen tilan leikkauslujuus, ja C_u on leikkauslujuus standardikokeella ylikonsolidoitumisasteen ollessa 1. (Bemander et al. 1985)



Kuva 29. Suhde C_u^{peak}/C_u muodonuutosnopeuden funktiona. C_u^{peak} on maksimileikkauslujuus ja C_u on leikkauslujuus standardikokeella ylikonsolidoitumisasteen ollessa 1. (Bemander et al. 1985)

Tulokset sopivat yhteen muiden laboratorikokeiden kanssa, joissa leikkauslujuudet kasvavat muodonmuutosnopeuksien kasvaessa. Kokeet osoittivat, että kriittisen tilan leikkauslujuus on hyvin riippuvainen muodonmuutosnopeudesta ja ylikonsolidoitumisasteesta. Muodonmuutosnopeuden vaikutus maksimileikkauslujuuteen ei ollut yhtä merkittävä, mutta silti havaittavissa.

3.2.3 Ödometrikokeet

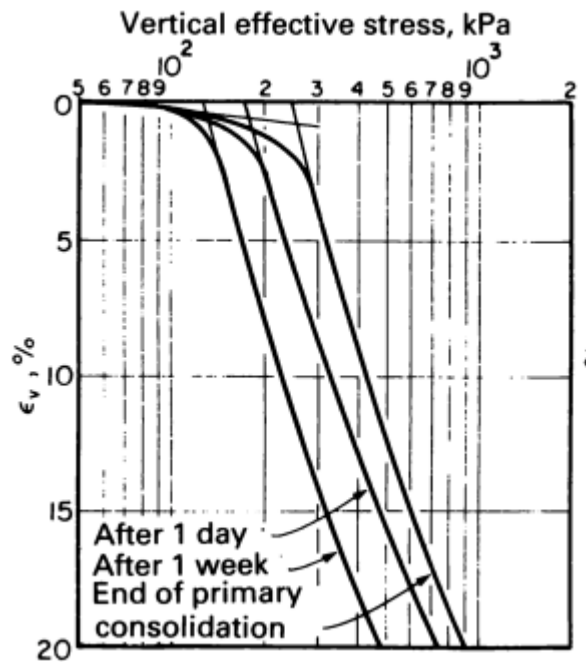
Esikonsolidaatiojännitys ödometrikokeessa kuvaa yhtä pistettä myötöpinnalla. Jos esikonsolidaatiojännityksen arvo riippuu muodonmuutosnopeudesta, voidaan olettaa myös myötöpinnan koon riippuvan muodonmuutosnopeudesta. Esikonsolidaatiojännitys ei kuitenkaan vaikuta myötöpinnan muotoon. (Wood 1990) Asian ovat todenneet esimerkiksi Tavenas et al. (1978) tutkittuaan kuormitusaikojen vaikutusta myötöpinnan kokoon kolmiakselialikokeilla.

Ödometrikokeessa näytteitä kuormitetaan yhden akselin suuntaisesti. Vaakasuuntainen muodonmuutos on estetty. Kokeesta saadaan esikonsolidaatiojännitys kun näyte siirtyy normaalikonsolidoidulle alueelle ja tapahtuu plastisia muodonmuutoksia. Esikonsolidaatiojännitystä pidetään yleisesti suurimpana jännityksenä, joka on joskus kohdistunut maahan. Ödometrikokeesta saatava esikonsolidaatiojännitys voidaan määrittää eri tavoin. (Craig 2004)

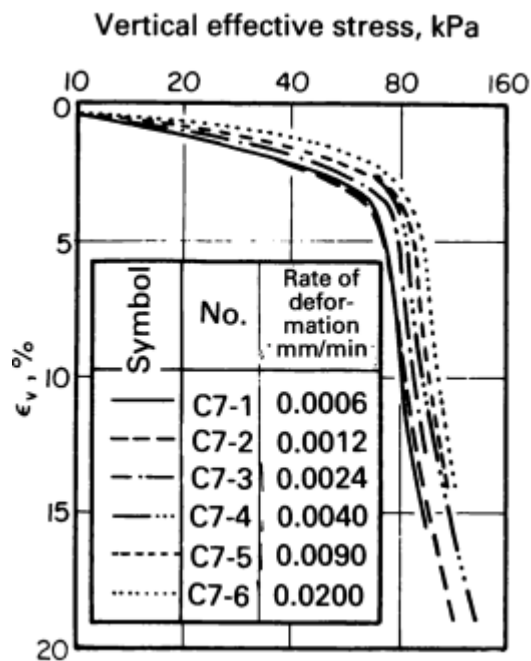
CRS-ödometrikokeessa (*constant rate of strain*) näyte altistetaan tasaiselle muodonmuutosnopeudelle. Kokeen aikana mitataan pystysuuntaista kokonaisjännitystä, huokosvedenpainetta sekä painumista. Painumisesta voidaan määrittää keskimääräinen huokosluku. Muodonmuutosnopeudet ovat yleisesti välillä 10^{-6} ... $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, jolloin kokeet eivät kestä kovin pitkään. Kokeen hyöty on perinteiseen portaittaiseen ödometrikokeeseen verrattuna se, että CRS-kokeesta saadaan jatkuva kokoonpuristuvuusikäyrä, jota voidaan tulkita objektiivisemmin (Lerouiel et al. 1990).

VRS-ödometrikoe (*variable rate of strain*) toimii kuten CRS-ödometrikoe, mutta kokeen aikana vaihdellaan kahta tai useampaa eri muodonmuutosnopeutta. Kokeen oletuksena on, että homogeenisellä savella tehokkaat jännitys-muodonmuutos-käyrät ovat samat, kun ne normalisoidaan esikonsolidaatiojännityksellä. Vaihtelemalla kahta eri muodonmuutosnopeutta voidaan määrittää creep-parametrit. (Länsivaara 2012) Creep-parametrin määrittäminen kyseisellä kokeella on esitetty kappaleen 3.1.2 kaavalla 25.

Saven esikonsolidaatiojännityksen on huomattu pienenevän, kun kuormitus aika kasvaa ja näytteen muodonmuutosnopeus pienenee (Lerouiel et al. 1990). Kuormitusajan kasvamisen vaikutus yksiulotteisessa puristuksessa on nähtävissä kuvasta 30, ja muodonmuutosnopeuden vaikutus kuvasta 31.

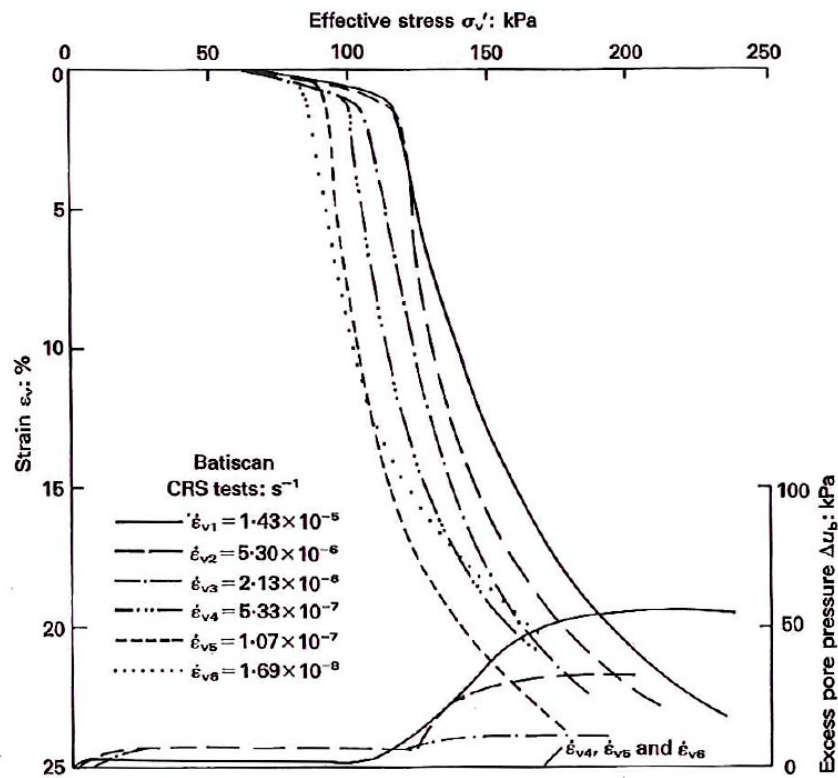


Kuva 30. Portaittainen ödometrikoe Ottawan savesta. (Lerouiel et al. 1990)



Kuva 31. CRS-ödometrikoe Bäckebolin savesta. (Lerouiel et al. 1990)

Tyypillisten CRS-ödometrikokeiden tulokset Batsican-savella on esitetty kuvassa 32. Kuvasta nähdään selvästi, että esikonsolidaatiojännitys pienenee, kun muodonmuutosnopeutta pienennetään.

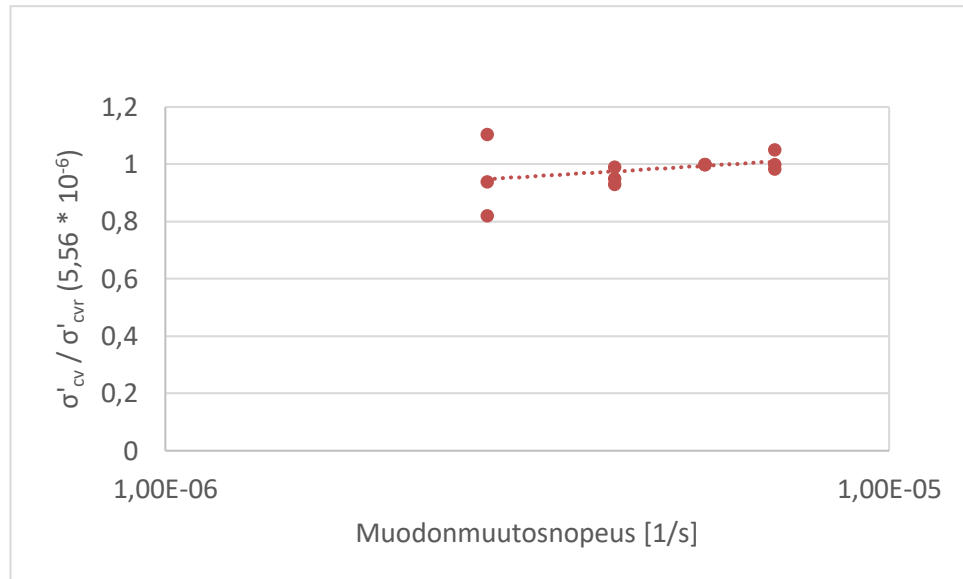


Kuva 32. CRS-ödometrikoheet Batiscan-savella. (Lerouiel et al. 1985)

Myös huokosvedenpaineen suuruus on pienempi hitaammilla nopeuksilla. Alle $5 \cdot 10^{-7}$ 1/s nopeudella huokosvedenpaine on jo niin pieni, että sitä ei kokeessa voitu mitata (Lerouiel et al. 1985). Kuvasta voidaan nähdä myös, että pienimmällä nopeudella käyrä leikkaa muut käyrät. Lerouiel et al. (1985) ehdottavat että tämä johtuu saven rakenteen tiksotrooppisesta kovettumisesta (*thixotropic hardening of the clay skeleton*).

Graham et al. (1983) havaitsivat esikonsolidaatiojännityksen kasvavan 10...20 %, kun muodonmuutosnopeutta kymmenkertaistetaan. Lerouiel (2006) kokosi tuloksia eri tutkimuksista, ja arvioi vastaavan muutoksen olevan noin 9,6 ... 14,8 % orgaanisilla savilla ja silteillä sekä 7,2 ... 12,2 % epäorgaanisilla savilla ja silteillä.

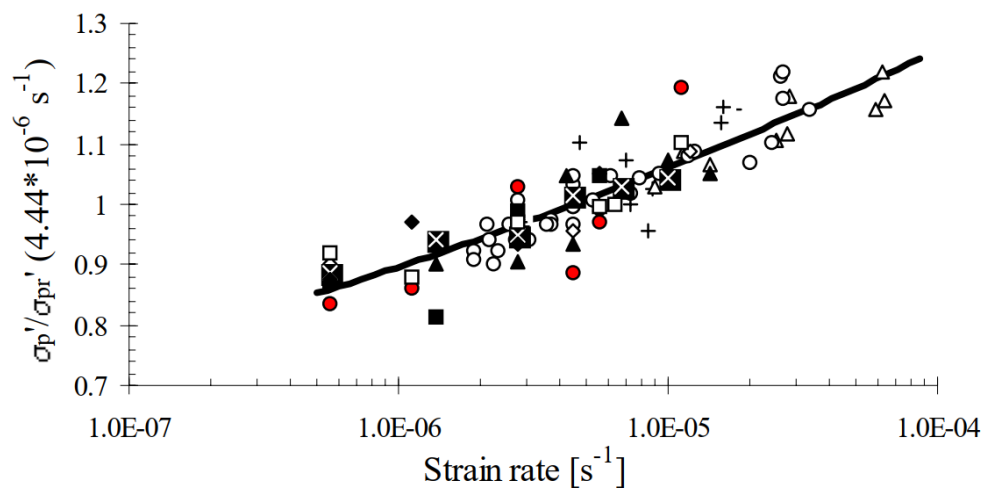
Ruotsissa Eriksson (1985) tutki sulfidisaven nopeusriippuvuutta CRS-ödometrikokeella kolmelta eri syvyydeltä. Tutkimuksessa käytettiin muodonmuutosnopeuksina arvoja 1,0; 1,5; 2,0 ja 2,5 %/h. Määritetyt esikonsolidaatiojännitykset normalisoituna nopeuden 2,0 %/h esikonsolidaatiojännityksellä on koottu kuvaan 33.



Kuva 33. Normalisoidun esikonsolidaatiojännityksen yhteys muodonmuutosnopeuteen ruotsalaisella sulfidisavella (Eriksson 1985)

Sulfidisavien tutkimisessa käytetyt muodonmuutosnopeudet olivat lähellä toisiaan. Nopein nopeus oli 2,5-kertainen hitaimpaan nähden. Hitaimmalla nopeudella saatiin suurempi esikonsolidaatiojännityksen arvo yhdessä kokeessa. Tutkimuksessa ei otettu kantaa sen syyhyn. (Eriksson 1985) Tuloksista määritetyn creep-parametrin B arvo oli 0,067.

Länsivaara (1995) on kerännyt ödometrikoetuloksia 11 eri suomalaisesta savesta ja saanut samansuuntaisia tuloksia kuin Lerouiel. Kuvassa 34 on esitetty normalisoitujen esikonsolidaatiojännitysten yhteys muodonmuutosnopeuteen.



Kuva 34. Normalisoidun esikonsolidaatiojännityksen yhteys muodonmuutosnopeuteen suomalaisilla savilla. (Länsivaara 1999)

Suomalaisilla savilla ödometrikoeteista määritetty creep-parametrin B arvo oli 0,0728. Kyseistä arvoa käytetään Suomessa CRS-koetulosten redusoimiseen siten, että tulos vastaa in situ -

tilanteen nopeutta. In situ vastaavana referenssinopeutena käytetään Suomessa 10^{-7} 1/s (Liikenneviraston ohjeita 10/2012).

3.2.4 Kolmiaksaalikokeet

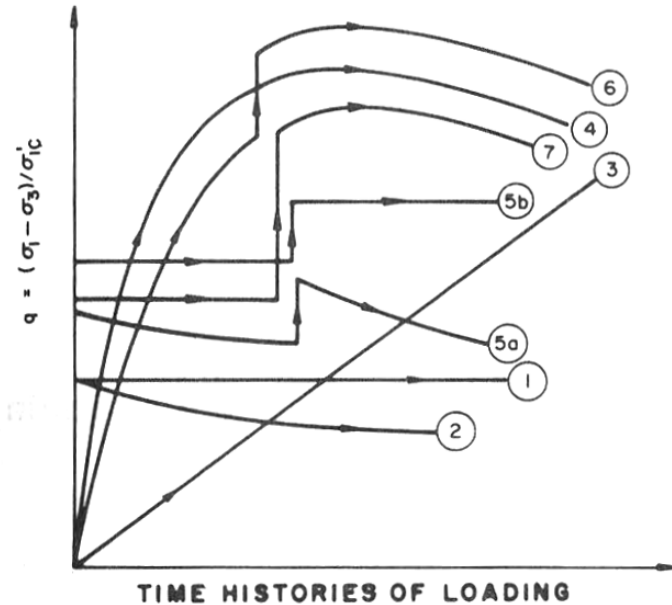
Kolmiaksaalikokeella voidaan määrittää leikkauslujuus ja jännitys-muodonmuutosominaisuuksia kitka- ja koheesiomaasta otetuista näytteistä. Sylinterinmuotoista maanäytettä kuormitetaan kokeessa kolmen kohtisuorassa toisiaan vastaan olevan akselin suuntaisesti. Kokeella jäljitellään täten luonnossa vallitsevaa tilannetta. (Rantamäki et al. 1979)

Kolmiaksaalikokeessa maanäytteeseen vaikuttavat suurin ja pienin pääjännitys. Suurin pääjännitys koostuu sellipaineesta ja kuormituksesta. Pienin pääjännitys koostuu sellipaineesta. Maanäytteelle voidaan tehdä veto- tai puristuskokeita. Vetokokeessa pystyjännitys pidetään tasaisena ja sellipainetta kasvatetaan, kunnes näyte murtuu. Puristuskokeessa näyte murretaan pitämällä sellipaine tasaisena ja kasvattamalla pystyjännitystä.

Suljetussa kolmiaksaalikokeessa näytteen annetaan konsolidoitua joko isotrooppisesti tai anisotrooppisesti. Isotrooppisessa konsolidoinnissa näytettä kuormitetaan vain sellipaineella. Anisotrooppisessa konsolidoinnissa kuormitetaan näytettä sellipaineen lisäksi deviatorisella jännityksellä. Anisotrooppinen konsolidointi vastaa paremmin jännitystä luonnontilaisessa maassa. Leikkauslujuusparametrit lasketaan koetuloksien jännityspolkukuvaajista tai Mohrin jännitysympyröistä.

Kolmiaksaalikokeet konsolidoidaan haluttuun jännitystilaan niiden käyttötarkoituksen perusteella. Mikäli halutaan tutkia luonnontilaisen maan käyttäytymistä in-situ jännityksessä, tulee konsolidointijännityksen olla tätä vastaava. Ylikonsolidoituneella savella ollaan tällöin myötöpinnan sisäpuolella ja normaalikonsolidoituneella savella myötöpinnalla, tai sen välittömässä läheisyydessä. Tutkittaessa saven in-situ suljettua leikkauslujuutta näytteet konsolidoidaan yleensä enintään in situ jännitykseen. Kitkakulman määrittämisessä konsolidointi tehdään sitävastoin yleensä in-situ jännitystä suuremmalle jännitykselle.

Kolmiaksaalikokeen suoritukselle on olemassa monta suoritustapaa. Suoritustavat on esitetty kuvassa 35. Tässä diplomityössä on keskitytty kolmiaksaalikokeisiin 1, 2 ja 4, joita on käytetty yleisesti tutkimuksissa, joissa aikatekijää on tutkittu.



Kuva 35. Näytteen kuormittaminen kolmiakksiaalikoeksessa. 1 on creep-koe vakiojännityksellä ja 2 on creep-koe vakiokuormituksella. 3 on kolmiakksiaalikoje jatkuvalle kuormitusnopeudella ja 4 on jatkuvalle muodonmuutosnopeudella. 5a ja 5b ovat askel-creep-kokeita: a jatkuvalle kuormituksella ja b jatkuvalle jännityksellä. 6 on jatkuva muodonmuutosnopeus askelittaisella nopeuden kasvatuksella. 7 on jatkuva creep-koe, jonka jälkeen koetta jatketaan jatkuvalle muodonmuutosnopeudella. (Vaid & Campanella 1977)

Savien lujuus- ja muodonmuutuskäyttäytymistä eri nopeuksilla kolmiakksiaalikoeksissa on tehty useita tutkimuksia. Muodonmuutosnopeudesta käytetään yleisesti termiä $\dot{\epsilon}$, joka muodostuu kaavan 26 mukaisesti.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (26)$$

missä

$\dot{\epsilon}$ on muodonmuutosnopeus [%/h],

$d\epsilon$ on pystysiirtymän derivaatta [%] ja

dt on ajan derivaatta. [h].

Kokeissa on huomattu, että yleisesti lujuus kasvaa 5...10 %, kun muodonmuutosnopeus 10-kertaistuu. Asia on huomattu sekä normaalikonsolidoituneilla että ylikonsolidoituneilla savilla. Savinäyte on myös voinut olla häiriintymätön tai uudelleen rakennettu, ja vaikutus on silti ollut samaa suuruusluokkaa. (Vaid & Campanella 1977)

Lefebvre & LeBoeuf (1987) tutkivat kanadalaisia savia muodonmuutosnopeuksilla 0,05...132 %/h monotonisissa jännityskokeissa sekä maksimissaan 6 %/h jännitysohjatuissa kokeissa. Saven mekaaninen käyttäytyminen riippui vahvasti siitä, olivatko käytetyt jännitystasot suurempia kuin esikonsolidaatiojännitys. Savien suljetun leikkauslujuuden muutokset vaihtelivat 2...14 % välillä,

kun muodonmuutosnopeutta muutettiin dekadin verran. Tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. *Kanadalaisten savien suljetun leikkauslujuuden muutos prosentteina, kun muodonmuutosnopeutta muutetaan dekadin verran. (Lefebvre & LeBoeuf 1987)*

Savi	Ylikonsolidoitunut	Normaalikonsolidoitunut
Grande Baleine (pato 12)	8<	7
Grande Baleine (pato 39)	2	7
Olga	12	13
B6	14	9
B6	-	13
St. Jean Vianney (ylempi kerros)	-	11
St. Jean Vianney (alempi kerros)	-	9
Keskimääräinen arvo	10,7	9,9

Useissa muissa tutkimuksissa on todettu, että eri muodonmuutosnopeuksilla tehdyissä kolmiakiaalikoikeissa syntyvä huokosvedenpaine on sitä pienempi mitä suurempi muodonmuutosnopeus on, kun koe on tehty suljetussa tilassa. (Lefebvre & LeBoeuf 1987; Sheahan et al. 1996)

Yksi tapa vertailla eri savien lujuuden nopeusvaikutusta on käyttää arvoa, joka on suljetun leikkauslujuuden muutos, kun muodonmuutosnopeutta muutetaan dekadin verran, jaettuna referenssinopeuden suljetulla leikkauslujuudella kaavan 27 mukaisesti. Saadusta arvosta käytetään termiä $\rho_{\dot{\epsilon}}$, jossa $\dot{\epsilon}$ on referenssinopeus.

$$\rho_{\dot{\epsilon}} = \frac{S_{u,\dot{\epsilon}}}{S_{u,ref}} \quad (27)$$

missä

$\rho_{\dot{\epsilon}}$ on suhdeluku

$S_{u,\dot{\epsilon}}$ on suljettu leikkauslujuus kuormitusnopeudella $\dot{\epsilon}$ ja

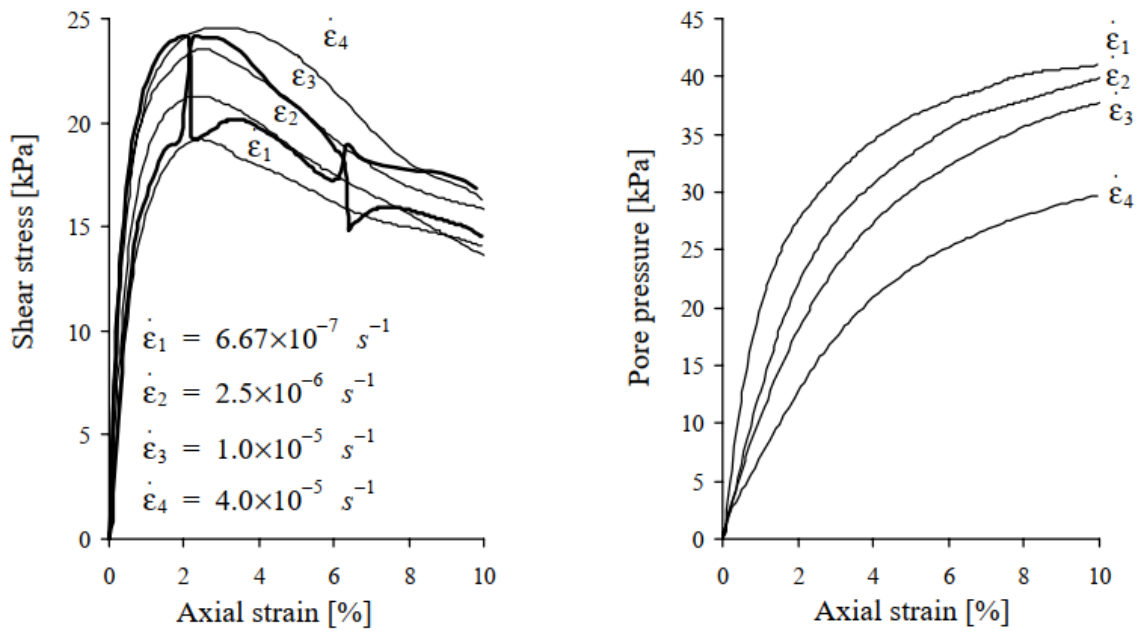
$S_{u,ref}$ on suljettu leikkauslujuus referenssinopeudella.

Taulukkoon 3 on koottu eri tutkimuksista saatujen $\rho_{\dot{\epsilon}}$:n arvoja normaalikonsolidoituneilla savilla.

Taulukko 3. Eri tutkimuksissa saatujen ρ_ε -arvojen vertailua.

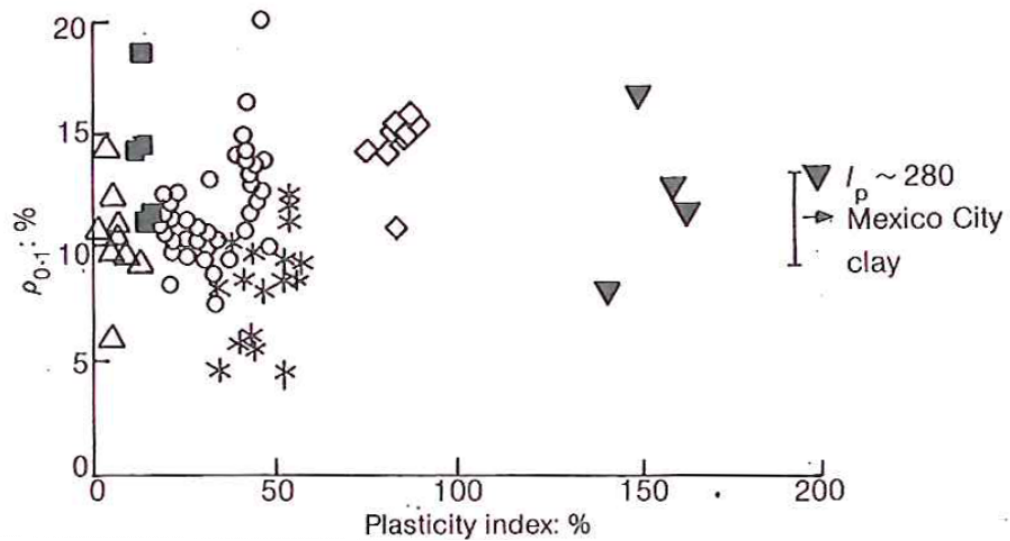
Referenssi	Testattu savi	Testityyppi	ρ_ε [%]	$\dot{\varepsilon}$ [%/h]
Vaid & Campanella (1977)	Haney Clay (OCR=1)	CIUC	$\rho_{0,5} = 9,8$	0,24...66
Graham et al. (1983)	Belfast Clay (OCR=1)	CIUC, CAUC	$\rho = 12...14$	5; 0,5; 0,05
Lefebvre & LeBoeuf (1987)	Useita (OCR=1)	CIUC, CAUC	$\rho_{1,0} = 9,3$	0,05...132
O'Reilly et al. (1989) ⁽¹⁾	Keuper Marl (OCR=1)	CK ₀ UC	$\rho_{0,5} = 15$	0,54 ja 2,4
Sheahan (1996)	Boston Blue Clay (OCR=1)	CK ₀ UC	$\rho_{0,5} = 6,5$	0,05...50
(Zhu & Yin 2000)	Hong Kong marine Clay (OCR=1...8)	CIUC, CIUE	C: $\rho_{0,15} = 5,5$ E: $\rho_{0,15} = 8,4$	0,15; 1,5; 15 -0,15; -1,5; -15

Länsivaara (1996) on tutkinut suomalaisia savia kolmiakiaalikoikeessa eri muodonmuutosnopeuksilla. (katso Länsivaara 1999) Kuvassa 36 on vasemmalla esitetty muodonmuutosnopeuden vaikutus leikkausjännitykseen ja oikealla huokosvedenpaineeseen. Hitaimmalla nopeudella saadaan pienen leikkausluujus ja suurin huokosvedenpaine – nopeimmalla muodonmuutosnopeudella taas toisinpäin.



Kuva 36. Muodonmuutosnopeuden vaikutus leikkausjännitykseen ja huokosvedenpaineeseen. Vasemman kuvan kaksi tummempaa viiva ovat kokeita, joissa muodonmuutosnopeutta on muutettu nopeimman ja hitaimman nopeuden välillä. (Länsivaara 1996, Länsivaaran 1999 mukaan).

Graham et al. (1983) tutkivat lievästi ylikonsolidoituneita savia kolmiaksaali- ja ödometrikokeilla, sekä kokosivat vastaavia tutkimuksia yhteen. Tutkimuksessa todettiin, että esikonsolidaatiojännityksen ja suljetun leikkauslujuuden muutoksen suuruus on noin 10...20 %, kun nopeus kymmenkertaistuu. Suljetun leikkauslujuuden muutoksen suuruus ei ollut riippuvainen plastisuusluvusta tai jännitystasosta eikä myöskään siitä oliko näyte konsolidoitu isotrooppiseen tai anisotrooppiseen jännitystilaan. Kuvassa 37 on vertailtu eri savien plastisuuslukua sekä arvoa $\rho_{0,1}$.



Kuva 37. Plastisuusluvun vaikutus p_{ϵ} :hen, kun vertailumuodonmuutosnopeus on 0,1 %/h. (Graham et al. 1983)

Bjerrum (1973) on taas arvioinut, että plastisuusluku vaikuttaisi aikatekijään, ja ehdottanut sen perusteella reduktiota siipikairauksesta saatavaan suljettuun leikkauslujuuteen kaavalla 28.

$$s_u = s_{u,mitattu} \cdot \mu_R \cdot \mu_A \quad (28)$$

missä

s_u on saven suljettu leikkauslujuus,

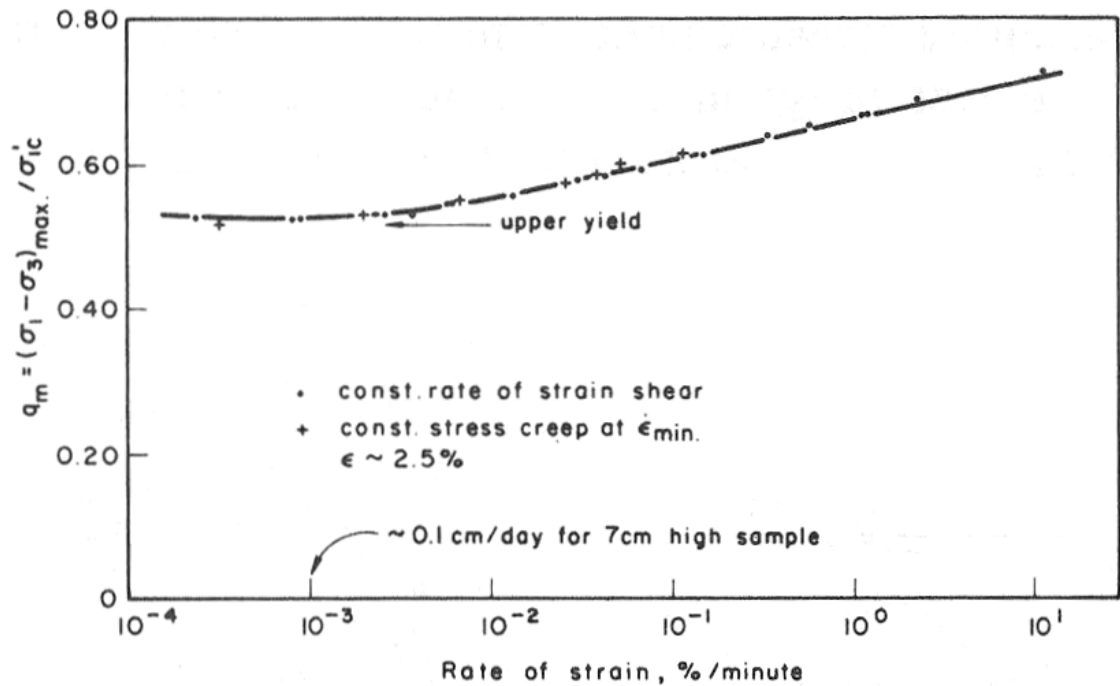
$s_{u,mitattu}$ on siipikairalla mitattu suljettu leikkauslujuus,

μ_R on aikatekijän huomioiva korjauskerroin ja

μ_A on anisotrooppisuuden huomioiva korjauskerroin.

Kuvasta 37 voidaan kuitenkin päätellä, että plastisuusluvun ja aikatekijän korrelaatio ei ole selvä. Myöskään Länsivaara (1999) ei havainnut suomalaisilla savilla, että aikatekijää kuvaava parametri B olisi riippuvuutta plastisuudesta.

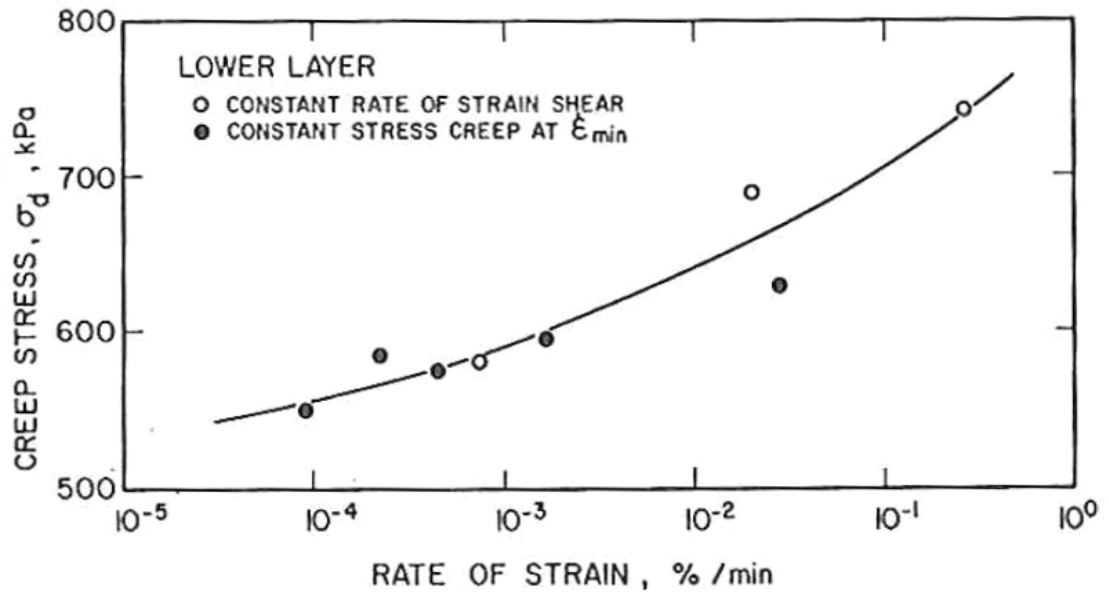
Vaid & Campanella (1973) huomasivat, että s_u -log $\dot{\epsilon}$ käyrä tasoittuu, kun saavutetaan tarpeeksi pieni muodonmuutosnopeus. Esimerkkinä tästä on kuva 38, josta nähdään, että suljettu leikkauslujuus ei pienene, kun saavutetaan ylempi myötö (*upper yield*). Termillä tarkoitetaan tutkimuksessa muodonmuutosnopeuden kynnsarvoa, jonka alapuolella leikkausmurtumista ei tapahtunut enää millään creep-kokeen saavuttamalla muodonmuutosnopeudella.



Kuva 38. Suljetun leikkauslujuuden riippuvuus muodonmuutosnopeudesta kanadalaisella Haney-savella. Kuvaajassa q_m on esikonsolidaatiojännityksellä normalisoitu deviatorinen maksimijännitys. (Vaid & Campanella 1977)

Kanadalaisessa tutkimuksessa tarkasteltiin voimakkaasti ylikonsolidoituneen saven kokoonpuristuvuutta sekä suljettua leikkauslujuutta. Savinäytteet otettiin Jean-Vianneystä Kanadasta. Käytetyn saven kokoonpuristuvuus on hyvin voimakasta kuormituksessa, joka ylittää saven esikonsolidaatiojännityksen. Suljettu leikkauslujuus pieneni vakimuodonmuutosnopeudella tehdyissä kolmiakiaalikoikeissa, kun muodonmuutosnopeutta pienennettiin. Samoin tapahtui suljetun tilankuormitteisten creep-kolmiakiaalikoikeiden leikkauslujuuksille. Niissä pienennettiin kuormitusta, jolloin myös muodonmuutosnopeus pieneni. Muodonmuutosnopeuden kymmenkertaistaminen kasvatti suljettua leikkauslujuutta 7,5...8,6 %. (Vaid et al. 1979)

Tutkimuksessa vertailtiin vakimuodonmuutosnopeudella tehtävien kolmiakiaalikoikeiden maksimideviatorista jännitystä creep-kokeissa käytettyyn vakiojännitykseen, joka pidettiin samana kokeen ajan. Vaaka-akseli on kolmiakiaalikoikeille käytetty vakimuodonmuutosnopeus ja creep-kokeille minimi muodonmuutosnopeus. Vertailu on esitetty kuvassa 39.

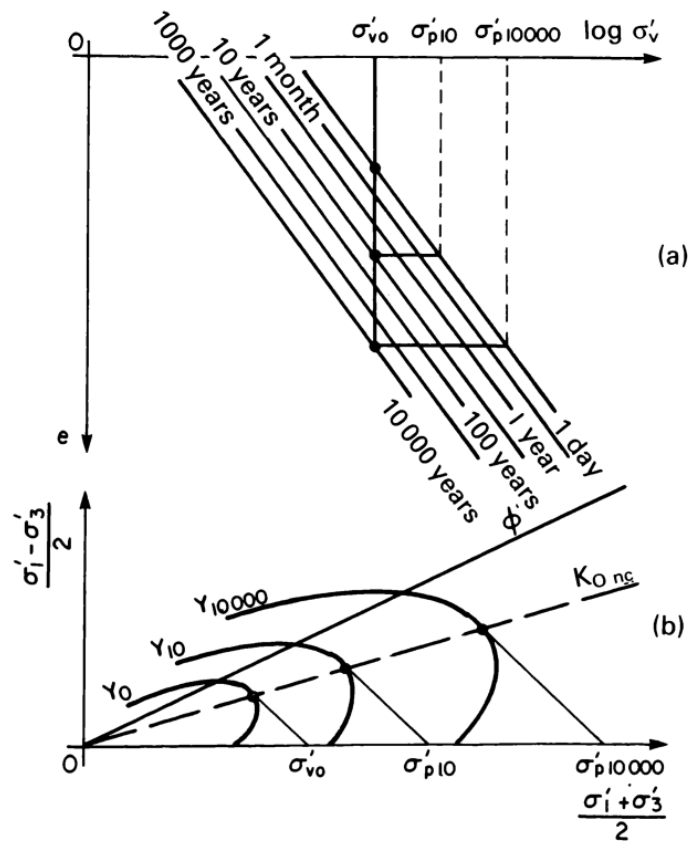


Kuva 39. Muodonmuutosnopeus creep-kolmiaksaalikokeissa ja kolmiaksaaliko-
keissa eri muodonmuutosnopeuksilla. (Vaid et al. 1979)

Kuvasta voi havaita, että creep-kokeiden pienin muodonmuutosnopeus ja käytetty kuorma olivat lähellä vakio muodonmuutosnopeudella tehdyn kolmiaksaaliko-
keiden nopeuksia ja suurimpia saavutettuja deviatorisia jännityksiä. (Vaid et al. 1979) Vastaavan suuntaisia tuloksia olivat saaneet myös Vaid & Campanella (1977) aiemmin.

3.3 Hypoteesi kuormitusnopeuden ja -ajan vaikutuksesta sul- jettuun leikkauslujuuteen

Saven ollessa jatkuvan tehokkaan jännityksen alaisena, huokosluku pienenee viruman myötä. Huokosluvun pienenemisen myötä esikonsolidaatiojännitys kasvaa. Esikonsolidaatiojännityksen suuruus määrittää myötöpinnan suuruuden (Leroueil et al 1990). Tätä on havainnollistettu kuvassa 40, jossa ylemmässä kuvaajassa on esitetty esikonsolidaatiojännitykset eri ikäisille 0, 10 ja 10000 vuoden ikäiselle savilla ja alempana niitä vastaavat myötöpinnat. 0-vuotias savi on normaalikonsolidoitunutta esikonsolidaatiojännityksen ollessa σ'_{v0} . 10- ja 10000-vuotiailla savilla esikonsolidaatiojännitys kasvaa vallitsevaa jännitystä suuremmiksi: σ'_{p10} ja σ'_{p10000} . Lerouiel et al (1990) ovat ehdottaneet, että ikääntyminen ei vaikuta pelkästään esikonsolidaatiojännitykseen, vaan myös myötöpinnat laajenevat alemman kuvaajan mukaisesti myötöpinnoiksi Y10 ja Y10000.



Kuva 40. Saven ikääntymisen vaikutus myötöpintaan. (Lerouiel et al 1990)

Kun myötöpinta laajenee, savi pyrkii kokoonpuristumaan. Suljetussa tilassa kokoonpuristumaa ei pääse kuitenkaan tapahtumaan. Tämä tilavuuden muodonmuutoksen estyminen aiheuttaa saven huokosvedenpaineen kasvun, jolloin tehokas jännitys pienenee, minkä seuraksena leikkauslujuus pienenee. Huokosvedenpaineen kasvu voi olla suurempi kuin lisätty kuorma johtuen tästä käyttäytymisestä (Länsivaara et al. 2011).

Suuremmilla muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kolmiakiaalikoekiden mitatut lujuudet ovat suuremmat kuin hitaammilla nopeuksilla. Lisäksi suurempi muodonmuutosnopeus kasvattaa ödometrikokeesta mitattua esikonsolidaatiojännitystä. Muodonmuutosnopeus vaikuttaa täten myötöpinnan kokoon: mitä suurempi on nopeus, sitä suurempi on myötöpinta. Yksi selitys ilmiölle on se, että hitaammalla muodonmuutosnopeudella virumaa tapahtuu enemmän eli alttius tilavuusmuodonmuutokseen on suurempi johtuen suurempaan huokosvedenpaineeseen. Tällöin myös leikkauslujuus pienenee, koska tehokas jännitys pienenee. Saven alttius virumiselle vaikuttaa siihen, kuinka paljon huokosvedenpaine kasvaa, kun käytetään eri muodonmuutosnopeuksia. Mitä suurempi tämä creep-potentiaali on, sitä enemmän muodonmuutosnopeuden pienentäminen kasvattaa myös huokosvedenpaineen huippua ja samalla pienentää lujuutta. Creep-potentiaalia voidaan kuvata esimerkiksi parametrilla B , joka on esitelty aiemmin kappaleessa 3.1.2.

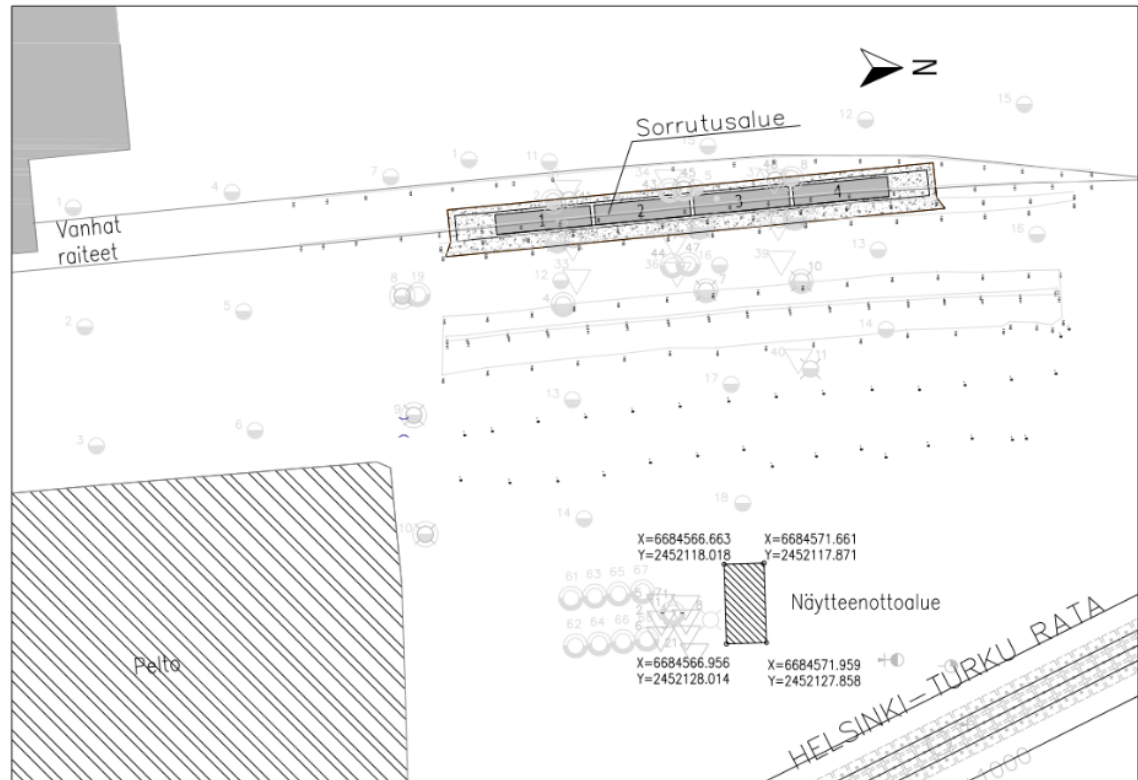
4. LABORATORIOKOKKEET AJAN VAIKUTUKSEN TUTKIMISEKSI

4.1 Näytteenotto

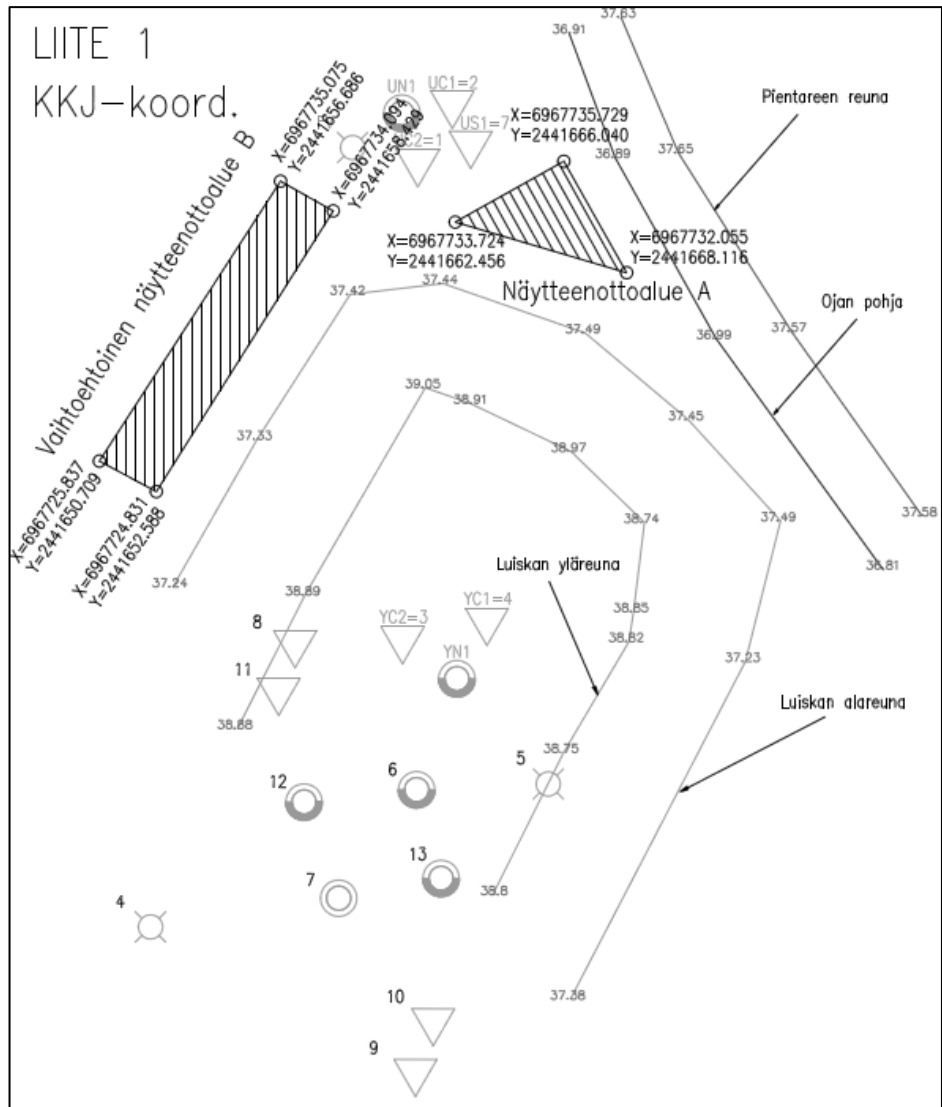
Savinäytteet otettiin Murrosta ja Perniöstä. Valinta perustui siihen, että alueiden savista löytyi tutkimustietoa jo valmiiksi ja kohteiden savilaadut eroavat myös toisistaan. Näytteet otettiin 86 mm halkaisijan näytteenottomella, jolla oli mahdollista saada paremmin hyvälaatuisia näytteitä.

4.1.1 Kohteet

Perniössä näytteet otettiin noin sadan metrin päästä kohdasta, jossa tehtiin sorrutuskoe vuonna 2009. Murrossa näytteet otettiin läheltä vanhaa koepengertä. Näytteenottosyvyydet olivat Perniössä 2,5...3,5 metriä ja Murrossa 4,0...5,0 metriä. Näytteet otettiin kummassakin kohteessa kolmesta pisteestä 2 metrin etäisyydellä toisistaan. Jokaisesta pisteestä otettiin 3 näyteputkellista näytettä. Näytteenottoaikat on esitetty kartalla kuvissa 41 ja 42.



Kuva 41. Näytteenottoalue Perniössä.



Kuva 42. Näytteenottoalue Murrossa. Näytteet otettiin karttaan merkityltä alueelta A.

4.1.2 Näytteenotin

Näytteenottimena toimi Aalto-yliopiston norjalaistyyppinen mäntäotin, jonka halkaisija oli 86 mm. Näytteenotin on esitetty kuvassa 43. Näytteenottimessa käytettiin näyteputkia, joihin mahtui näytettä noin 45 mm. Näyteputkien alaosat oli hiottu teräväksi, mikä minimoi maan häiriintymistä. Kuvassa 44 on esitetty käytetty näyteputki.



Kuva 43. 86 mm:n norjalaistyyppinen mäntäkaira. Mäntä on kuvassa kiertämistä vaille yläasennossa.



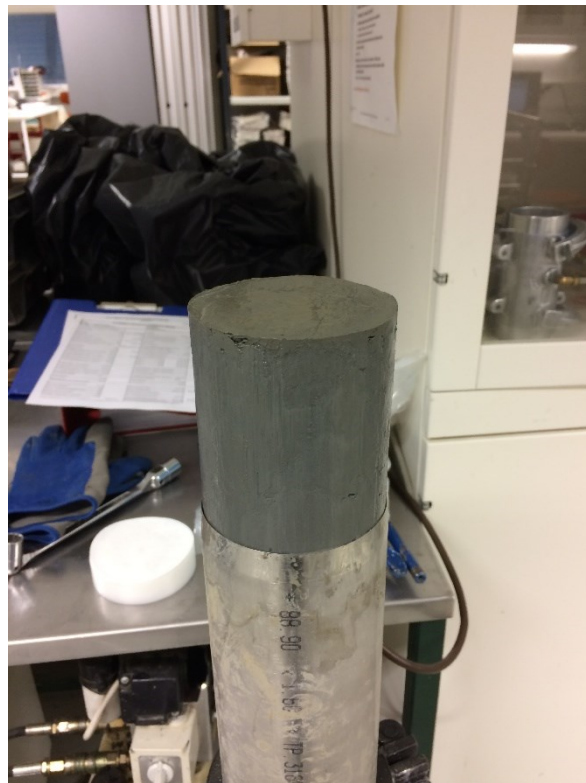
Kuva 44. 86 mm:n näyteputki.

Tavoitesyvyydessä mäntä vapautettiin kiertämällä sisätankoa, jonka jälkeen ulkotankoa painettiin alaspäin ja näyteputki upposi maahan. Tämän jälkeen mäntä lukittiin ylös kiertämällä sisätankoa, jolloin syntyi vielä noin 70 mm tyhjätila otetun näytteen ja männän väliin. Koko näytteenotinta painettiin alaspäin vielä sen verran että tyhjätila täyttyi. Näytteen häiriintymisen kannalta kriittiset vaiheet olivat männän vapauttamisen ja lukitsemisen jälkeinen näyteputken painaminen alas, jolloin näytteenotinta painetaan helposti liikaa, vaikka näyteputki on jo täynnä.

Painamisesta syntyvää riskiä vähennettiin näytteenottotilanteessa mittaamalla, että näytteenotin painui alaspäin vain sen verran kuin näyteputkessa oli vielä tyhjää tilaa.

4.1.3 Yhteenveto

Perniön saven näytteenotto onnistui hyvin. Perniön näyteputkien näytteet olivat pääsääntöisesti hyvälaatuisia. Näyteputkesta V5 tehdyistä kolmiakksiaalikokeista epäonnistui kolme neljästä. Näyteputki V6 putosi kairakoneesta, kun näyteputkea nostettiin ylös maasta. Näyteputken pää vääntyi, mikä häiritsi näytteen poistoa putkesta. Yhden näyteputken näyte on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Savinäyte Perniöstä.

Perniön näyteputket ja niitä vastaavat syvyudet on esitetty taulukossa 4. Näytteenottosyvyys oli 2,5 ... 4 m.

Taulukko 4. *Perniön näyteputket ja näytteenottosyvyudet.*

Näyteputki	Näytteenottosyvyys [m]
V1	2,5-3,0
V2	3,0-3,5
V3	3,5-4,0

V4	2,5-3,0
V5	3,0-3,5
V6	3,5-4,0
V7	2,5-3,0
V8	3,0-3,5
V9	3,5-4,0

Murrosta ei saatu kunnollisia näytteitä. Ylimmistä näyteputkista löytyi hiekkaa ja juuria. Syvemmältä otettujen näytteiden laatu oli silmämääräisesti parempi, mutta näytteistä löytyi simpukoita ja niistä tehdyt ödometrikokeet epäonnistuivat. Kuvassa 46 on esitetty näyteputki M1 ja sen sisältämää näytettä.



Kuva 46. Savinäyte Murrosta

Näyteputkista M1 ja M4 saatiin otettua silmämääräisesti homogeeniset näytteet ödometrikokeisiin, ja molemmista putkista tehtiin kaksi ödometrikoeetta. Kokeet kuitenkin

epäonnistuivat. Tämän jälkeen kahdelta muulta syvyydeltä tehtiin yksi ödometrikoe, jolla pyrittiin selvittää näytteiden laatua. Ne myös epäonnistuivat. Murron näyteputket ja niitä vastaavat syvyydet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. *Murron näyteputket ja näytteenottosyvyydet.*

Näyteputki	Näytteenottosyvyys [m]
M1	4,0-4,5
M2	4,5-5,0
M3	5,0-5,5
M4	4,0-4,5
M5	4,5-5,0
M6	5,0-5,5
M7	4,0-4,5
M8	4,5-5,0
M9	5,0-5,5

4.2 Ödometrikokeet

Koenäytteiden korkeus oli 15 mm ja poikkipinta-ala 15 cm². Kokeet tehtiin häiriintymättömistä näytteistä. Kokeet tehtiin sarjoissa, joissa käytettiin neljää eri muodonmuutosnopeutta. Tehdyt kokeet ja niissä käytetyt muodonmuutosnopeudet on esitetty taulukossa 6. Lyhytaikaisimmat kokeet kestivät noin tunnin ja pitkäaikaisimmat useamman viikon.

Taulukko 6. *Yhteenveto Perniön saven ödometrikoesarjoista.*

Koe-sarja	Koenumero	Näyteputki	Näytteen syvyys [m]	Koenopeus [mm/min]	Koenopeus [%/h]
1	I277_1	V1	2,96...2,98	0,01	0,067
	I277_2a	V1	2,94...2,96	0,01	0,067
	I277_3	V1	2,92...2,94	0,0015	0,010
	I277_4	V1	2,90...2,92	0,0001	0,001
	I277_5	V1	2,88...2,90	0,0005	0,0036

2	I277_13	V3	3,89...3,92	0,0015	0,010
	I277_14	V9	3,90...3,93	0,01	0,067
	I277_15	V9	3,87...3,90	0,0005	0,0036
	I277_16	V3	3,86...3,89	0,0001	0,001

Koe I277_1 tehtiin läheltä näyteputken päätä, minkä tarkoituksena oli arvioida, kuinka läheltä päätä saadaan hyvälaatuisia näytteitä. Kyseinen koe onnistui hyvin. Kokeen I277_2a näytekappaletta jouduttiin paikkaamaan, koska näytteen keskellä kulki juuri. Kyseisen näytteen ödometrikokeen tulokset poikkesivat muista ja ne jätettiin huomiomatta. Taulukkoon 7 on koottu kokeista määritetyt kokoonpuristuvuusparametrit ja taulukossa 8 on esitetty yhteenveto mitatuista esikonsolidaatiojännityksistä.

Taulukko 7. *Määritetyt tangenttimoduulimenetelmän mukaiset kokoonpuristuvuusparametrit ja koenäytteen vesipitoisuus.*

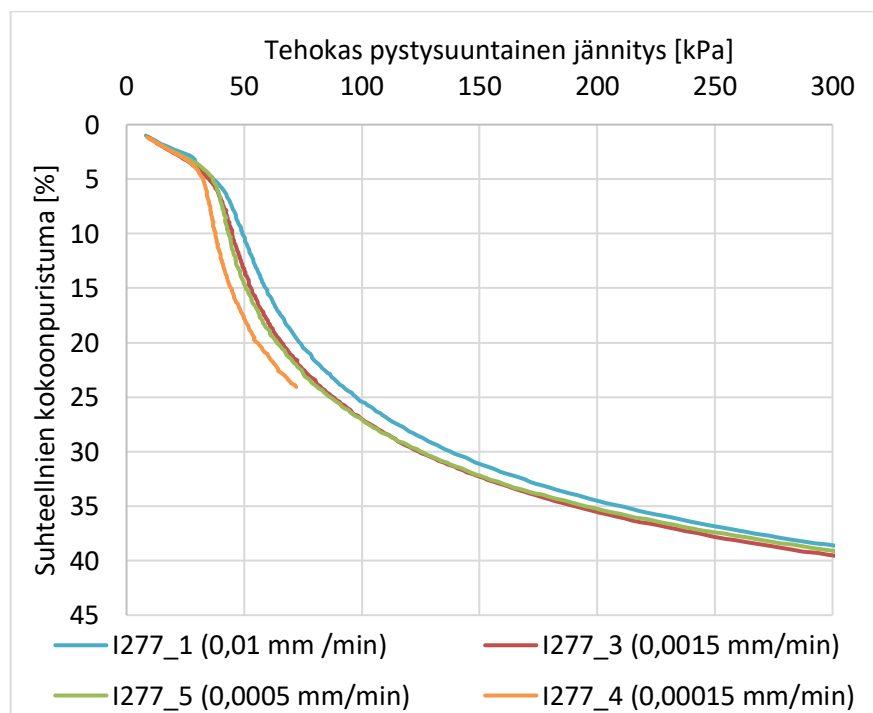
Koenumero	m	β	m2	m2 (palautus)	w [%]
I277_1	6	-0,62	9,0	55	114,3
I277_3	6,4	-0,68	7,5	53,6	110
I277_4	9,1	-1,05	7,8	-	110,1
I277_5	6,8	-0,78	8,4	54,8	110
I277_13	7,4	-0,70	8,2	61,3	86,8
I277_14	7,1	-0,61	7,0	63,7	86,5
I277_15	7,8	-0,77	10,0	60,6	88,6
I277_16	8,5	-0,82	9,5	67,9	83,7

Taulukko 8. *Arvioitu tehokas pystyjännitys σ'_v näytteenottokerroksessa ja ödometrikokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys σ'_{cv} .*

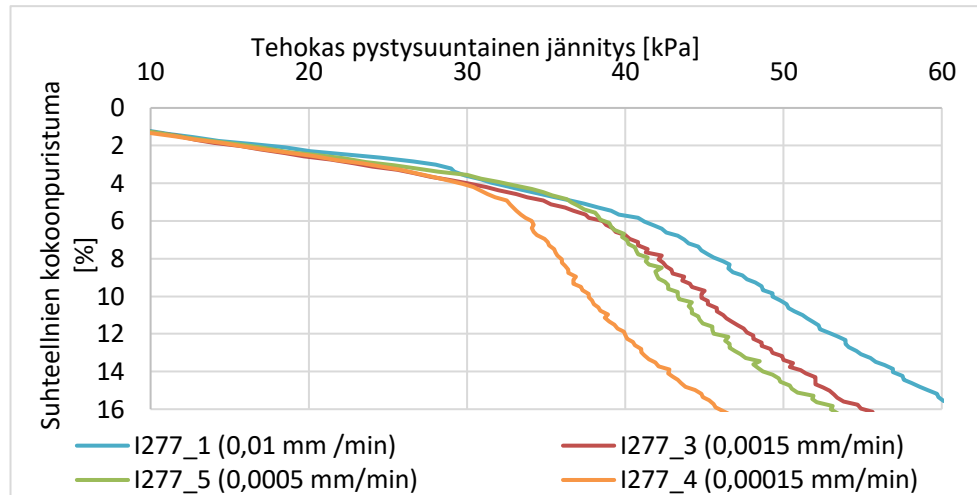
Koenumero	σ'_v [kPa]	σ'_{cv} [kPa]
I277_1	27,9	39,9
I277_3	27,9	37,0

I277_4	28	31,6
I277_5	28	35,8
I277_13	32,4	36,2
I277_14	32,4	39,4
I277_15	32,4	33,4
I277_16	32,4	31,3

Koesarjan 1 jännitys-muodonmuutos-kuvaaja on esitetty kuvassa 47. Sarjaan kuului 5 koetta, joista 1 epäonnistui. Kokeet tehtiin pääsääntöisesti 300 kPa:n tehokkaaseen pystyjännitykseen asti. Ensimmäisen koesarjan hitaimmalla nopeudella tehty koe I277_4 kuormitettiin kuitenkin vain noin 70 kPa:n tehokkaaseen pystyjännitykseen asti. Kuvassa 48 on esitetty kokoonpuristuvuuskuvaajasta kohta, jossa esikonsolidaatiojännitys ylitetään.

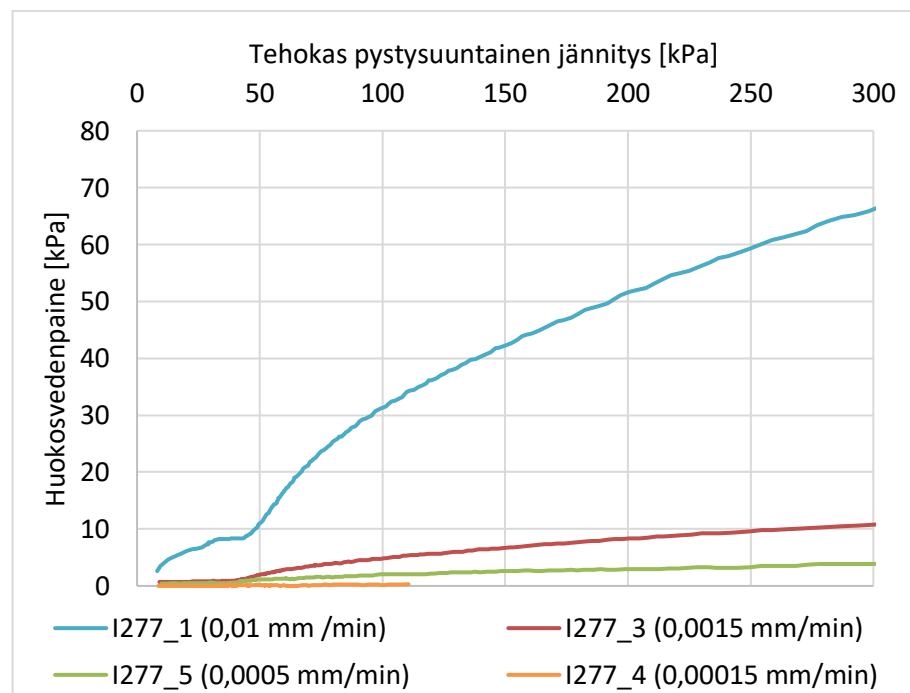


Kuva 47. Ensimmäisen ödometrikoesarjan jännitys-kokoonpuristuma-kuvaaja.

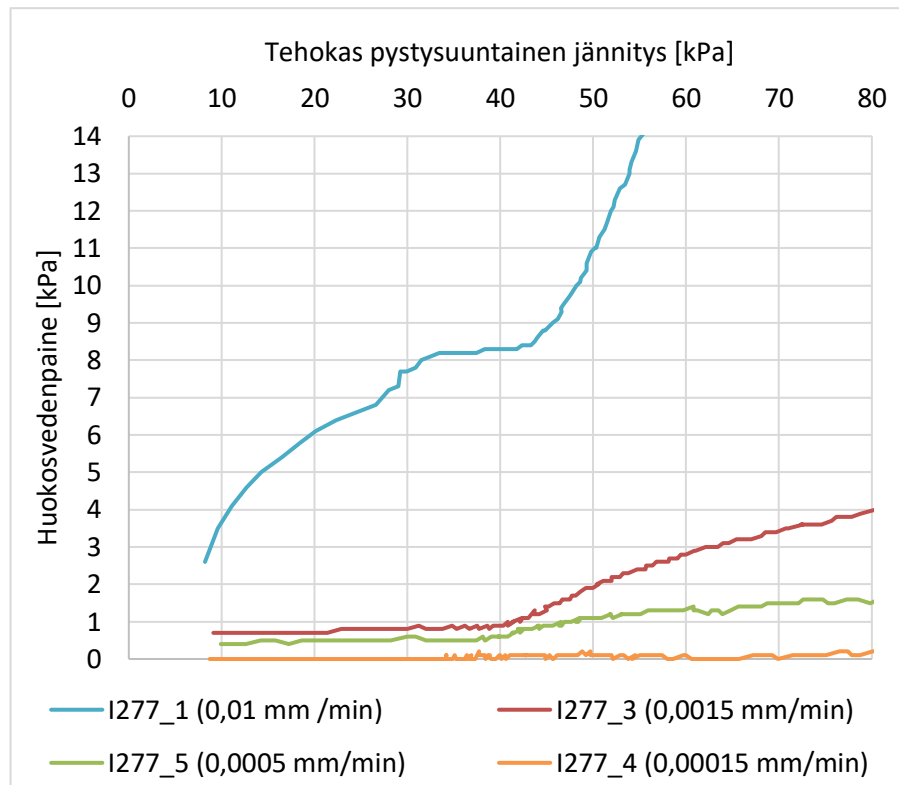


Kuva 48. Ensimmäisen ödometrikoesarjan jännitys-kokoonpuristuma-kuvaaja esikonsolidaatiojännityksen ylityksen kohdalla.

Koesarjan 1 huokosvedenpaineen keihtys on esitetty kuvassa 49. Kuvassa 50 on esitetty huokosvedenpaine kuvaajasta kohta, jossa esikonsolidaatiojännitys ylitetään.



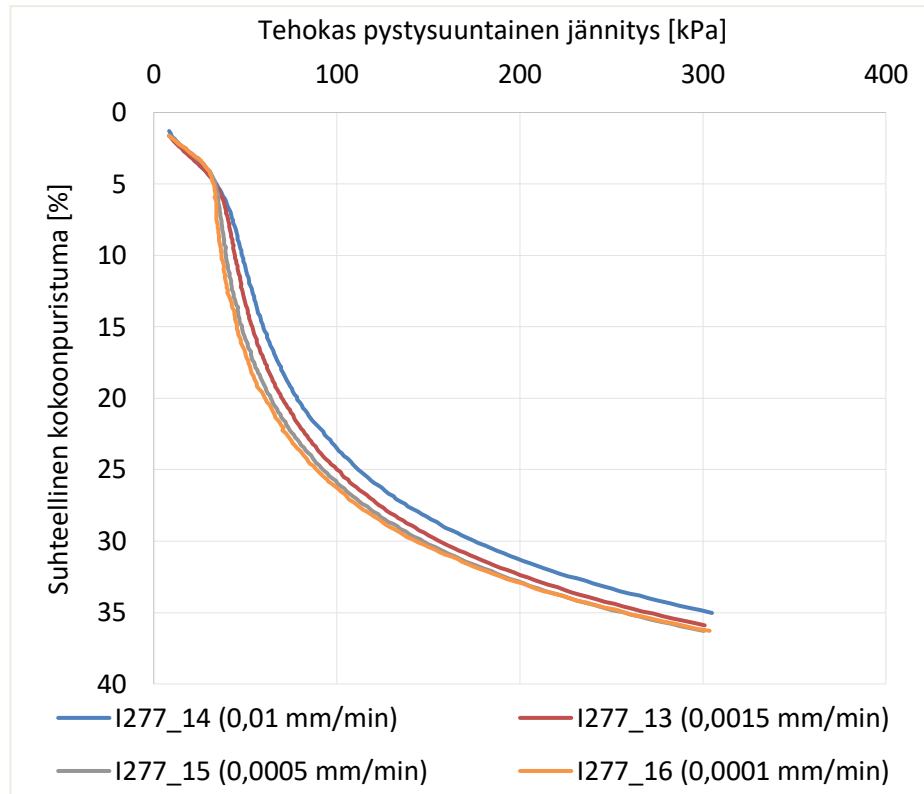
Kuva 49. Ensimmäisen ödometrikoesarjan jännitys-huokosvedenpaine-kuvaaja.



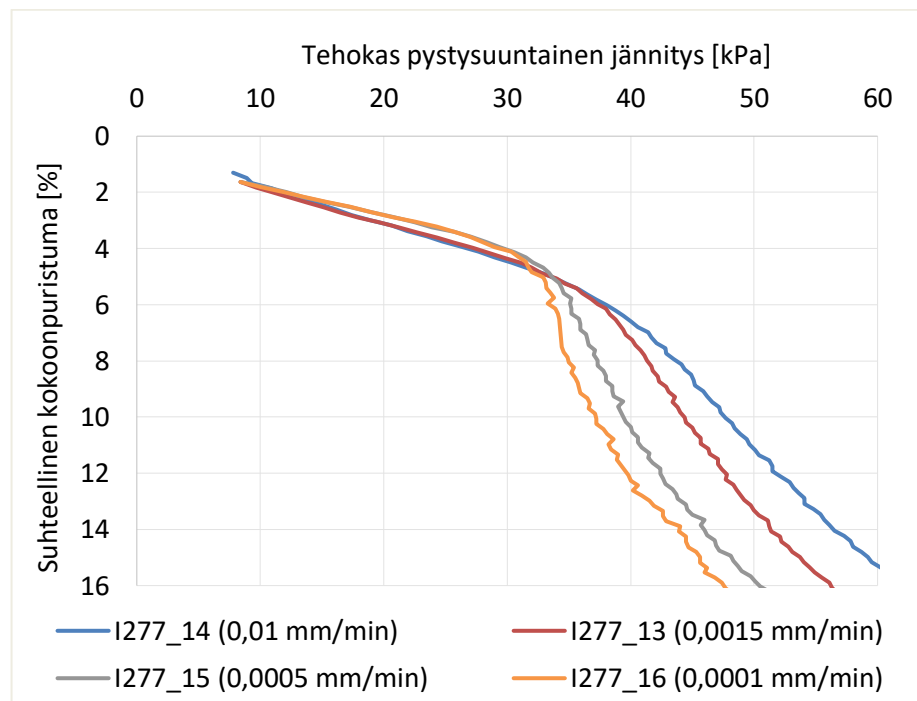
Kuva 50. Ensimmäisen ödometrikoesarjan jännitys-huokosvedenpaine-kuvaaja esikonsolidaatiojännityksen ylityksen kohdalla.

Kuvasta voidaan nähdä, että jännitys-kokoonpuristuma-käyrät kulkevat lähes vakiovälimatkan päässä toisesta alussa. Kokoonpuristuman lisääntyessä käyrät lopulta leikkaavat toisensa. Lerouiel et al. (1985) havaitsivat vastaavanlaista käyttäytymistä hitaalla nopeudella Batisca-savella.

Koesarjan 2 jännitys-muodonmuutos-kuvaaja on esitetty kuvassa 51. Sarjaan kuului 4 koetta. Kokeet tehtiin 300 kPa:n tehokkaaseen pystyjännitykseen asti. Kuvassa 52 on esitetty kokoonpuristuvuuskuvaajasta kohta, jossa esikonsolidaatiojännitys ylitetään

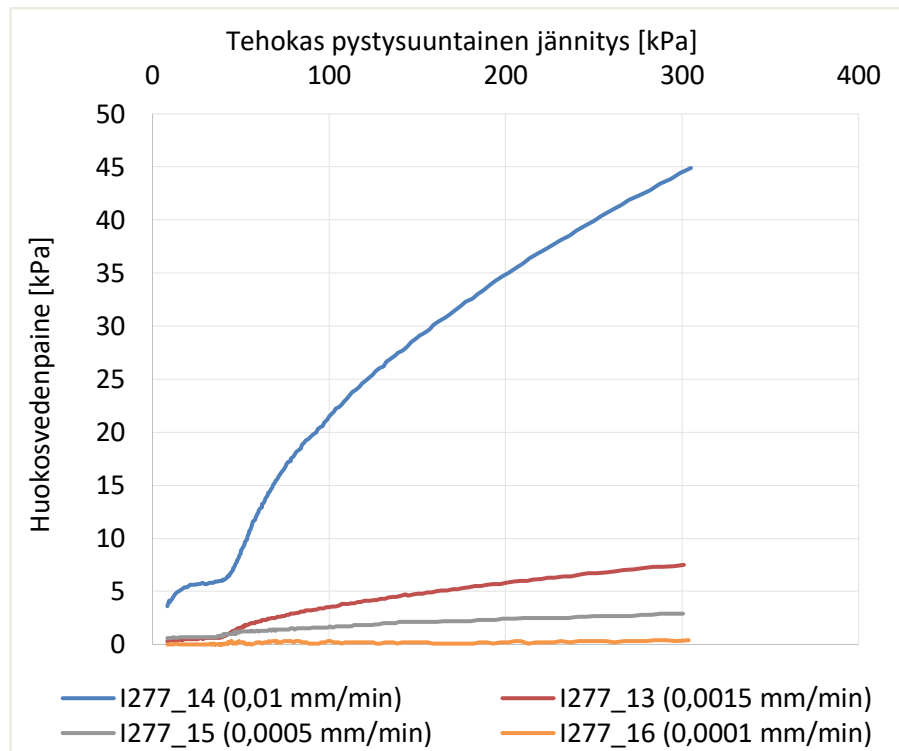


Kuva 51. Toisen ödometrikoesarjan jännitys-kokoonpuristuma-kuvaaja.

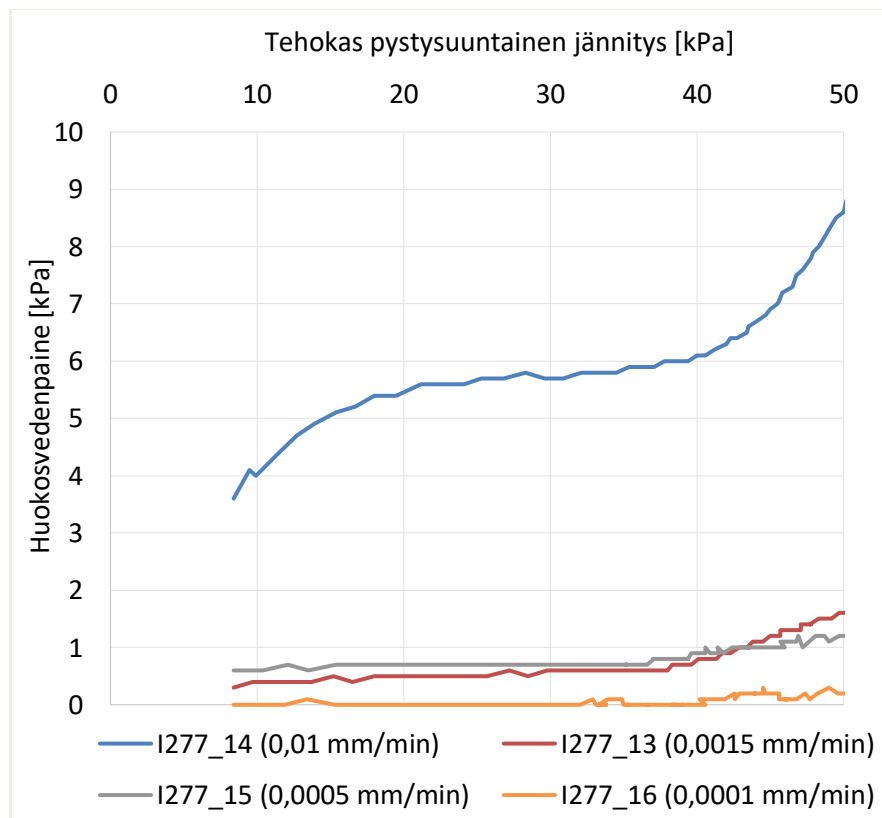


Kuva 52. Toisen ödometrikoesarjan jännitys-kokoonpuristuma-kuvaaja esikonsolidaatiojännityksen ylityksen kohdalta.

Koesarjan 2 huokosvedenpaineen keihitys on esitetty kuvassa 53. Kuvassa 54 on esitetty huokosvedenpaine kuvaajasta kohta, jossa esikonsolidaatiojännitys ylitetään.



Kuva 53. Toisen ödometrikoesarjan jännitys-huokosvedenpaine-kuvaaja.

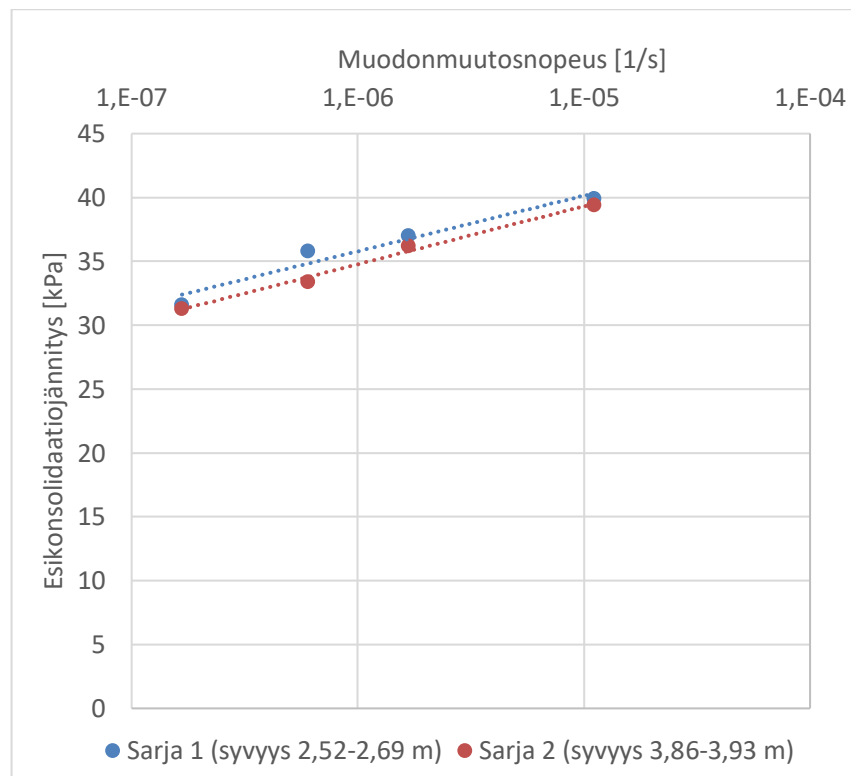


Kuva 54. Toisen ödometrikoesarjan jännitys-huokosvedenpaine-kuvaaja esikonsolidatiojännityksen ylityksen kohdalta.

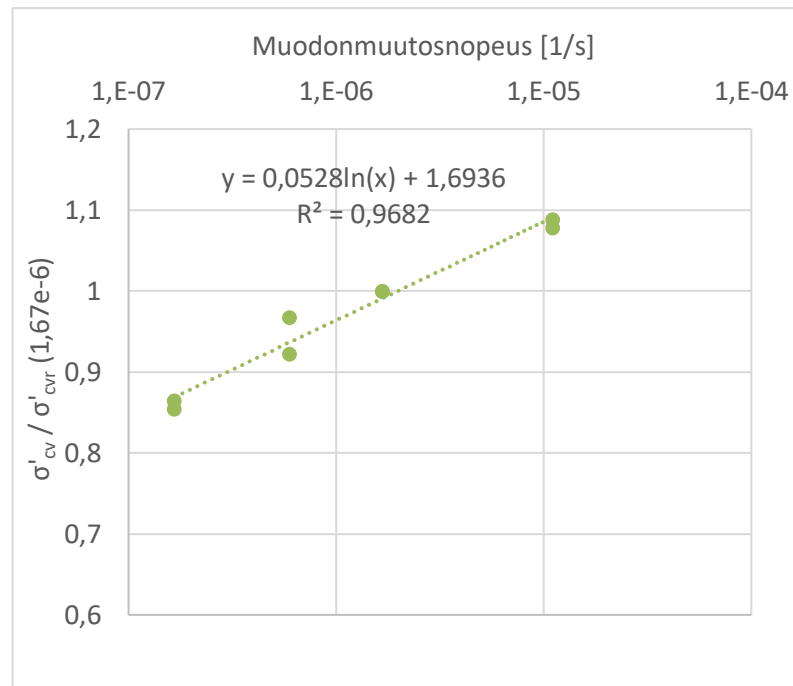
Toisen sarjan jännitys-kokoonpuristuvuus-kuvaajat noudattavat aluksi samaa kaavaa kuin ensimmäisen kokeen tulokset. Käyrät eivät kuitenkaan leikkaa toisiaan vastaavalla tavalla lopussa kuin tapahtui sarjassa 1.

Huokosvedenpaineen kehityksessä oli suuri ero eri nopeuksien välillä. Suurimmalla muodonmuutosnopeudella oli huomattavasti suurempi huokosvedenpaine verrattuna hitaampiin nopeuksiin. Hitaimmalla nopeudella huokosvedenpaine oli niin pieni, että mittaustarkkuus ei enää riittänyt.

Kuvassa 55 on esitetty muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen. Tulokset on otettu molemmista ödometrisarjoista. Kuvassa 56 on esitetty molemmat sarjat, joiden esikonsolidaatiojännitykset on normalisoitu toiseksi nopeimman ödometrikokeen esikonsolidaatiojännityksellä. Toiseksi nopein muodonmuutosnopeus oli 0,0015 mm/min.



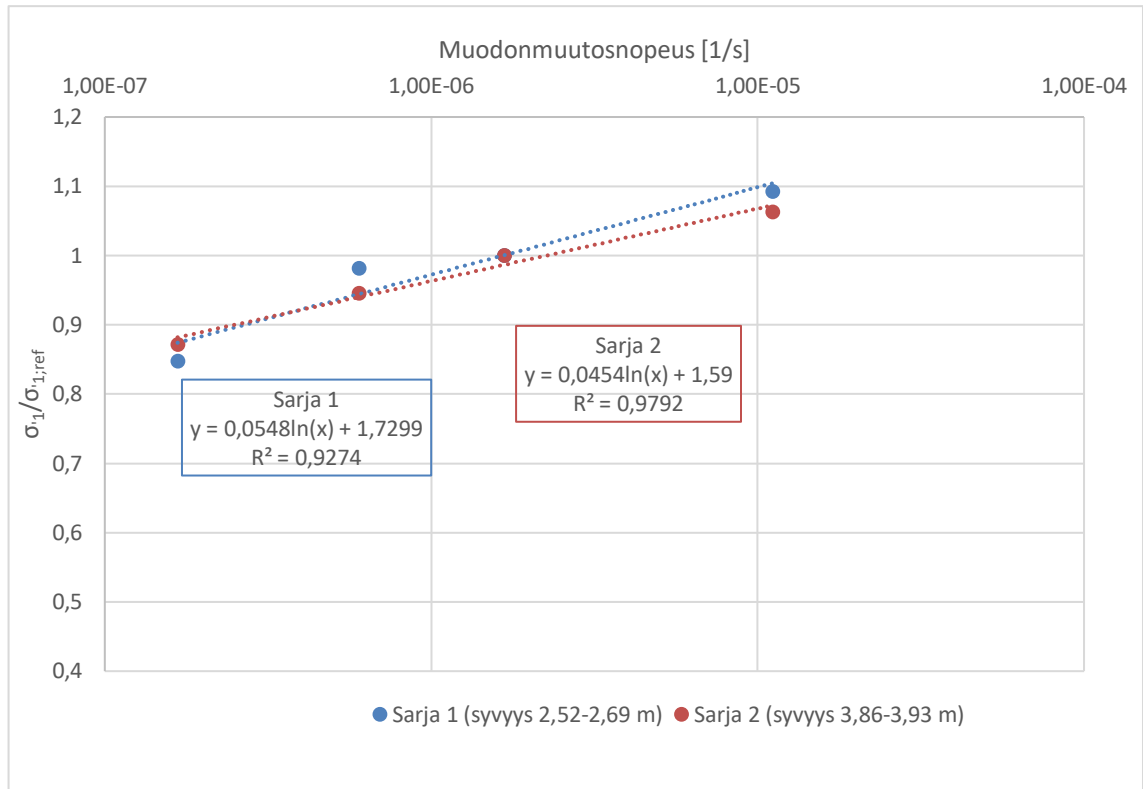
Kuva 55. Muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen.



Kuva 56. Muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen, kun esikonsolidaatiojännitykset on normalisoitu.

Kuvasta 56 nähdään, että esikonsolidaatiojännitys kasvaa n. 11 % kun muodonmuutosnopeus kasvaa dekadin verran. Kaavassa 24 määritellyn parametrin B:n arvoksi laskettiin 0,053. Se vastaa kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.

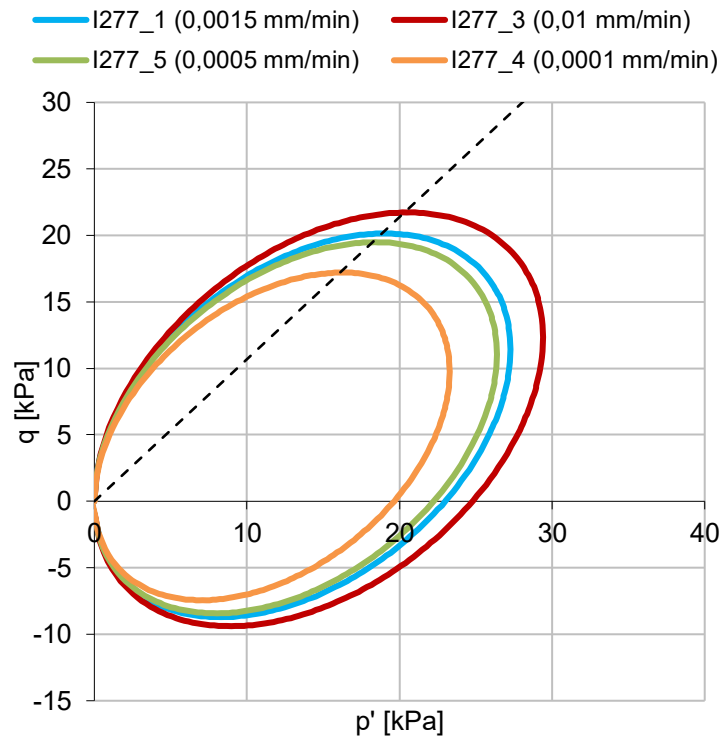
Ödometrikokeista katsottiin lisäksi 10 %:n kokoonpuristumaa vastaava pystysuuntaisen tehokkaan jännityksen arvo normalisoituna toiseksi nopeimman kokeen vastaavalla arvolla. Tarkastelu perustui kaavassa 25 esitettyyn yhteyteen muodonmuutosnopeuden ja tehokkaan pystyjännityksen välillä. Arvot on lisätty kuvaan 57, jossa vaaka-akselina on muodonmuutosnopeus.



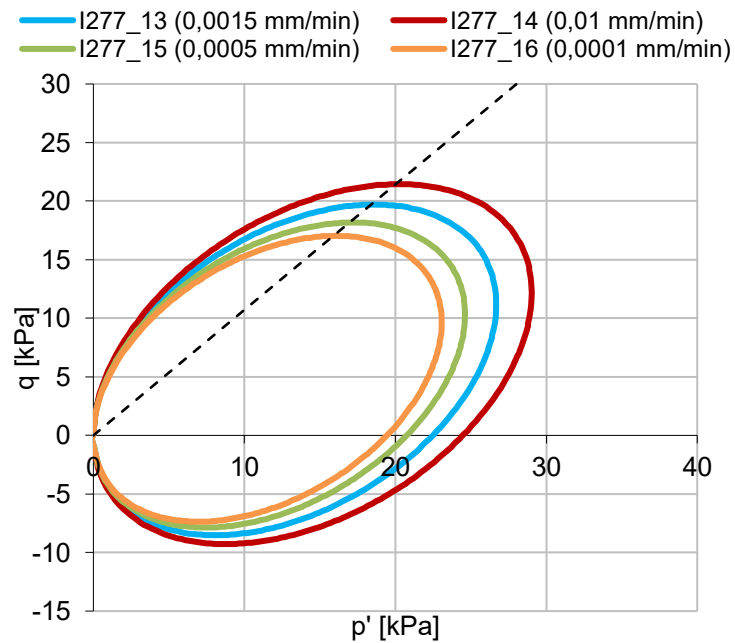
Kuva 57. Normalisoidut jännitykset 10%:n kokoonpuristumalla muodonmuutosnopeuden funktiona.

Kuvasta 57 kaavalla 25 määritetty parametri B on 1. sarjalla 0,055 ja 2. sarjalla 0,045. Aiemmin määritetty B:n arvo kuvasta 56, jossa vertailujännityksenä käytettiin esikonsolidaatiojännitystä, on lähellä 1. sarjan arvoa.

Ödometrikokeista saaduista esikonsolidaatiojännityksistä muodostettiin lisäksi myötöpintamallit. Myötöpintamallina käytettiin Länsivaaran (1999) esittämää mallia, joka esiteltiin tarkemmin kappaleessa 2.5. Myötöpintamalli vaati arvion saven kitkakulmasta, josta käytettiin arvoa 27. Katkoviiva kuvaa kriittisen tilan suoraa M, joka on määritetty kitkakulmasta kaavalla 6. Sarjan 1 kokeet on esitetty kuvassa 58 ja sarjan 2 kuvassa 59.



Kuva 58. Sarjan 1 esikonsolidaatiojännityksistä muodostetut myötöpinnat, kun f_{ii} on 27 astetta.



Kuva 59. Sarjan 2 esikonsolidaatiojännityksistä muodostetut myötöpinnat, kun $f_{ii} = 27$ astetta.

Aiemmin voitiin havaita kuvista 55 ja 57, että sarjan 1 toiseksi hitaimman kokeen I277_5 tulos erottuu muista kokeista. Kokeen esikonsolidaatiojännitys sekä jännitys 10 %:n kokoonpuristumalla ovat odotettua suuremmat. Sama asia voidaan havaita nyt kuvasta 58. Kokeen myötöpinta on suurempi ja lähempänä seuraavaksi nopeampaa muodonmuutosnopeutta verrattuna kuvaan 59, jossa myötöpintojen etäisyys toisistaan on lähes vakio.

4.3 Kolmiakksiaalikoheet eri muodonmuutosnopeuksilla

Kolmiakksiaalikoheet suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston maalaboratoriossa. Näytteet konsolidoitiin isotrooppisesti jännitykseen $p' = 0,8 \sigma'_c$, jossa σ'_c oli ödometrikokeella määritetty esikonsolidaatiojännitys samalta syvyydeltä. Esikonsolidaatiojännitys määritettiin koenopeedella 0,0015 mm/min tehdyistä ödometrikokeista. Laitteiston epätarkkuudesta johtuen konsolidointijännitys vaihteli tavoitejännityksen molemmin puolin, mikä on nähtävissä tässä kappaleessa esitettyjen jännityspolkukuvaajien lähtöpisteistä.

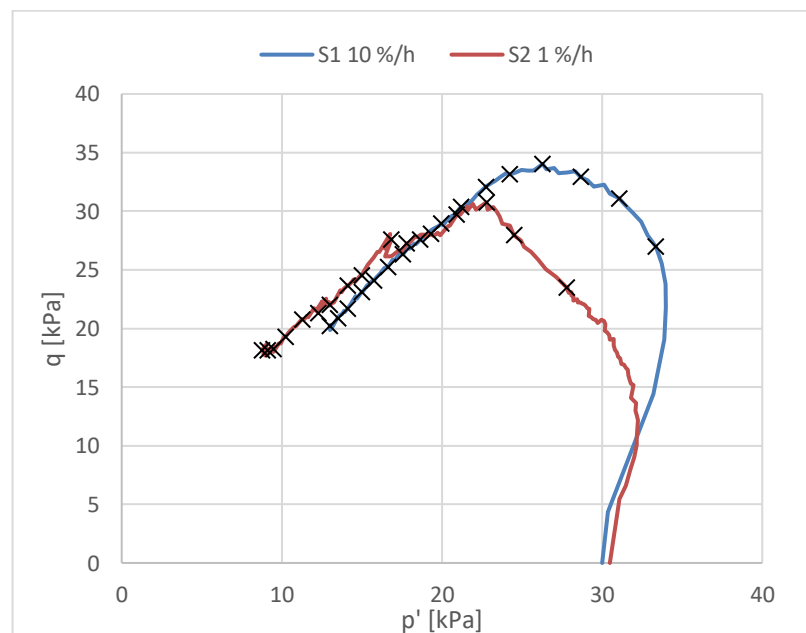
Kolmiakksiaalikoekiden muodonmuutosnopeudeksi valittiin 10 ja 1 sekä 0,1 ja 0,03 %/h. Muodonmuutosnopeus asetettiin laitteen ohjausohjelmistoon muodossa mm/min, joten toteutuneet muodonmuutosnopeudet eivät vastanneet täydellisesti valittuja nopeuksia. Työn tarkoituksena oli kuitenkin hakea eroja muodonmuutosnopeuksien välillä. Asialla ei siten ollut työn kannalta suurta merkitystä, koska muodonmuutosnopeuksien suhteet pysyivät lähes samana. Taulukkoon 9 on koottu yhteenveto Perniön savelle tehdyistä kolmiakksiaalikoekista.

Taulukko 9. *CIUC-kolmiakksiaalikoehjelma eri muodonmuutosnopeuksilla.*

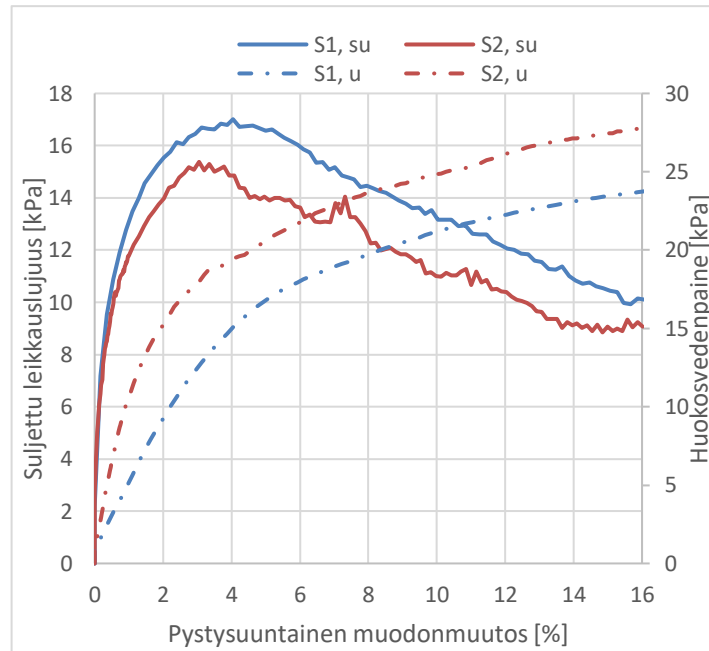
Koesarja	Koenro	Näyteputki	Näytteen syvyys [m]	Koenopeus [mm/min]	Koenopeus [%/h]
1	I277_S1	V1	2,61...2,70	0,13	10
	I277_S2	V1	2,61...2,70	0,013	1
2	I277_S3	V2	3,30...3,39	0,0013	0,1
	I277_S4	V2	3,30...3,39	0,0004	0,03
	I277_S5	V5	3,31...3,40	0,13	10
	I277_S6	V5	3,31...3,40	0,013	1
3	I277_S7	V4	2,85...2,94	0,13	10
	I277_S8	V4	2,85...2,94	0,013	1

	I277_S9	V7	2,85...2,94	0,0013	0,1
	I277_S10	V7	2,85...2,94	0,0004	0,03
4	I277_S11	V3	3,77...3,86	0,13	10
	I277_S12	V3	3,77...3,86	0,013	1
	I277_S13	V9	3,78...3,87	0,0013	0,1
	I277_S14	V9	3,78...3,87	0,0004	0,03
5	I277_S15	V8	3,25...3,34	0,013	1

Koesarja 1 tehtiin ylimmästä näytteenottokerroksesta syvyydeltä 2,61...2,70. Tarkoituksena oli tehdä sarja eri kerroksesta, mutta laboratoriossa tapahtuneen virheen vuoksi koesarja tehtiin väärältä syvyydeltä. Sarjan jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 60 sekä suljettu leikkauslujuus kuvassa 61.



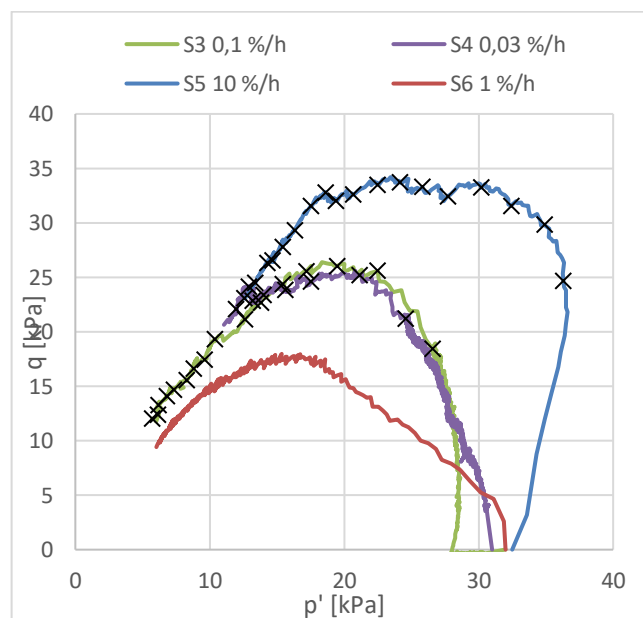
Kuva 60. Sarjan 1 jännityspolkukuvaaja. X kuvaa prosenttien muodonmuutosta.



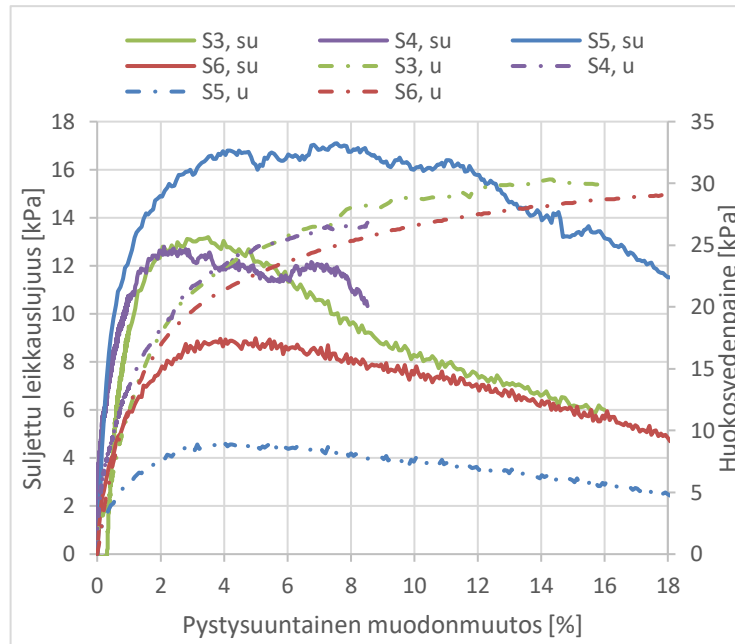
Kuva 61. Sarjan 1 suljettuleikkauslujuus ja huokosvedenpaine.

Jännityspolkukuvaajan perusteella sarja 1 onnistui suhteellisen hyvin. Varsinkin koe S1 10%/h nopeudella onnistui. Kokeen S2 jännityspolussa on havaittavissa ongelmia.

Koesarja 2 tehtiin syvyydeltä 3,30...3,40. Sarjan jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 62 sekä suljettu leikkauslujuus kuvassa 63.



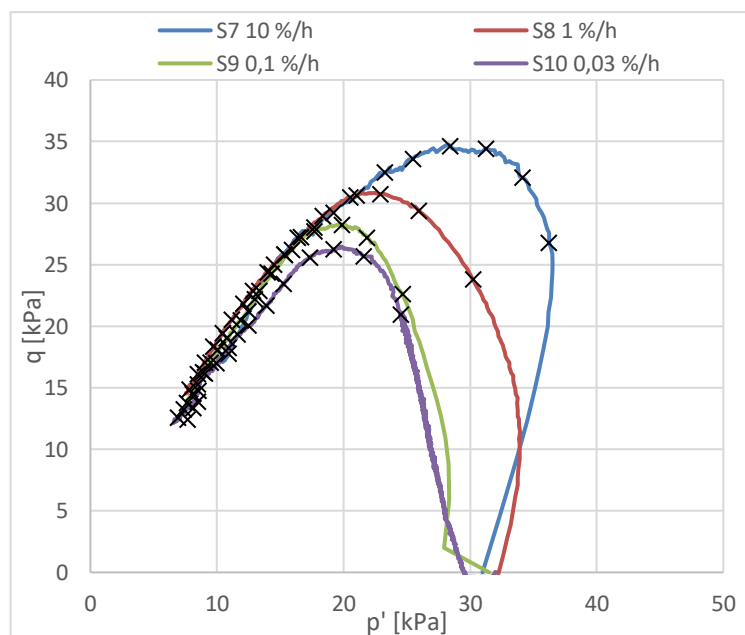
Kuva 62. Sarjan 2 jännityspolkukuvaaja. X kuvaa prosentin muodonmuutosta.



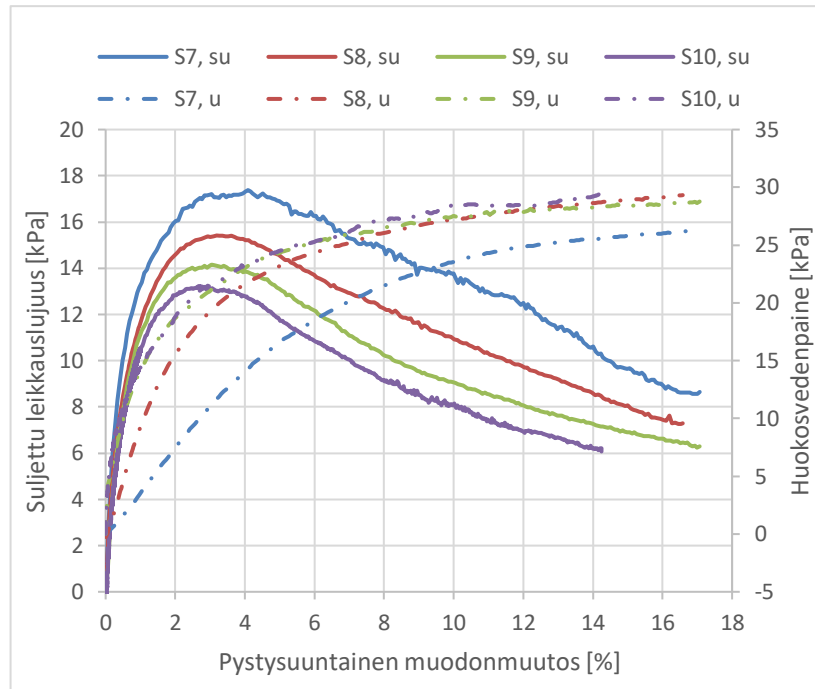
Kuva 63. Sarjan 2 suljettuleikkauslujuus ja huokosvedenpaine.

Kuvaajien perusteella koe S6 epäonnistui täysin. Näytteenottoputken näyte oli todennäköisesti häiriintynyt tai huonolaatuinen, sillä myöhemmin kaksi muuta koetta epäonnistui samasta näyteputkesta. Muiden kokeiden kuvaajat taas ”sahasivat” jonkin verran, ja niiden jännityspolkujen muoto erosi tasaisemmista kokeista.

Koesarja 3 tehtiin syvyydeltä 2,85...2,94. Sarjan jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 64 ja huokosvedenpaine sekä suljettu leikkauslujuus kuvassa 65.



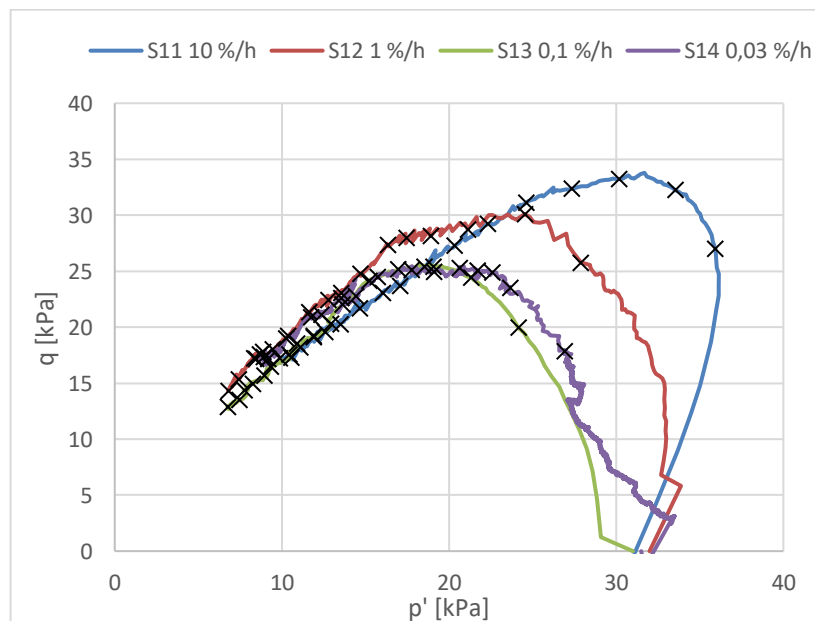
Kuva 64. Sarjan 3 jännityspolkukuvaaja. X kuvaa prosenttien muodonmuutosta.



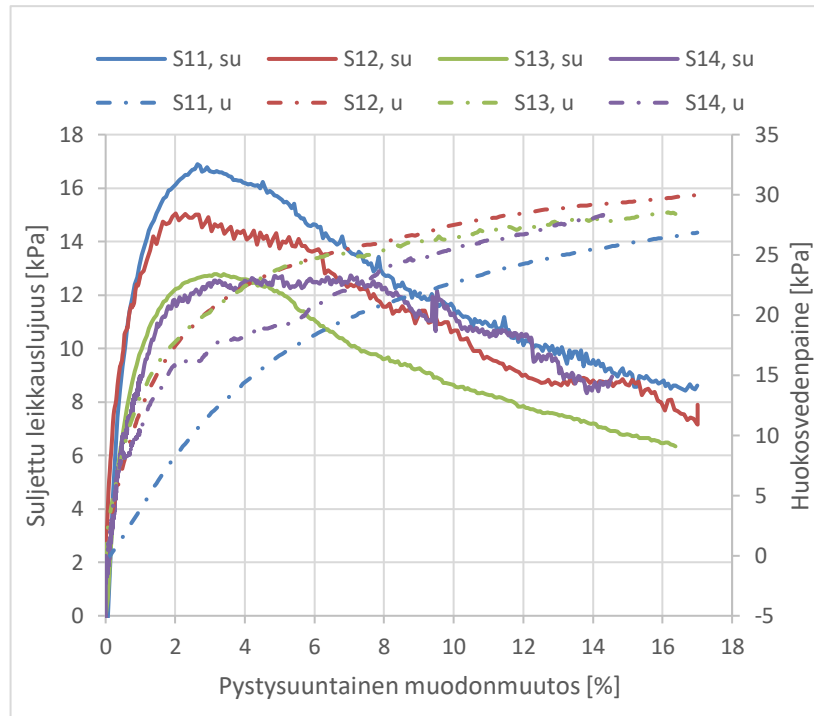
Kuva 65. Sarjan 3 suljettu leikkauslujuus ja huokosvedenpaine.

Sarja 3 onnistui hyvin kuvaajien perusteella. Konsolidointijännitys tosin vaihteli kokeiden välillä koelaitteiston epätarkkuuden takia.

Koesarja 4 tehtiin syvyydeltä 3,77...3,87. Sarjan jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 66 ja huokosvedenpaine sekä suljettu leikkauslujuus kuvassa 67.



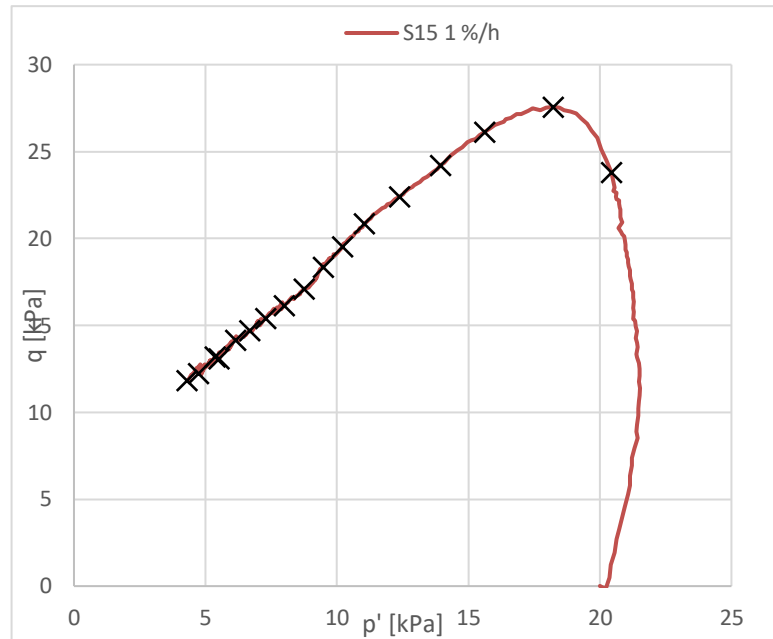
Kuva 66. Sarjan 4 jännityspolkukuvaaja. X kuvaa prosentin muodonmuutosta.



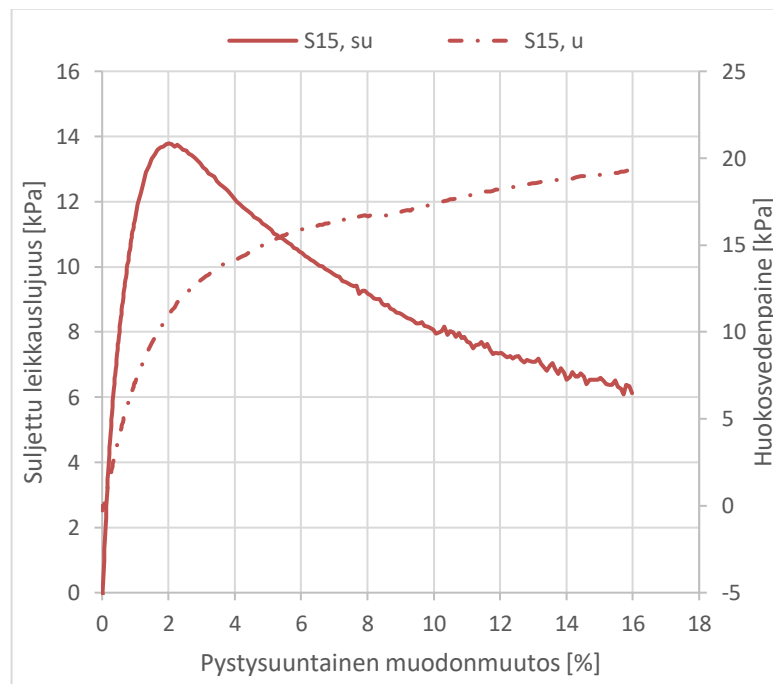
Kuva 67. Sarjan 4 suljettu leikkauslujuus ja huokosvedenpaine.

Sarja 4:sta kokeet S11 ja S13 onnistuivat hyvin kuvaajien perusteella. Kokeet S12 ja S14 epäonnistuivat epäonnistuivat. Mahdollinen selitys sille on, että näytteet ovat juuri ja juuri konsolidoituneet. Tällöin leikkausvaiheen huokosvedenpaine kasvaa alussa jyrkemmin, jolloin myötöpinta jää pienemmäksi.

Viimeinen koe tehtiin syvyydeltä 3,30...3,40. Sarjassa tehtiin 1 koe, jolla korvattiin epäonnistunut koe S6 samalta syvyydeltä. Sarjan jännityspolkukuvaaja on esitetty kuvassa 65. Konsolidointi jäi laitteistovirheen vuoksi jännitystasolle $0,6 \sigma'_c$. Kokeen jännityspolku on esitetty kuvassa 68 ja huokosvedenpaine sekä suljettu leikkauslujuus kuvassa 69.



Kuva 68. Sarjan 5 jännityspolkukuvaaja. X kuvaa prosentin muodonmuutosta.



Kuva 69. Sarjan 5 suljettu leikkauslujuus ja huokosvedenpaine.

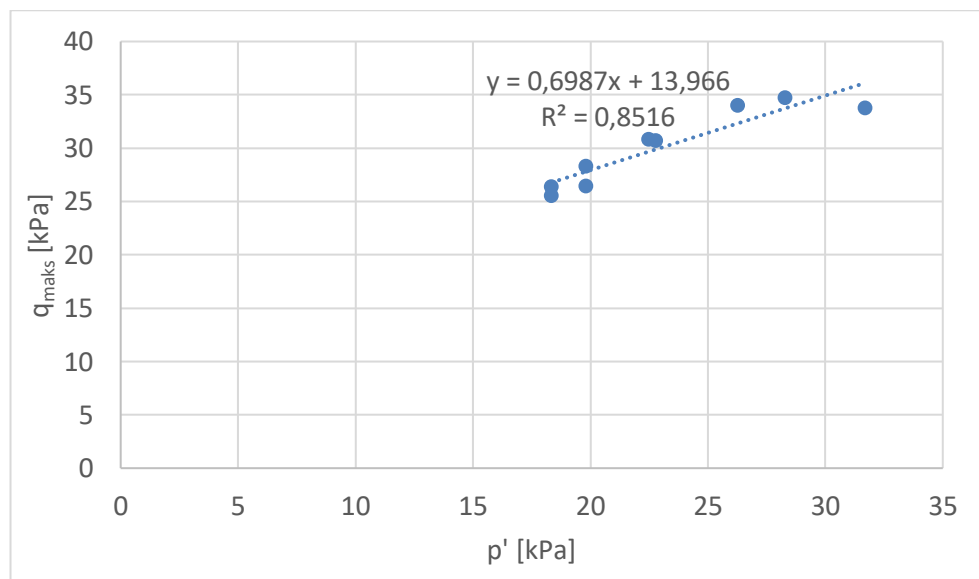
Koesarjoista valittiin parhaiten onnistuneet kokeet, joista määritetyt maksimileikkauslujuudet, τ_{\max} , on esitetty taulukossa 10. Taulukossa on lisäksi esitetty leikkauslujuudet normalisoituna saman syvyyden esikonsolidaatojännityksellä sekä vertikaalisella pystyjännityksellä

Taulukko 10. Parhaiten onnistuneet CIUC –kokeet ja niiden suljetut leikkauslujuudet.

Koenro	τ_{\max} [kPa]	τ_{\max}/σ'_c	τ_{\max}/σ'_v
S1	17,01	0,46	0,69

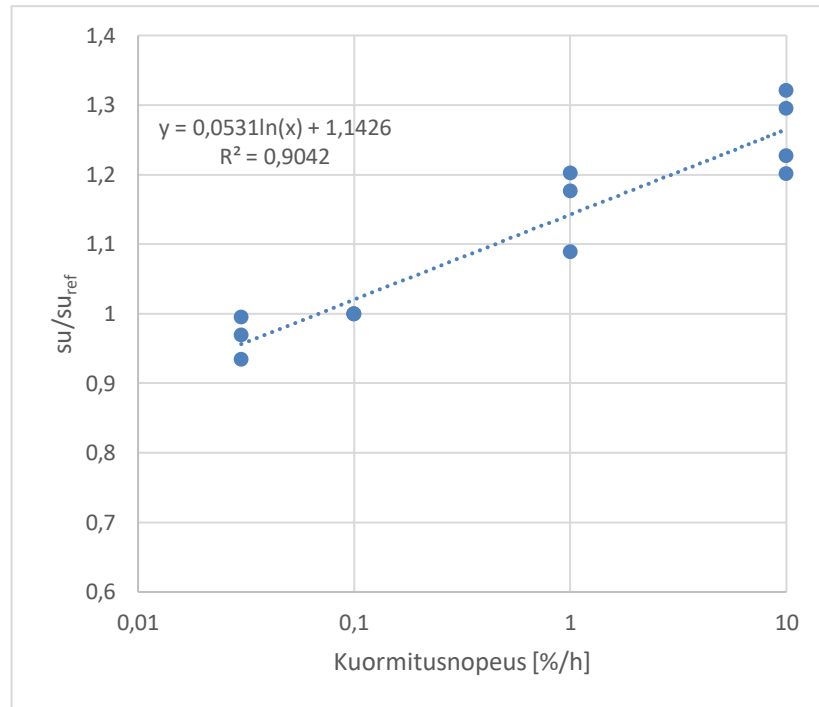
S2	15,38	0,42	0,63
S3	13,20	0,34	0,48
S7	17,38	0,45	0,68
S8	15,42	0,40	0,60
S9	14,15	0,36	0,56
S10	13,23	0,34	0,52
S11	16,89	0,43	0,56
S13	12,78	0,33	0,50

Kohdat, joissa saavutettiin deviatorisen jännityksen huippuarvo, on esitetty p'-q-koordinaatistossa kuvassa 70.



Kuva 70. Deviatorisen jännityksen huippuarvot p'-q-koordinaatistossa.

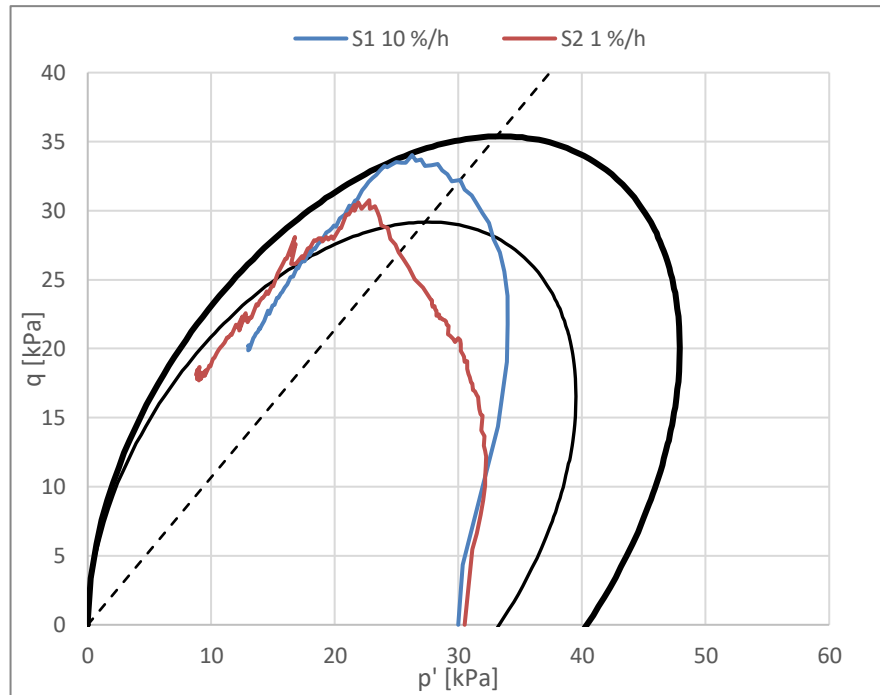
Kuvassa 71 on esitetty kolmiaksaaliokkeista määritetty suurin suljettu leikkauslujuus, joka on normalisoitu 0,1%/h nopeudella määritetyllä leikkauslujuudella.



Kuva 71. Deviatorisen jännityksen huippuarvot p - q -koordinaatistossa.

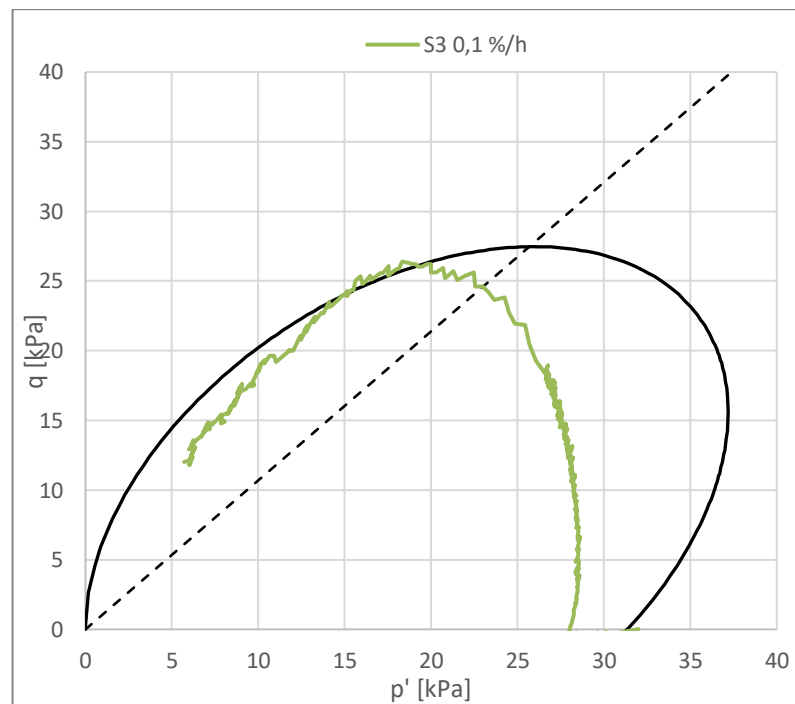
Leikkauslujuus kasvaa noin 11 %, kun nopeus kasvaa dekadilla. on samaa suuruusluokkaa, jota on esitetty kirjallisuudessa (Graham et al. 1983, Bjerrum 1958) Kolmiaksaalikokeista määritetyn parametrin B arvoksi saatiin 0,053. Arvo vastasi ödometrikokeista saatua.

Kolmiaksaalikokeiden jännityspolkukuvaajiin sovitettiin myötöpinnat. Sovitukseen otettiin mukaan sarjoista vain onnistuneimmat kokeet, jotka lueteltiin aiemmin taulukossa 10. Myötöpintamallina käytettiin kappalessa 2.5 esitettyä mallia. Myötöpintamallin kitkakulmana käytettiin 27 astetta Myötöpinnat sovitettiin yhden esikonsolidaatiojännityksen avulla. Esikonsolidaatiojännitys vastasi tiettyä kolmiaksaalikokeissa käytettyä muodonmuutosnopeutta. Tätä muodonmuutosnopeutta ja esikonsolidaatiojännitystä käytettiin referenssinä, jonka avulla määritettiin muiden kolmiaksaalikoenoituksen vastaavat esikonsolidaatiojännitykset. Muunnoksessa käytettiin hyväksi kaavaa 25. Nopeusvaikutusta kuvaavan creep-parametrin B arvona käytettiin lukua 0,055, joka on aiemmin Perniön savesta määritetty arvo ja on hyvin lähellä myös tässä työssä määritettyä arvoa. Myötöpintasovitukset on esitetty kuvissa 72 ... 76.



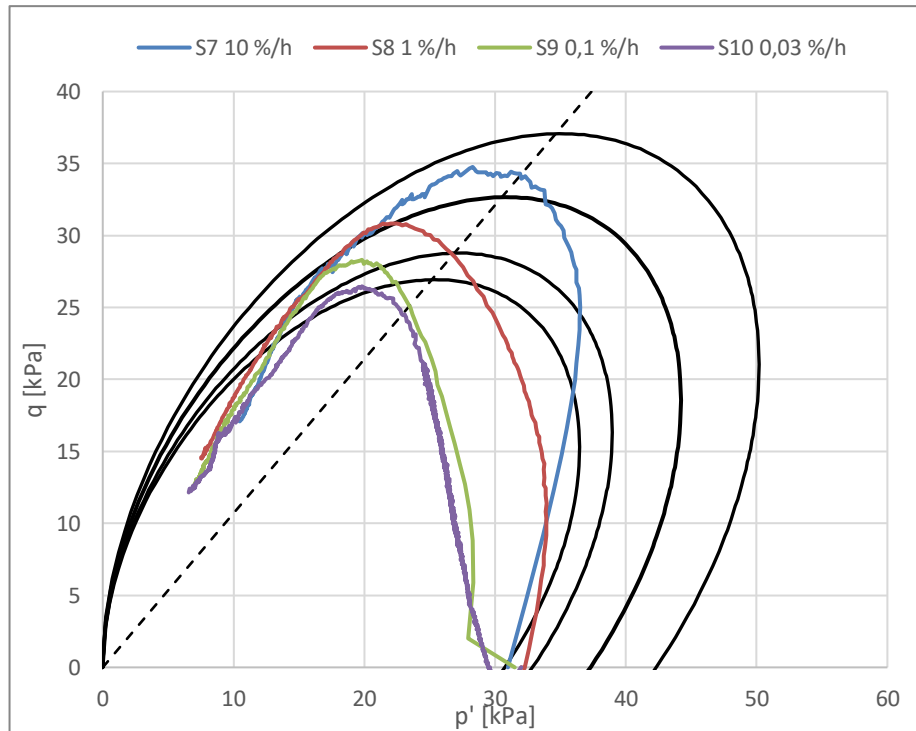
Kuva 72. Sarjan 1 jännityspolut ja sovitetut myötöpinnat.

Sarjan 1 myötöpinnat sovitettiin S1:n mukaisesti. Koetta S2 vastaava myötöpinta oli pienempi, joka viittaa siihen että myötöpintamallissa käytetty B:n arvo olisi liian suuri.



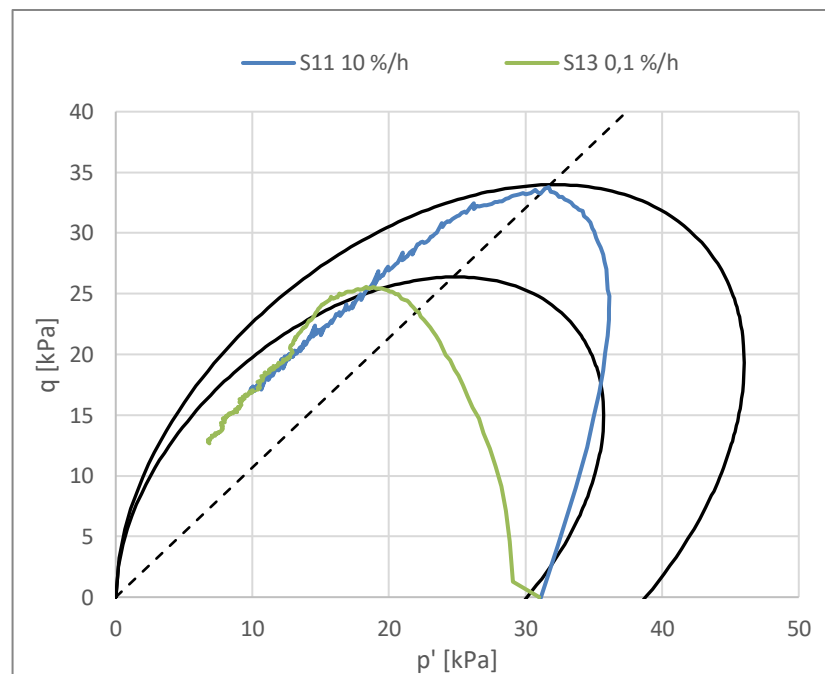
Kuva 73. Sarjan 2 jännityspolut ja sovitetut myötöpinnat.

Sarjan 2 myötöpinta sovitettiin S3:n mukaisesti. Sarjassa oli vain yksi onnistunut koe, joten myötöpintasovituksia ei tehty muille nopeuksille ja käytetyllä B:n arvolla ei täten ollut merkitystä.



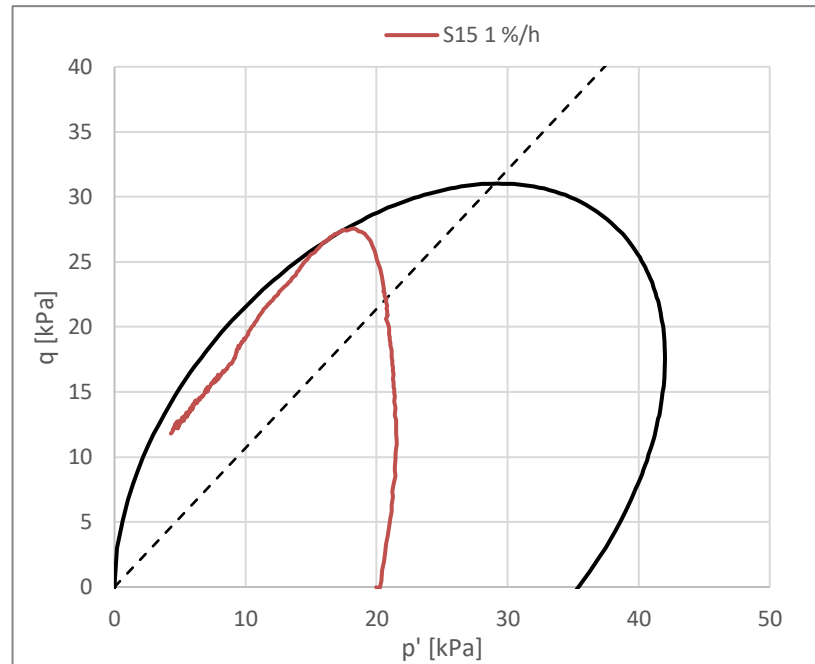
Kuva 74. Sarjan 3 jännityspolut ja sovitetut myötöpinnat.

Sarjan 3 myötöpinnat sovitettiin sarjan kokeisiin mahdollisimman tarkasti. Myötöpintasovitus ei osunut täysin kohdilleen. Kaltevammalla myötöpinnalla sovitus olisi ollut parempi, mutta silloin käytetyn kittakulman arvo ei olisi enää ollut realistinen savelle.



Kuva 75. Sarjan 4 jännityspolut ja sovitetut myötöpinnat.

Sarjan 4 myötöpinnat sovitettiin sarjan kokeisiin mahdollisimman tarkasti. Myötöpintasovitus osui hyvin kohdilleen.



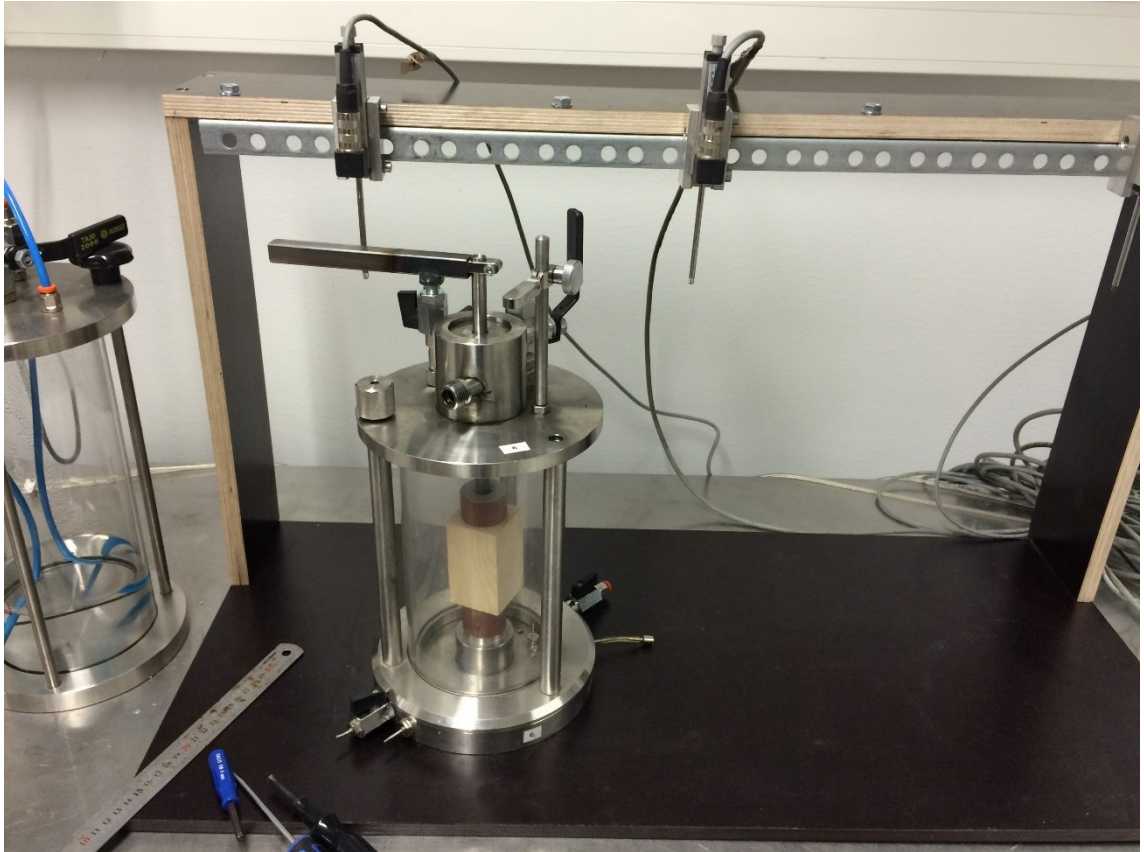
Kuva 76. Sarjan 5 jännityspolku ja sovitettu myötöpinta.

Sarjan 5 myötöpinta sovitettiin S15:n mukaisesti. Sarjassa oli vain yksi onnistunut koe, joten myötöpintasovituksia ei tehty muille nopeuksille ja käytetyllä B:n arvolla ei täten ollut merkitystä.

Tehdyistä kolmiakσιαalikokeista voidaan todeta, että suljettu leikkauslujuus kasvaa odotetusti, kun muodonmuutosnopeus kasvaa. Suljetun leikkauslujuuden pieneminen näyttäisi johtuvan hitaimmilla nopeuksilla tapahtuvasta suuremmasta huokosvedenpaineen noususta. Osassa kokeiden tuloksista oli ongelmia ja jännityspolkujen muoto oli epätavallinen. On mahdollista, että osassa kokeista konsolidointiaika oli muutaman päivän pidempi kuin muilla, vaikka asiaan yritettiin kiinnittää huomioita.

4.4 Creep-kolmiakσιαalikokeet

Creep-kokeille rakennettiin TTY:n maalaboratorioon oma laitteisto. Laitteistolla oli alun perin tarkoitus tehdä kolme koetta yhtäaikaan. Kokeita tehdessä pystyttiin kuitenkin käyttämään samanaikaisesti vain kahta selliä, koska näyteputkesta sai parillisen määrän näytettä yhdellä kertaa. Kuvassa 77 on esitetty koeselli ja raamit, joihin on kiinnitetty siirtymäanturit.

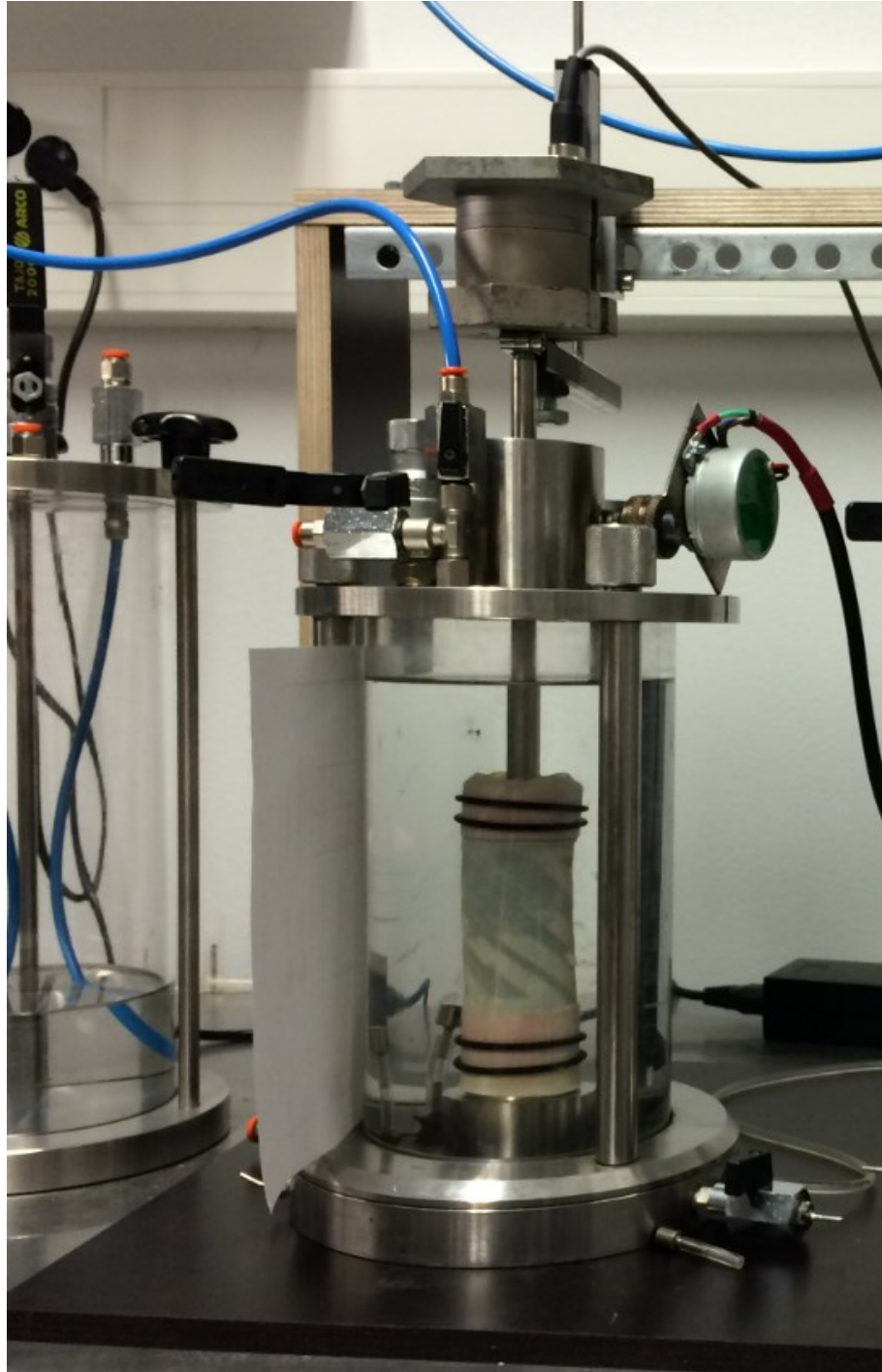


Kuva 77. Creep-kolmiaksaalikoelaitteisto.

Uusien kokeiden aloittaminen ei onnistunut samaan aikaan kun muissa selleissä oli vielä koe käynnissä, koska pystysiirtymän mittauksessa näkyi pienetkin testauspöydän tärinät. Toisen kokeen näytteen murtuminen näkyi esimerkiksi pienenä hyppäyksenä viereisen, käynnissä olevan, kokeen pystysiirtymässä. Siirtymissä näkyi myös pieniä selittämättömiä hyppäyksiä, jotka ovat voineet johtua pienistä tärähdyksistä liittyen laboratoriotilan normaalikäyttöön. Näytteet konsolidoitiin anisotrooppisesti, ja kaikissa kokeissa oli sama kahden vuorokauden konsolidointiaika.

4.4.1 Laitteisto

Laitteisto koostui puisesta raamista, johon asetettiin kaksi kolmiaksaalikoeeselliä. Koelaitteiston on esitetty kuvassa 61. Raameihin kiinnitettiin siirtymäanturit, joilla mitattiin pystysiirtymää. Kokeessa mitattiin myös huokosvedenpainetta sekä konsolidaatiossa poistuvan veden määrää. Anturit kalibroitiin mahdollisimman tarkasti ennen käyttöönottoa. Sellipaineen mittaus puuttui koetilanteesta, mutta koetta edeltäneessä testauksessa todettiin, että paineletkusta tuleva paine ei vaihdellut merkittävässä määrin. Kuormitustangon kitkaa vähennettiin kitkanpoistajalla. Leikkausvaiheessa oleva koe on esitetty kuvassa 78.



Kuva 78. Leikkausvaihe käynnissä creep-kolmiaksaalikoelaitteistossa.

Siirtymäanturit toimivat jousella, joiden jäykkyydet vaihtelivat. Siirtymäantureista valittiin ne, joiden jousivoima oli pienin. Valituista antureista määritettiin jousivakiot ennen kokeita. Jousivoimasta tuli noin 2 kPa:n lisäpaine näytteeseen. Lisäksi paine pieneni noin 0,5 kPa/10mm, kun näyte kokoonpuristui. Jousesta aiheutuva lisäkuormitus otettiin huomioon konsolidointipainojen lisäyksessä ja mittaustulosten käsittelyssä.

Sellinesteenä käytettiin lyhytaikaisissa kokeissa vettä ja pitkäaikaisissa kokeissa mäntyöljyä. Mäntyöljyllä on vettä suurempi viskositeetti, jolloin se ei läpäise niin helposti tiivisteitä. Mäntyöljy suojaasi lisäksi kumiosia valolta ja sen aiheuttamalta haurastumiselta. Kokeissa, joissa käytettiin mäntyöljyä, tapahtui selittämätön huokosvedenpaineen lasku leikkausvaiheessa. Ilmiölle ei löytynyt syytä, ja viimeisessä koesarjassa käytettiin varmuuden vuoksi sellinesteenä vettä. Näissä kokeissa vastaavaa huokosvedenpaineen laskua ei tapahtunut.

Mittausintervalliksi valikoitui puoli minuuttia. Yksi vaihtoehto olisi ollut käyttää tiheämpää mittausväliä, mutta silloin pitkäaikaisempien kokeiden mittausdataa olisi tullut erittäin suuri määrä. Mittausvälin vaihtaminen kesken kokeen todettiin myös riskialttiiksi, joten mittausväli pidettiin vakiona koko kokeen ajan. Leikkausvaiheen painot asetettiin kaikki yhdellä kertaa, ja niiden laitto ajoitettiin juuri ennen huokosvedenpaineen mittausajankohtaa

4.4.2 Koeselostus

Näytteet konsolidoitiin anisotrooppisesti in situ -jännitykseen. Konsolidointi tehtiin kasvattamalla hitaasti sellipaine haluttuun tasoon, minkä jälkeen lisättiin konsolidointipainot osissa. Näytteet olivat kokeissa eri syvyyksiltä, joten konsolidointijännitys vaihteli hieman sarjojen välillä. Taulukkoon 10 on koottu yhteenveto kaikista tehdyistä creep-kolmiakselikokeissa käytetyistä jännityksistä.

Taulukko 11. *Yhteenveto creep-kolmiakselikokeissa käytetyistä kuormituksista. q on konsolidointivaiheen jännitys ja Δq on leikkausvaiheessa lisättävä jännitys.*

Koesarja	Koenumero	Näyte-putki	q [kPa]	Δq [kPa]	$q + \Delta q$ [kPa]
1	C1	V2	16	18	34
	C2	V2	16	14	30
2	C3	V5	16,1	17,9	34
	C4	V5	16,1	13,9	30
3	C5	V4	16,1	13,9	30
	C6	V4	16,1	17,9	34
	C7	V7	16,1	9,9	26
	C8	V7	16,1	5,9	22
4	C9	V3	16,5	17,5	34

	C10	V3	16,5	13,5	30
	C11	V9	16,5	5	21,5
	C12	V9	16,5	1	17,5

Leikkausvaiheen painot lisättiin 48 h jälkeen, kun näytteet olivat konsolidoituneet. Leikkausvaiheet tehtiin neljän sarjoissa. Kuormituksen valitsemiseksi tehtiin aiemmassa vaiheessa kolmiaksiaalikoikeita eri muodonmuutosnopeuksilla. Suljettu leikkauslujuus oli maksimissaan noin 17 kPa suurimmalla muodonmuutosnopeudella. Creep-koesarjan suurimmaksi käytettäväksi deviatoriseksi jännityksiksi leikkausvaiheessa valikoitui sen perusteella 34 kPa. Sarjan muut deviatoriset jännitykset olivat 30 kPa, 26 kPa ja 22 kPa. Viimeisen sarjan kahden viimeisen kokeen jännityksiä pienennettiin hieman. Tällä varmistettiin, että saadaan onnistumaan myös koe, jossa murtoa ei tapahdu.

Ensimmäinen koepari, C1 ja C2, epäonnistui, kun leikkausvaiheessa mittausohjelmisto lopetti mittaamisen satunnaisesti useamman kerran päivässä. Kokeet jouduttiin keskeyttämään. Seuraavia kokeita varten vaihdettiin mittauksessa käytetty dataloggeri ja mittausohjelma, minkä jälkeen anturit kalibroitiin uudelleen. Uutta laitteistoa testattiin kahden viikon ajan ilman näytteitä toimintavarmuuden takaamiseksi.

Toisesta koeparista, C3 ja C4, murtuivat molemmat näytteet jo konsolidaatiovaiheessa. Syyksi epäiltiin sitä, että näytteet olivat häiriintyneet. Yksi samasta näyteputkesta tehty kolmiaksiaalikoike oli epäonnistunut aiemmassa vaiheessa, kun kokeita tehtiin eri muodonmuutosnopeuksilla.

Kolmas koepari, C5 ja C6, oli ensimmäinen koepari, joka saatettiin loppuun asti. C6 murtui noin 50 tunnin jälkeen. Koe C5 pidettiin käynnissä noin kolme viikkoa, jonka aikana näyte ei murtunut, mutta kokoonpuristui noin 5 %. Mittausaineiston tarkastelussa huomattiin, että huokosvedenpaine alkoi laskea näytteessä 2 %:n kokoonpuristumisen jälkeen.

Seuraavassa koeparissa, C7 ja C8, huomattiin sama ilmiö kuin kokeessa C5. Kokeita pidettiin kuitenkin käynnissä kolme viikkoa, kunnes huokosvedenpaineanturin mukainen huokospaine muuttui negatiiviseksi. Kokeet eivät saavuttaneet murtoa neljän viikon aikana, kun ne olivat käynnissä.

Viimeinen koesarja, C9...C12, onnistui hyvin. C9 ja C10 murtuivat molemmat leikkausvaiheessa. Kokeet C11 ja C12 oli käynnissä yli kuukauden, jonka aikana huokosvedenpaine tasoittui eikä alkanut laskea. Kokeiden aikana oli myös katko, joka todennäköisesti johtui mittaustietokoneen

kaatumisesta. Katko ei ollut kuitenkaan kriittinen, koska testattavat näytteet eivät murtuneet sinä aikana ja puuttuva osuus pystyttiin interpoloimaan mittauksista.

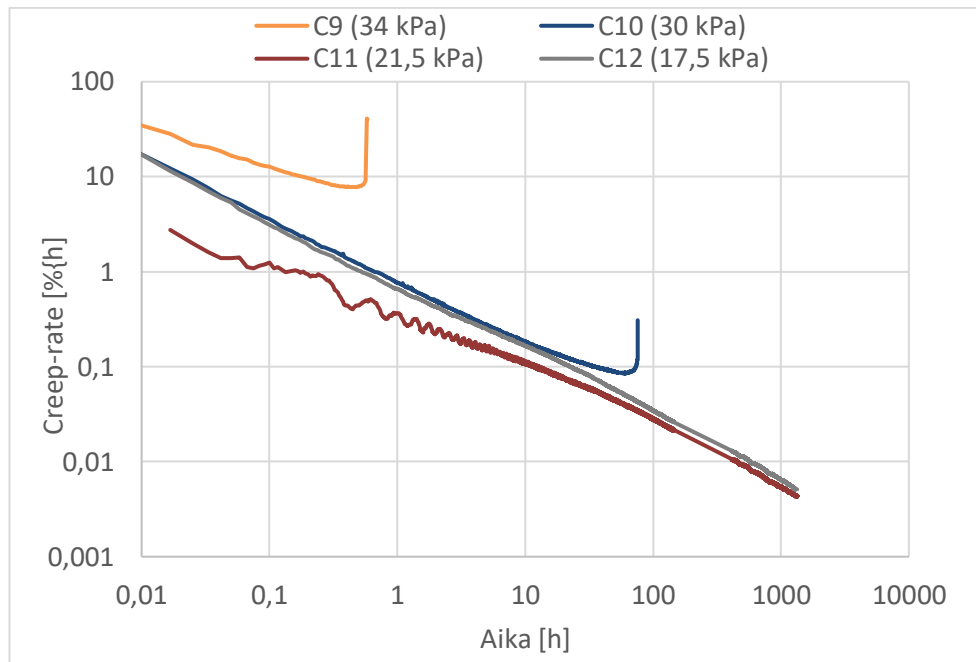
Syy huokosvedenpaineen laskuun kokeissa C5, C6 ja C7 ei selvinnyt. Syyksi epäiltiin aluksi hyvin pientä vuotoa laitteistossa, jota ei paljaalla silmällä voinut havaita. Vuotoa ei kuitenkaan löytynyt kokeiden jälkeisessä tarkastuksessa. Yhdistävä tekijä näissä kokeissa oli mäntyöljyn käyttäminen sellinesteenä, mutta sen vaikutusmekanismi huokosvedenpaineeseen ei selvinnyt. Seuraavissa kokeissa sellineste vaihdettiin vedeksi. Taulukkoon 12 on koottu yhteenveto kokeiden päättymissyystä.

Taulukko 12. *Yhteenveto creep-kolmiaksaalikokeiden päättymistavoista.*

Koenumero	Sellineste	Kommentti
C1	Vesi	Mittauslaitteisto lopetti toiminnan kesken leikkausvaiheen.
C2	Vesi	Mittauslaitteisto lopetti toiminnan kesken leikkausvaiheen.
C3	Vesi	Näyte murtui konsolidointivaiheessa.
C4	Vesi	Näyte murtui konsolidointivaiheessa.
C5	Mäntyöljy	Näyte ei murtunut, mutta huokosvedenpaine alkoi laskea leikkausvaiheessa. Kitkanpoistaja aiheutti mahdollisesti häiriötä siirtymämittaukseen.
C6	Vesi	Näyte murtui leikkausvaiheessa.
C7	Mäntyöljy	Näyte ei murtunut, mutta huokosvedenpaine alkoi laskea leikkausvaiheessa.
C8	Mäntyöljy	Näyte ei murtunut, mutta huokosvedenpaine alkoi laskea leikkausvaiheessa.
C9	Vesi	Näyte murtui leikkausvaiheessa.
C10	Vesi	Näyte murtui leikkausvaiheessa.
C11	Vesi	Näyte ei murtunut. Kitkanpoistaja aiheutti mahdollisesti häiriötä siirtymämittaukseen.
C12	Vesi	Näyte ei murtunut.

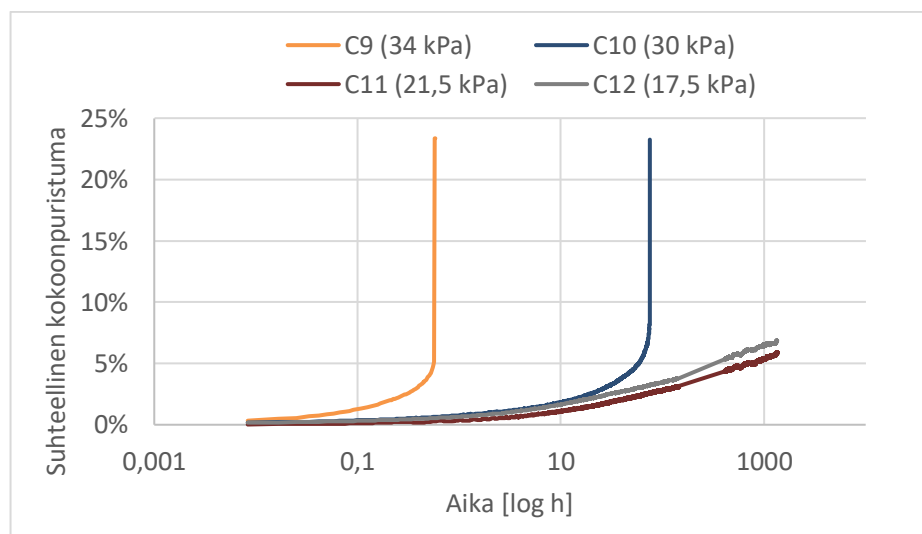
Tässä kappaleessa on esitelty viimeisestä sarjasta saadut tulokset. Aiempien sarjojen tulokset on esitetty liitteessä. Esikonsolidaatiojännityksenä käytettiin $\sigma'_{cv}=38$ kPa.

Konsolidointijännityksiksi johdettiin $\sigma'_1=41,5$ kPa ja $\sigma'_3=25$ kPa, kun $p' = 0,8 \cdot \sigma'_{cv}$ ja $K_0 = 0,6$. Kokeessa käytettäväksi sellipaineeksi tuli täten 25 kPa:a ja konsolidointipainot vastasivat 16,5 kPa:n kuormaa. Kuvassa 79 on esitetty muodonmuutosnopeuden vaihtelu ajan mukaan. Kaikissa kokeissa muodonmuutosnopeus alkaa pienentyä leikkausvaiheen painojen lisäyksen jälkeen. Kokeet C9 ja C10 murtoivat leikkausvaiheessa, mikä näkyy muodonmuutosnopeuden kasvuna.



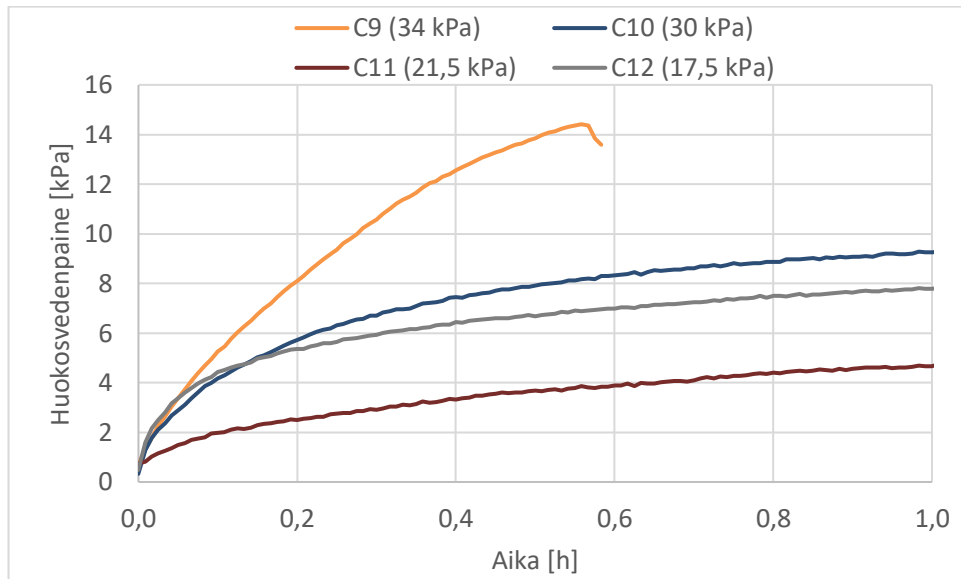
Kuva 79. Kokeiden muodonmuutosnopeuden vaihtelu ajan funktiona.

Kuvassa 80 on esitetty suhteellinen kokoonpuristuma ajan funktiona. Kokeen C10 käyrä seuraa suhteellisen lähellä C11:n käyrää, kunnes näyte alkaa murtua.



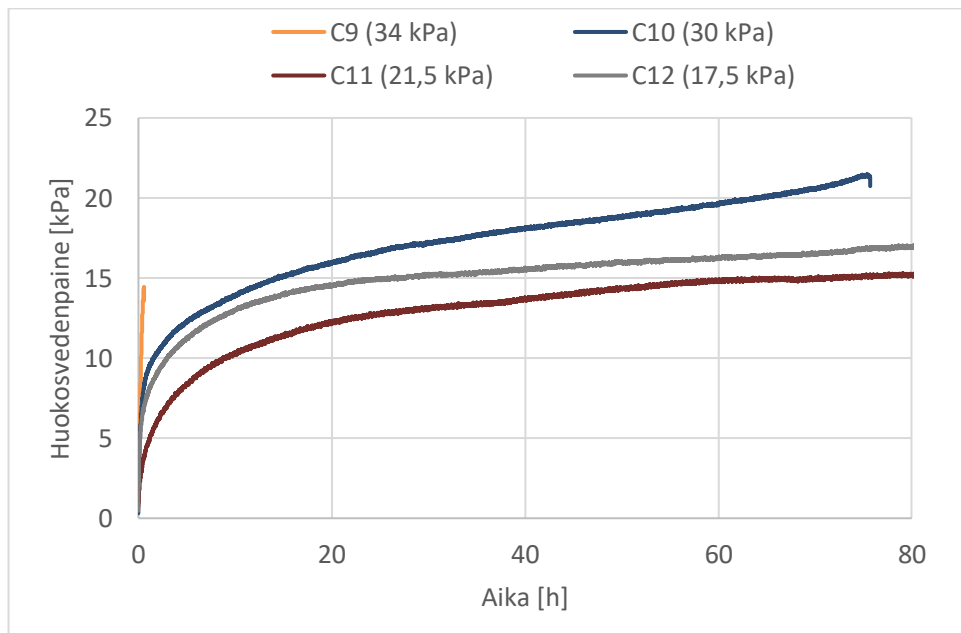
Kuva 80. Kokeiden suhteellinen kokoonpuristuma ajan suhteen.

Kuvassa 81 on esitetty kokeen C9 esitetty huokosvedenpaine murtohetkellä. Huokosvedenpaine on maksimissaan noin 14,5 kPa. Leikkausvaiheessa lisätty kuorma oli C9:lla 17,5 kPa.



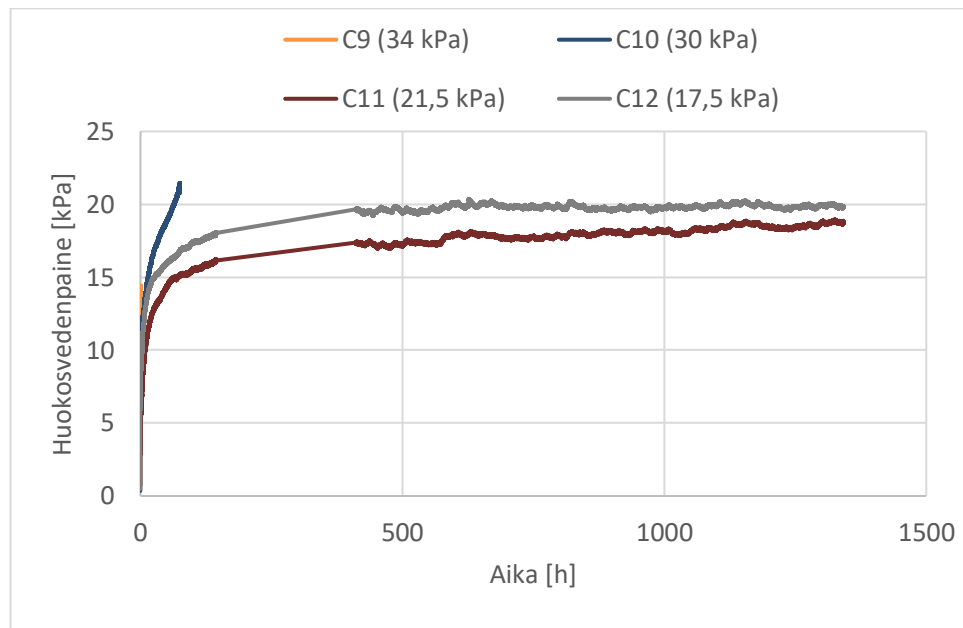
Kuva 81. Kokeiden huokosvedenpaine ensimmäisen ajan, jolloin koe C9 murtui.

Kuvassa 82 on esitetty kokeen C10 esitetty aika-kokoonpuristuma murtohetkellä. Huokosvedenpaine on maksimissaan noin 21 kPa. Leikkausvaiheessa lisätty kuorma oli C10:lla 13,5 kPa.



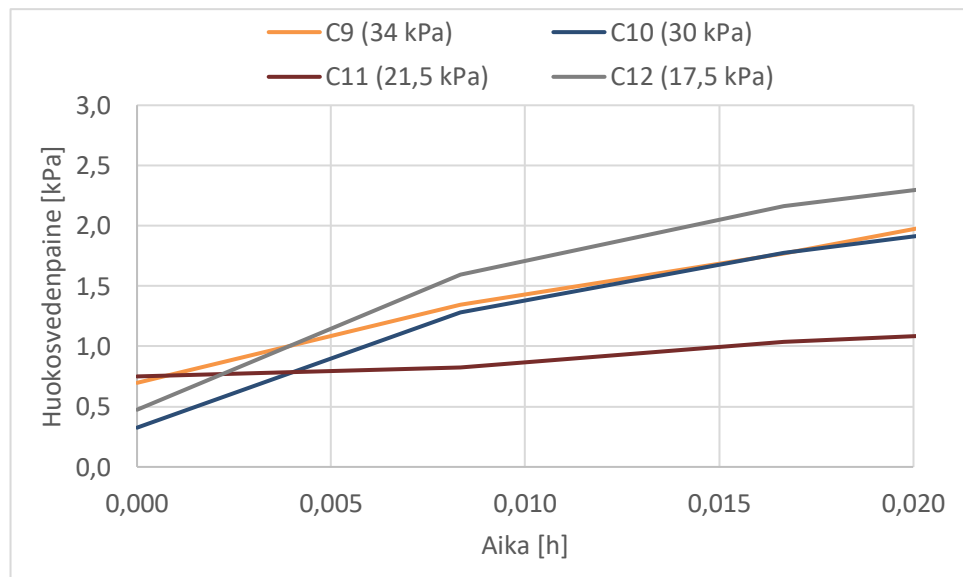
Kuva 82. Kokeen C10 huokosvedenpaine murtoajankohta.

Kuvassa 83 on esitetty kokeiden esitetty huokosvedenpaineen kasvu ajan suhteen. Kokeen C11 Huokosvedenpaine oli noin 19 kPa ennen kuin koe lopetettiin. Kokeen C12 Huokosvedenpaine oli noin 20 kPa ennen kuin koe lopetettiin.



Kuva 83. Kokeiden C11 ja C12 huokosvedenpaine kokeiden lopettamisajankohdalla.

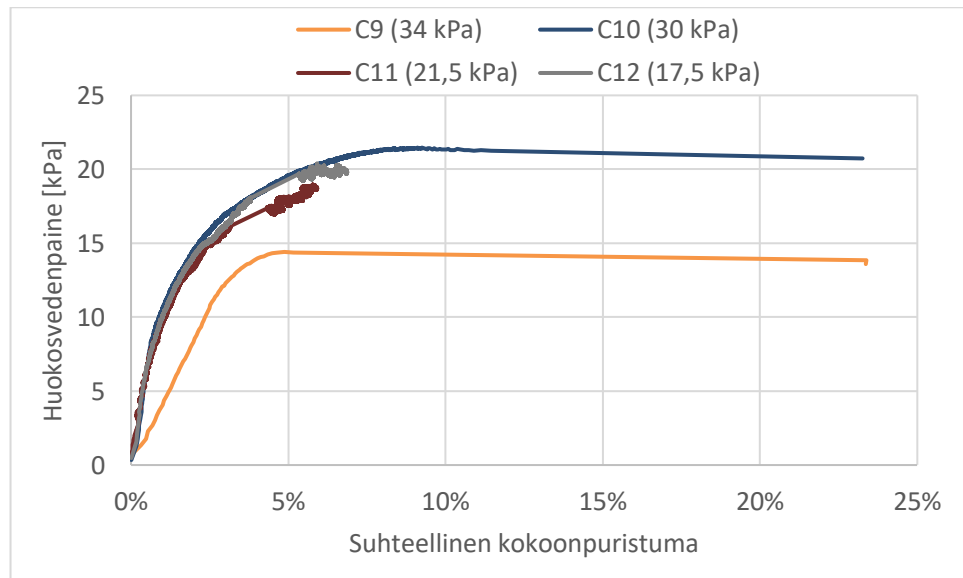
Kuvassa 84 on esitetty kokeiden esitetty huokosvedenpaineen muutos heti kuormituksen lisäämisen jälkeen. Leikkausvaiheen painot lisättiin juuri ennen mittaushetkeä.



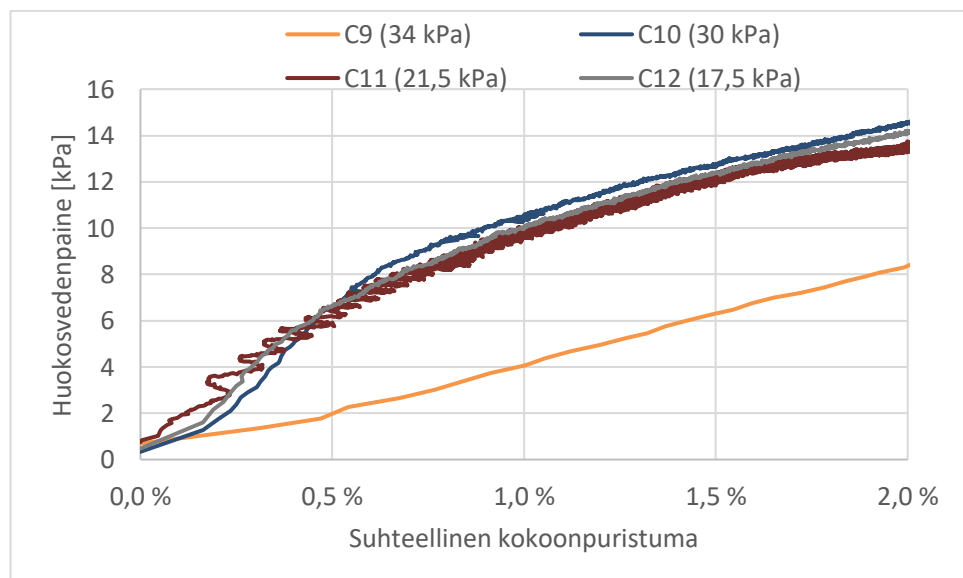
Kuva 84. Kokeiden huokosvedenpaine heti leikkauspainojen asettamisen jälkeen

On huomioitavaa, että huokosvedenpainemittauksessa ei näkynyt piikkiä, kun painot asetettiin, vaikka mittausajankohta oli juuri painojen lisäyksen jälkeen. Teoriassa painojen lisäyksen pitäisi vaikuttaa huokosvedenpaineeseen kuormituksen verran, kun kuormitus on juuri tapahtunut. Syy, miksi tätä ei tuloksissa näkynyt, voi osittain johtua siitä, että huokoskiveen on jäänyt ilmaa, joka kokoonpuristui heti kuormituksen jälkeen.

Kuvassa 85 on esitetty huokosvedenpaineen suhde kokoonpuristumaan. Kuvassa 86 on esitetty sama asia, mutta 0 ... 2%:n kokoonpuristuman välillä.



Kuva 85. Huokosvedenpaine-kokoonpuristuma-kuvaaja.

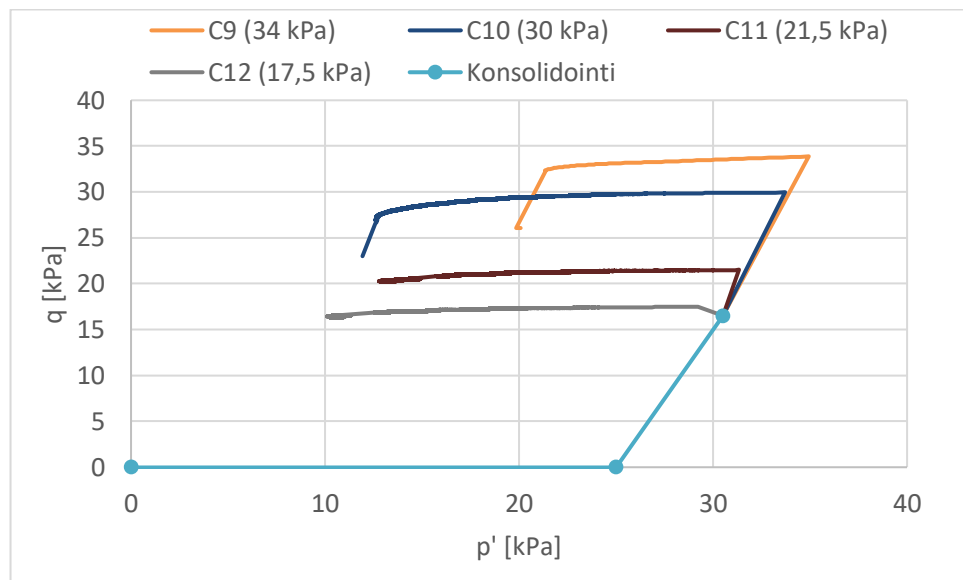


Kuva 86. Huokosvedenpaine-kokoonpuristuma-käyrät 0... 2%:n kokoonpuristuman välillä.

Kokoonpuristuman kuvaajasta on huomattavissa, että kokeessa C11 tapahtuu edestakaista liikettä. Vastaavaa huomattiin myös yhdessä aiemmassa, muuten epäonnistuneessa, kokeessa. Ongelman arvioitiin silloin johtuvan viallisesta kitkanpoistajasta, joka vaihdettiin toiseen. Kokeen C11 tapauksessa ongelma lienee sama.

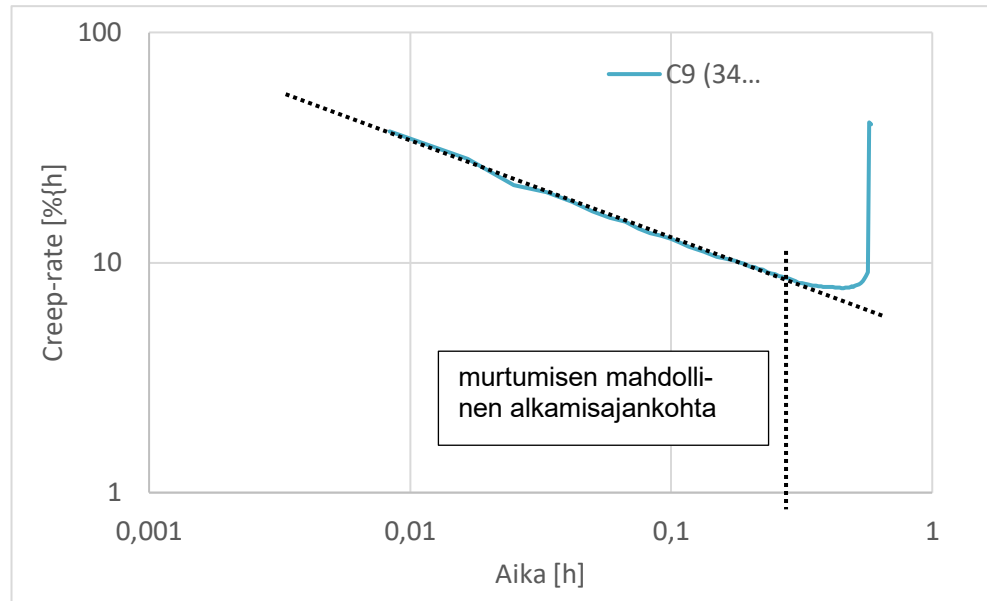
Huokosvedenpaine kasvaa suuremmaksi kuin kuormitus kokeissa C10, C11 ja C12. Länsivaara et al. (2011) ovat esittäneet, että vastaavanlainen ilmiö johtuu saven pyrkimyksestä myötää. Savessa pyrkii tapahtumaan visko-plastisia muodonmuutoksia. Jos ne on estetty, huokosvedenpaine kasvaa.

Kokeiden tulokset on esitetty p' - q -kuvaajassa kuvassa 87. Kuvaajaan on lisätty myös konsolidoinnin jännityspolku sellipaineen kasvattamisesta konsolidointipainojen lisäykseen.



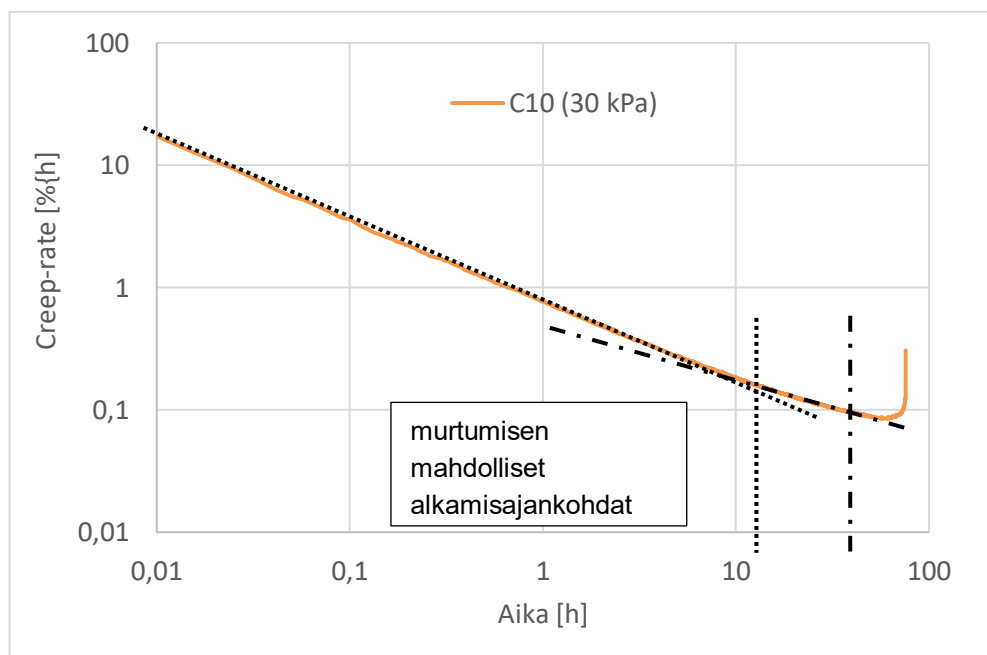
Kuva 87. Creep-kolmiakiaalikoheet p' - q -kuvaajassa.

Kokeiden C9 ja C10 murtoajankohdan määrittäminen ei ole yksiselitteistä. Murtuminen tapahtuu pitkällä aikavälillä varsinkin C10:n tapauksessa. Kuvissa 88 ja 89 on määritetty mahdollisia murtumisen aloitusajankohtia.



Kuva 88. Creep-kolmiaksaalikokeen C9 murtumisen aloitusajankohdan arviointi tangentin avulla.

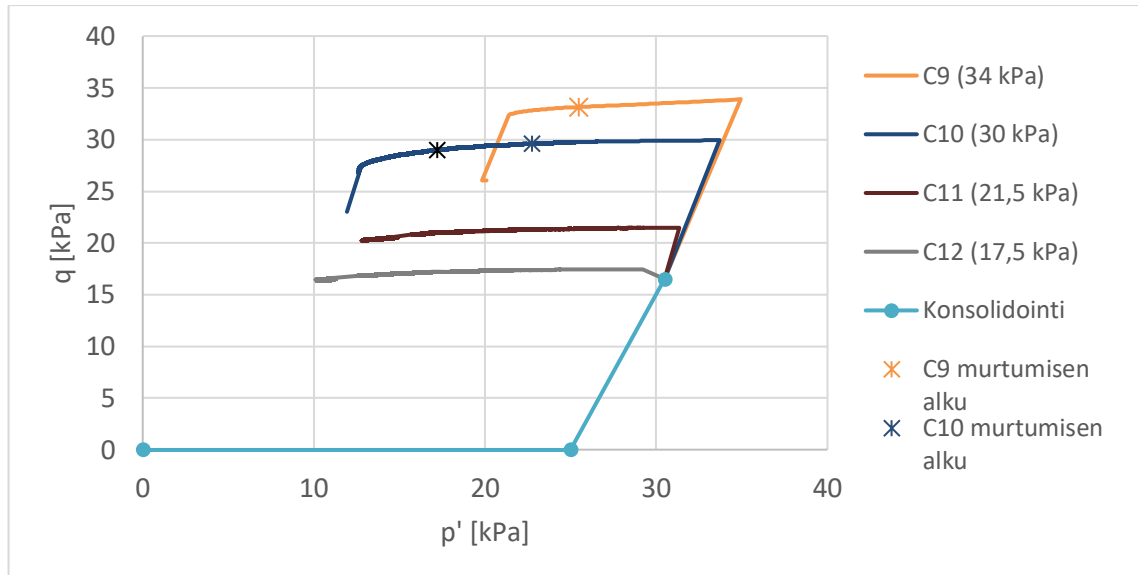
Kokeen C9 murtumisen alkamisajaksi määritettiin noin 20 minuuttia leikkausvaiheen aloituksesta. Silloin kokeen muodonmuutosnopeus alkoi kasvaa, kunnes näyte lopullisesti murtui noin 30 minuuttia leikkausvaiheen aloituksesta.



Kuva 89. Creep-kolmiaksaalikokeen C10 murtumisen aloitusajankohdan arviointi tangenttien avulla.

Murtumisen alkamisajankohta ei ollut yksiselitteinen kokeessa C10. Kokeen C10 kuvaajaan on mahdollista piirtää kaksi tangenttia. Murtumisen alkamisajankohdaksi on arvioitu noin 10 h tai 40 h leikkausvaiheen aloituksesta. Pelkästään tämän yhden kokeen perusteella on mahdoton

sanoa kummassa kohdassa on murtumisen alkupiste. Selvää kuitenkin on että nopeus kiihtyy hieman 10 h kohdalla. Näyte murtui lopullisesti noin 70 tunnin jälkeen leikkausvaiheen aloittamisesta. Kuvaan 90 on lisätty arvioidut molempien kokeiden murtumisen alkamisajankohdat.

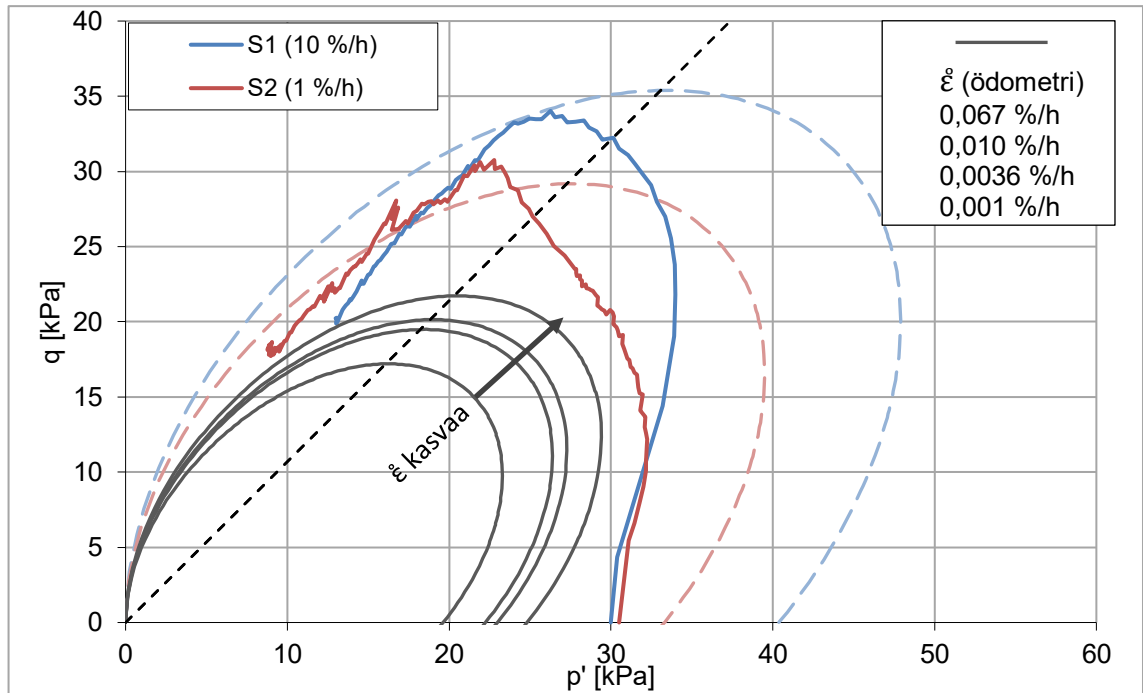


Kuva 90. Mahdolliset murtumisen alkamiskohdat lisättynä p'q-koordinaatistoon.

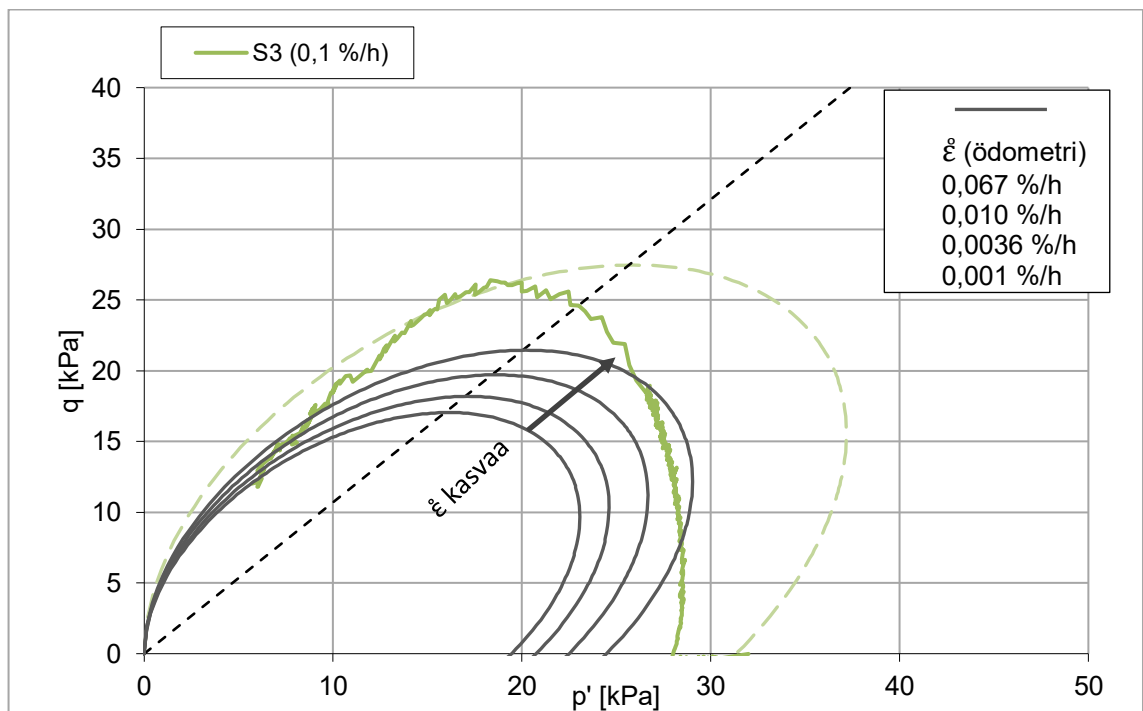
Kokeelle C10 arvioitiin kaksi mahdollista ajankohtaa. Ensimmäinen kulmakertoimen muutos kuvassa 89 voi mahdollisesti johtua myös jostain ulkoisesta tekijästä kuten tärähdyksestä. Kokeet C11 ja C12 eivät saavuttaneet murtoa.

4.5 Koetulosten yhteenveto

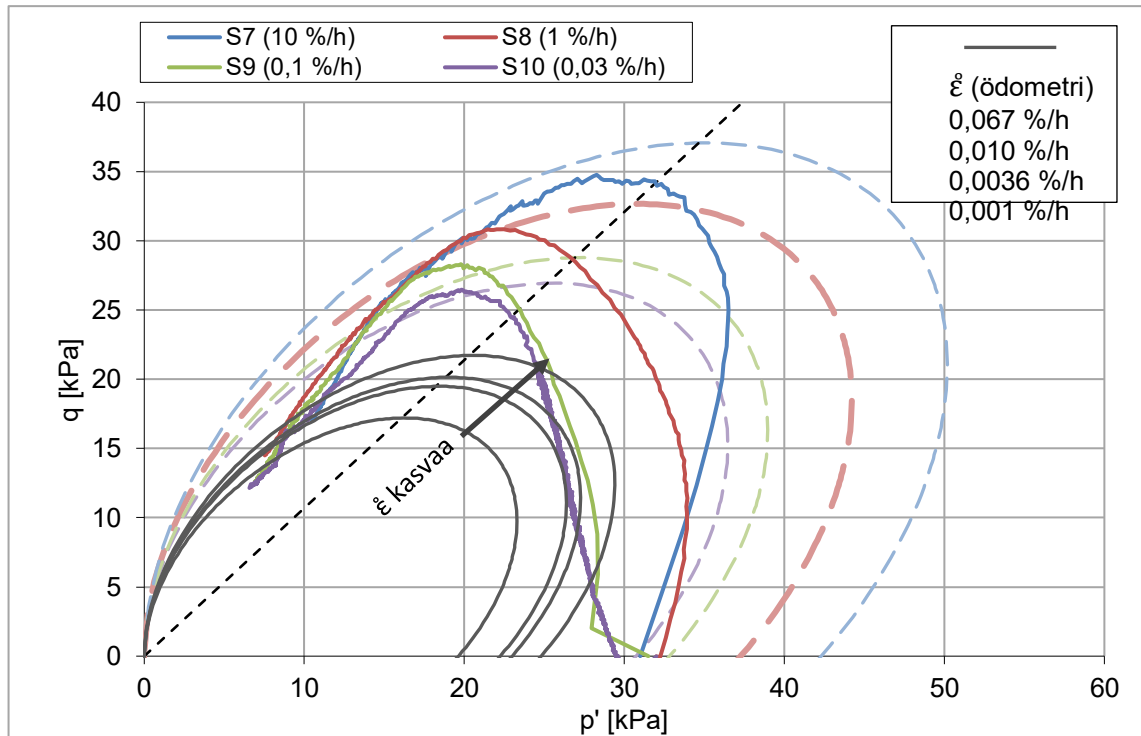
Eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen ödometriakokeiden ja kolmiakiaalikoikeiden, jotka oli tehty samalta syvyydeltä, tuloksista tehdyt myötöpinnat yhdistettiin kuvissa 91...95. Ödometriakokeiden muodonmuutosnopeudet olivat hitaammat, joten myös myötöpinnat olivat pienemmät.



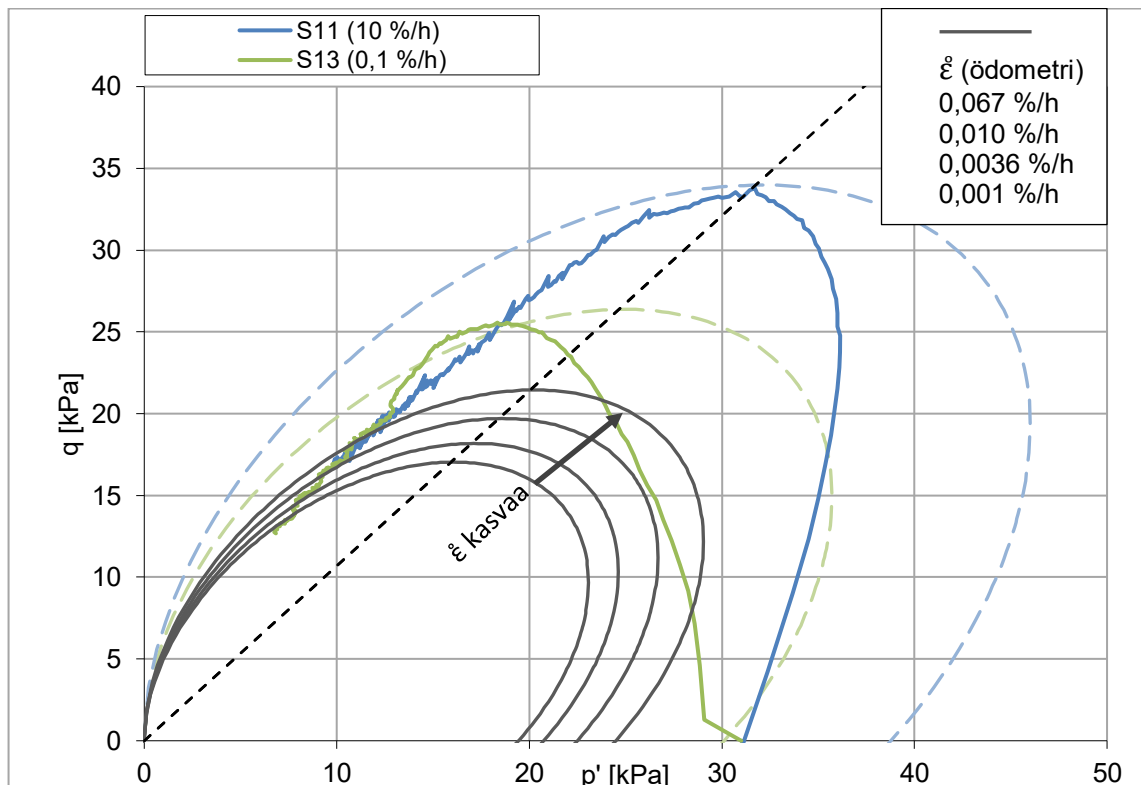
Kuva 91. Kolmiaksaalikoesarjan 1 jännityspolut sekä sovitetut myötöpinnat sekä ödometrikoesarjan 1 myötöpinnat.



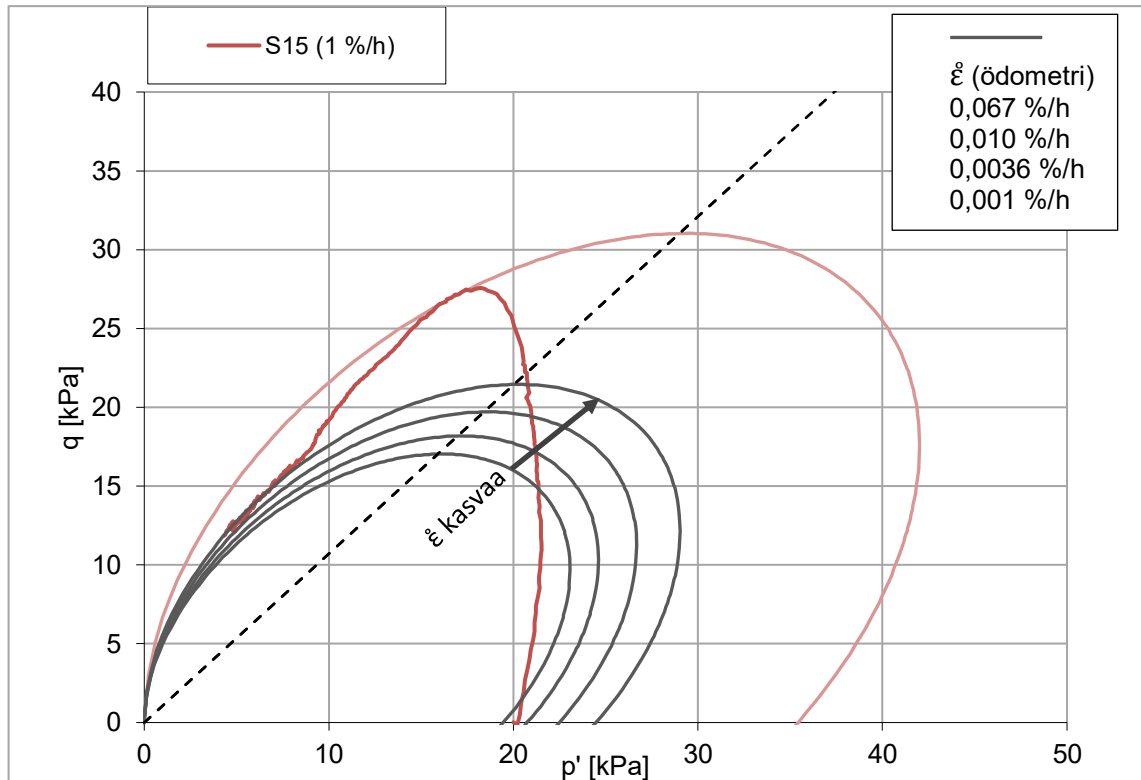
Kuva 92. 3-aksaalikoesarjan 2 jännityspolut sekä sovitetut myötöpinnat sekä ödometrikoesarjan 2 myötöpinnat.



Kuva 93. Kolmiakksiaalikoesarjan 3 jännityspolut sekä sovitetut myötöpinnat sekä ödometrikoesarjan 1 myötöpinnat.



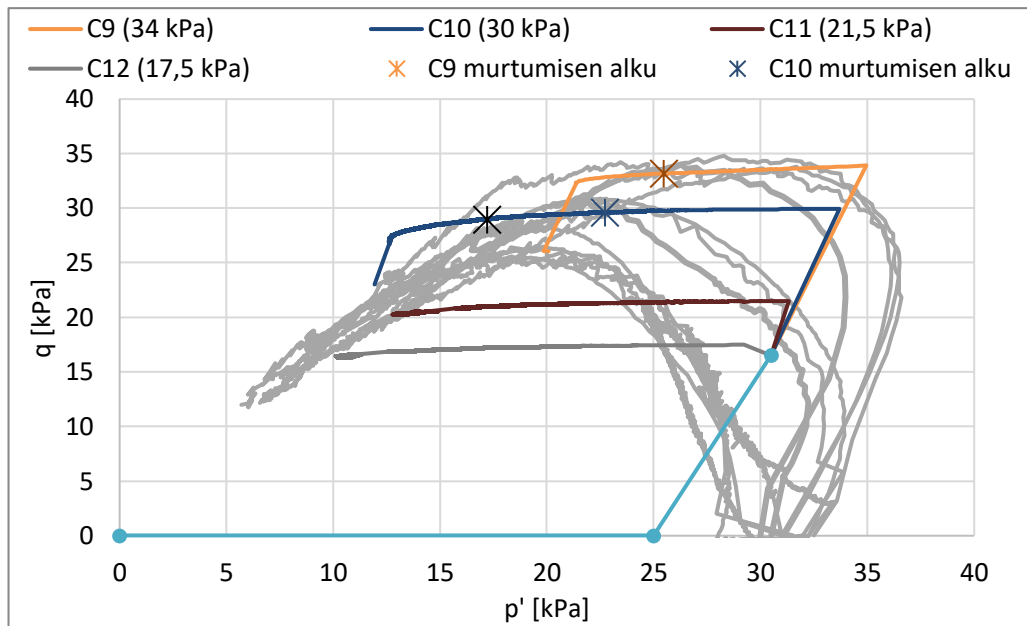
Kuva 94. Kolmiakksiaalikoesarjan 4 jännityspolut sekä sovitetut myötöpinnat sekä ödometrikoesarjan 2 myötöpinnat.



Kuva 95. Kolmiaksaalikoesarjan 5 jännityspolut sekä sovitetut myötöpinnat sekä ödometrikoesarjan 2 myötöpinnat.

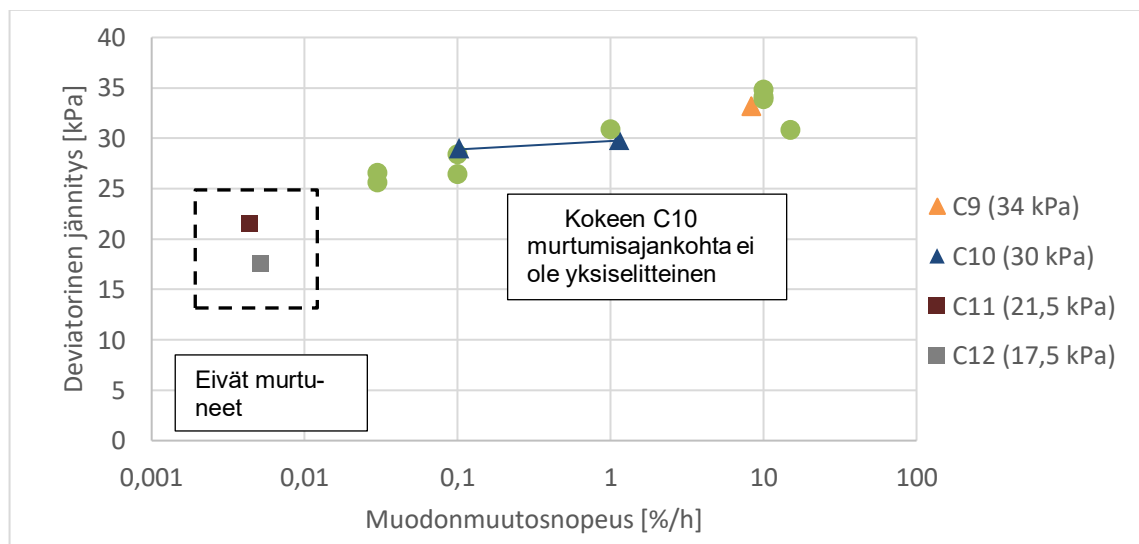
Aikatekijä vaikuttaa sekä ödometrikokeista saatavaan esikonsolidaatiojännitykseen, että kolmiaksaalikokeista saatavaan suurimpaan leikkauslujuuteen. Hypoteesina on, että aikatekijän vaikutus määritetyn myötöpinnan kokoon on sama sekä ödometrikokeissa että kolmiaksaalikokeissa. Kolmiaksaalikokeille määritetty parametrin arvo oli 0,053 määritettynä kuvasta 71. Ödometrikokeille vastaava parametri oli kuvasta 56 määritettynä myös 0,053. Tämä tulos tukee esitettyä hypoteesia.

Kuvaan 96 on koottu eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kolmiaksaalikokeiden jännityspolut p' - q -koordinaatistoon. Kuvaan on lisätty creep-kolmiaksaalikokeiden jännityspolut sekä murtumisen mahdolliset alkamisajankohdat.



Kuva 96. Eri muodonmuutosnopeuksilla tehdyt kolmiakiaalikoheet ja creep-kolmiakiaalikoheet p' - q -koordinaatistossa.

Kuvaan 97 on koottu eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kolmiakiaalikoheiden suurimmat saavutetut deviatoriset jännitykset pysty akselille. Vaaka-akselilla on koekohtaiset muodonmuutosnopeudet. Kuvassa on esitetty lisäksi murtoon asti kestäneiden creep-kokeiden C9 ja C10 mahdollista murtumisajankohtaa vastaavat muodonmuutosnopeudet sekä deviatoriset jännitykset. Creep-kokeet C11 ja C12, jotka eivät saavuttaneet murtoa, ovat myös kuvassa. Niiden muodonmuutosnopeus on otettu kokeiden lopettamishetkeltä.



Kuva 97. Eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyjen kolmiakiaalikoheiden suurin deviatorinen jännitys ja muodonmuutosnopeus vihreällä. Creep-kolmiakiaalikoheiden mahdollisen murtumis- tai lopettamisajankohdan muodonmuutosnopeus ja deviatorinen jännitys.

Kuvan 97 perusteella voidaan todeta, että creep-kolmiakiaalikoiteiden murtokuorma verrattuna murtoajankohdan muodonmuutosnopeuteen ovat samansuuntaisia kuin eri muodonmuutosnopeuksilla tehtyihin kolmiakiaalikoiteissa. Murtumisajankohdan määrittäminen ei kuitenkaan ole yksiselitteistä creep-kokeissa. Varsinkin kokeen C10:n murtumisen alkamisajankohtaa on vaikea määrittää. Kokeen C9 murtumisen alkamisajankohtana vallinnut muodonmuutosnopeus on hyvin lähellä nopeimpien kolmiakiaalikoiteiden nopeuksia ja niiden maksimi deviatorinen jännitys on lähes sama.

Creep-kolmiakiaalikoiteissa jännityspolku kulkee kohti murtoviiva. Pienemmillä kuormilla murtoa ei saavutettu ja muodonmuutosnopeus pieneni lähestyessä nolaa. Voi olla, että niissä murto saavutetaan vasta äärettömän pitkän ajan jälkeen. Kun murtuminen alkaa, muodonmuutosnopeuden pieneneminen ensin pysähtyy, jonka jälkeen se alkaa kasvaa. Tämän muutospiirteen ennustaminen kuorman perusteella ei onnistu vielä tästä koesarjasta.

In-situ tilanne eroaa laboratoriokokeista. Savi ei ole luonnossa täysin suljetussa tilassa vastaavassa kuormitustapauksessa vaan huokosvedenpaine tasoittuu. Kun huokosvedenpaine asettuu tasapainotilaan, koetilannetta vastaavaa murtumista ei pääse tapahtumaan pitkänkään ajan kuluessa.

5. YHTEENVETO

Plastisuuden ei ole todettu vaikuttavan aikatekijään, joka vaikuttaa saven lujuuteen (mm. Graham et al. 1983). Orgaanisen aineksen määrän on kuitenkin todettu vaikuttavan aikatekijään: mitä suurempi on humuspitoisuus, sitä suurempi on vaikutus (Länsivaara 1999). Myös saven sidosten väliset voimat näyttävät vaikuttavan aikatekijään, sillä siltillä ja hiekoilla ei vaikutus ole yhtä suuri kuin savilla. Länsivaara (1999) esitti, että kun hiukkasten väliset kontaktipinnat lisääntyvät, absorboituneen vesivaipan rooli hiukkasen pinnalla lisääntyy, ja lisäksi että kemikaaliset sidokset voivat myös vaikuttaa asiaan.

Työtä varten tehtiin CRS-ödometrikokeita ja kolmiakσιαalikokeita neljälle eri muodonmuutosnopeudella. Ödometrikokeella esikonsolidaatiojännitys kasvoi noin 11 % kun muodonmuutosnopeus kasvoi dekadin verran. Kolmiakσιαalikokeella suljetun leikkauslujuuden muutos oli samansuuruinen muodonmuutosnopeutta muutettaessa. Työtä varten tehtiin lisäksi suljetun tilan creep-kolmiakσιαalikokeita neljällä eri staattisella painolla.

Creep-koelaitteisto rakennettiin työtä varten. Jatkotutkimusta ajatellen, jokaiselle creep-sellille tulisi olla oma pöytä, jolloin pienten värinöiden aiheuttamat vaikutukset mittaukseen saadaan estettyä. Esimerkiksi näytteen murtuminen näkyi viereisessä kokeessa pienenä siirtymän lisäyksenä. Siirtymä oli kuitenkin hyvin pieni, ja sen vaikutus tuskin oli merkittävä kokeen lopputulokseen. Pitkäaikaisissa kokeissa voisi myös miettiä sellipaineen mittaamista, jolloin pystyisi varmistamaan, että syöttöpaine pysyy vakiona koko kokeen ajan.

Pitkäaikaisissa kokeissa lämpötilan muutoksilla voi olla merkitystä. Näytteitä säilytettiin kylmäkaapissa ja kokeet tehtiin normaalissa huonelämpötilassa. Näytteen lämpötila vaikuttaa tutkitusti mm. kolmiakσιαalikokeista saatavaan suljettuun leikkauslujuuteen (Lerouiel 2006). Näytteen lämpeneminen on täten saattanut vaikuttaa jonkin verran koetuloksiin.

Creep-kokeiden murtokuorma verrattuna murtoajankohdan muodonmuutosnopeuteen olivat samansuuntaisia kuin eri muodonmuutosnopeuksilla tehdyissä kolmiakσιαalikokeissa. Murtumisajankohdan määrittäminen ei kuitenkaan ollut yksiselitteistä creep-kokeissa. Suurimmalla jännityksellä tehdyn creep-kokeen murtumisen alkamisajankohtana vallinnut muodonmuutosnopeus oli hyvin lähellä nopeimpien kolmiakσιαalikokeiden nopeutta ja niiden suurin deviatorinen jännitys oli lähes sama.

Creep-kolmiakσιαalikokeissa jännityspolku lähestyi murtoviiva. Pienemmillä nopeuksilla murtoviivaa ei saavutettu ja niiden muodonmuutosnopeudet lähestyivät nollaa. Voi olla, että niissä

murto olisi saavutettu vasta äärettömän pitkän ajan jälkeen. Kun murtuminen alkaa, muodonmuutosnopeuden pieneneminen ensin pysähtyy, jonka jälkeen se kasvaa. Tämän muutospiirteen ennustaminen kuorman perusteella ei onnistu vielä tämän koesarjan perusteella. Asia vaatii lisää tutkimista.

LÄHTEET

Augustesen, A., Liingaard, M. & Lade, P.V. 2004, Evaluation of Time-Dependent Behaviour of Soils, *International Journal of Geomechanics*, vol. 4, no. 3, pp. 137-156.

Barden, L. 1969. Time dependent deformation of normally consolidated clays and peats. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE* 95(SM1), pp. 1-31.

Bjerrum, L. 1973, Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays, *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Russia, 1973*, pp. 111.

Claesson, P. 2003, Long term settlements in soft clays, *Dissertation, Chalmers University of Technology, Department of Geotechnical Engineering, Göteborg*.

Craig, R.F. 2004, *Craig's Soil Mechanics*, 7th edn, Spon Press, New York.

Eriksson, L. 1985, Bestämning av kompressionsegenskaper hos sulfidjord med CRS-teknik, *Forskningsrapport, TULEA 1985:12, Högskolan i Luleå*.

Graham, J., Crooks, J.H.A. & Bell, A.L. 1983, Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays, *Géotechnique*, vol. 33, no. 3, pp. 327-340.

Haavisto, M., Grönlund, T., Lahermo, P. & Stén, C. 1980, Someron kartta-alueen maaperä, *Geologinen tutkimuslaitos, Espoo*.

Havel, F. 2004, Creep in soft soils, *Dissertation edn, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim*.

Head, K.H. 1986, Volume 3: Effective Stress Tests in *Manual of Soil Laboratory Testing* Pentech Press Limited, London, pp. 743-1238.

Helene Lund, K.V. 1977, Methods for reducing undrained shear strength of soft clay, *Swedish Geotechnical Institute, Linköping*.

Holzer, T.L., Höeg, K. & Arulanandan, K. 1973, Excess Pore Pressures during Undrained Clay Creep, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 12-24.

Janbu, N. 1998, Sediment deformations - A classical approach to stress -strain -time behaviour of granular media as developed at NTH over 50 year period, *Bulletin 35, NTNU, Department of Geotechnical Engineering, Trondheim*, 86 p.

Korhonen, K., Gardemeister, R. & Tamminen, M. 1974, *Geotekninen maaluokitus*, VTT, Otaniemi.

Korhonen, K., Järvenmäki, P. & Lojander, M. 1988, Undrained and drained creep in clay, *International Conference on Rheology and Soil Mechanics, Helsinki University of Technology, Otaniemi, Coventry, United Kingdom, September 12-16, 1988*.

Korhonen, K., Lojander, M. & Karstunen, M. 1993, Pehmeikölle maan varaan rakennettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat, *Tielaitos, Helsinki*.

Laaksonen, R. & Lojander, M. 1990, Plastisuusteoria maamekaniikassa in RIL-157-2 Geomekaniikka II, eds. K. Korhonen, J. Hartikainen, R. Hiltunen, H. Jääskeläinen, M. Tuhola & H. Mäkelä, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., , pp. 11-58.

Ladd, C.C. 1991, Stability Evaluation During Staged Construction, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 4, pp. 540-615.

Lappalainen, V., Eerola, M. & Patrikainen, P. 1985, Katsaus geologiaan in RIL-157-1 Geomekaniikka I, eds. K. Korhonen, J. Hartikainen, R. Hiltunen, H. Jääskeläinen & J. Kleemola, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y., Helsinki, pp. 19-72.

Lefebvre, G. & LeBoeuf, D. 1987, Rate Effects and Cyclic Loading of Sensitive Clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 113, no. 5, pp. 476-489.

Lerouiel, S. 2006, The Isotache approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje?, *Proceedings of the 13th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana, Slovenia, May 29-31, 2006, pp. 55.

Lerouiel, S. & Marques, M.E.S. 1996. Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering. Session on Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior. Sessions of ASCE Convention. Washington, D.C., USA, November 10-14, 1996. pp. 1-60.

Lerouiel, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. & Bouchard, R. 1985, Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Géotechnique*, vol. 35, no. 2, pp. 159-180.

Lerouiel, S., Magnan, J. & Tavenas, F. 1990, *Embankments on soft clays*, Ellis Horwood Limited, Chichester.

Liikenneviraston ohjeita 10/2012. 2012. Tien geotekninen suunnittelu. Helsinki, Liikennevirasto, 2012, pp. 87.

Länsivaara, T. 2012, Some aspects on creep and primary deformation properties of soft sensitive Scandinavian clays, *Proceedings of the 16th Nordic Geotechnical Meeting*, Danish Geotechnical Society, , Copenhagen, Denmark, May 9-12, 2012, , pp. 397.

Länsivaara, T. 2010, Failure induced pore pressure by simple procedure in LEM, *Proceedings of the Seventh European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Numge 2010, Trondheim, Norway, June 2-4, 2010, pp. 509.

Länsivaara, T. 1999, A study of the mechanical behavior of soft clay, *Dissertation edn*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering, Trondheim.

Länsivaara, T. (1996). *Maan mekaanisen käyttäytymisen mallintaminen*. Licensiate Thesis, Tampere University of Technology.

Länsivaara, T. 1995, Stress-strain-strain rate relation in oedometer tests. *Proceedings, 70 years of Soil Mechanics*, International Symposium, Istanbul, pp. 109-118.

Länsivaara, T., Lehtonen, V. & Mansikkamäki, J. 2011, Failure induced pore pressure, experimental results and analysis, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada, October 2-6, 2011.

Mesri, G., Febres-Cordero, E., Shields, D.R. & Castro, A. 1981, Shear stress-strain-time behaviour of clays, *Géotechnique*, vol. 31, no. 4, pp. 537-552.

Mesri, G. & Godlewski, P.M. 1977, Time- and Stress-Compressibility Interrelationship, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 103, no. GT5, pp. 417-430.

Perlow, M. & Richards, A.F. 1977, Influence of Shear Velocity on Vane Shear Strength, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 103, no. GT1, pp. 19-32.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tamminne, M. 1979, *Geotekniikka*, 21st edn, Oy Yliopistokustannus/Otatieto, Helsinki.

Roy, M. & Leblanc, A. 1988, Factors Affecting the Measurements and Interpretation of the Vane Strength in Soft Sensitive Clays in Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, ed. A.F. Richards, American Society for Testing and Materials, pp. 117-128.

Sheahan, T.C., Ladd, C.C. & Germaine, J.T. 1996, Rate-dependent undrained shear behaviour of saturated clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 99-108.

Slunga, E. & Helander, R. 1985, On the influence of organic content on the undrained shear strength of cohesive soils, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. A.A. Balkema, Boston, San Francisco, California, USA, August 12-16, 1985, pp. 2349.

Tavenas, F., Lerouiel, S., La Rochelle, P. & Roy, M. 1978, Creep behaviour of an undisturbed lightly overconsolidated clay, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 402-423.

Terzaghi, K. 1931. The static rigidity of plastic clays. *Journal of rheology* 2, 3, pp. 253-262.

Terzaghi, K. 1941. Undisturbed clay samples and undisturbed clays. *Boston Society of Civil Engineers. Journal* 28, 3, pp. 211-231.

Torstensson, B. 1977, Time-dependent effects in the field vane test, *International Symposium on Soft Clay*, Asian Institute of Technology, Bangkok, Bangkok, Thailand, July 5-6, 1977, pp. 387.

Vaid, Y.P. & Campanella, R.G. 1977, Time-Dependent Behavior of Undisturbed Clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 103, no. GT7, pp. 693-709.

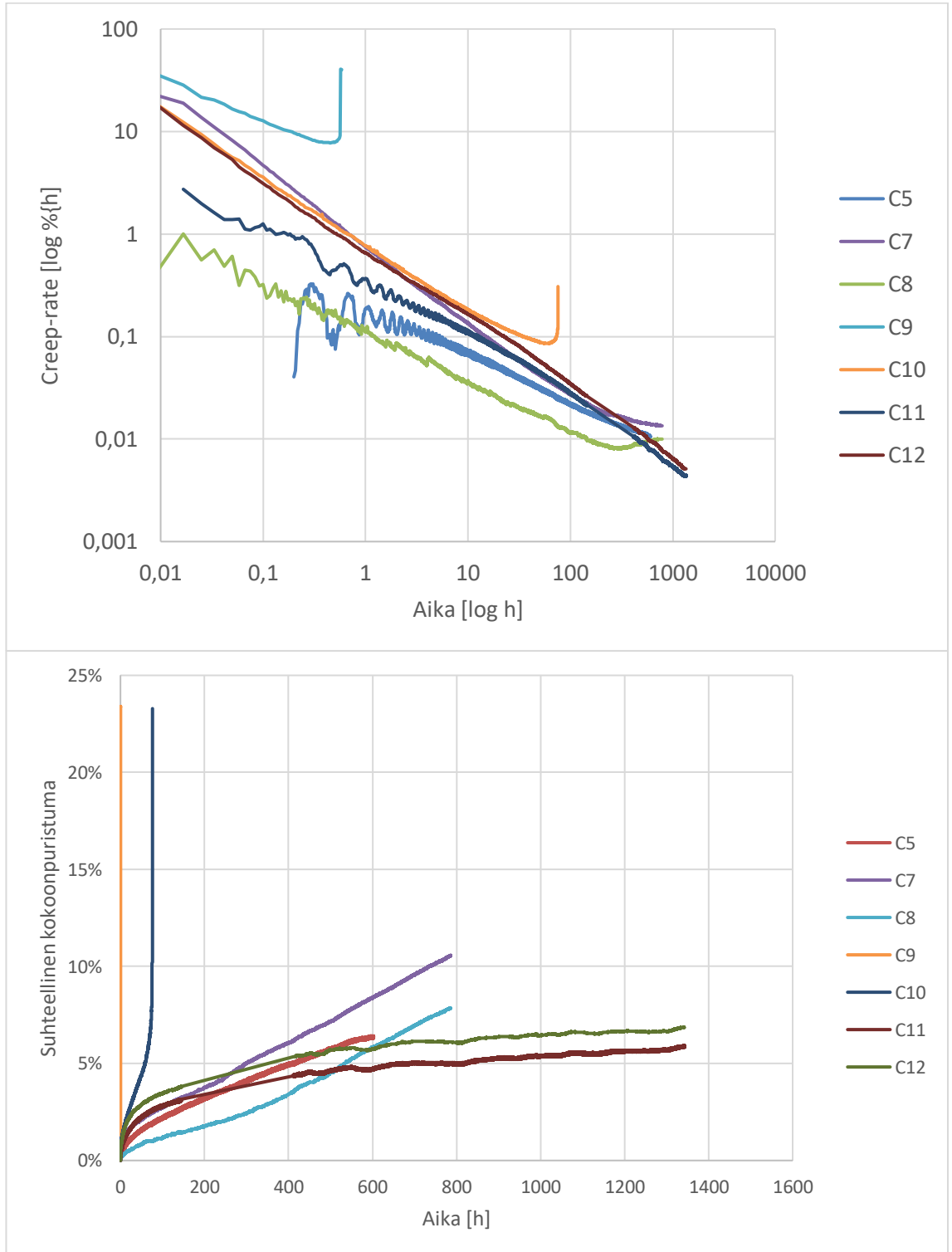
Vaid, Y.P., Robertson, P.K. & Campanella, R.G. 1979, Strain rate behaviour of Saint-Jean-Vianney Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 34-42.

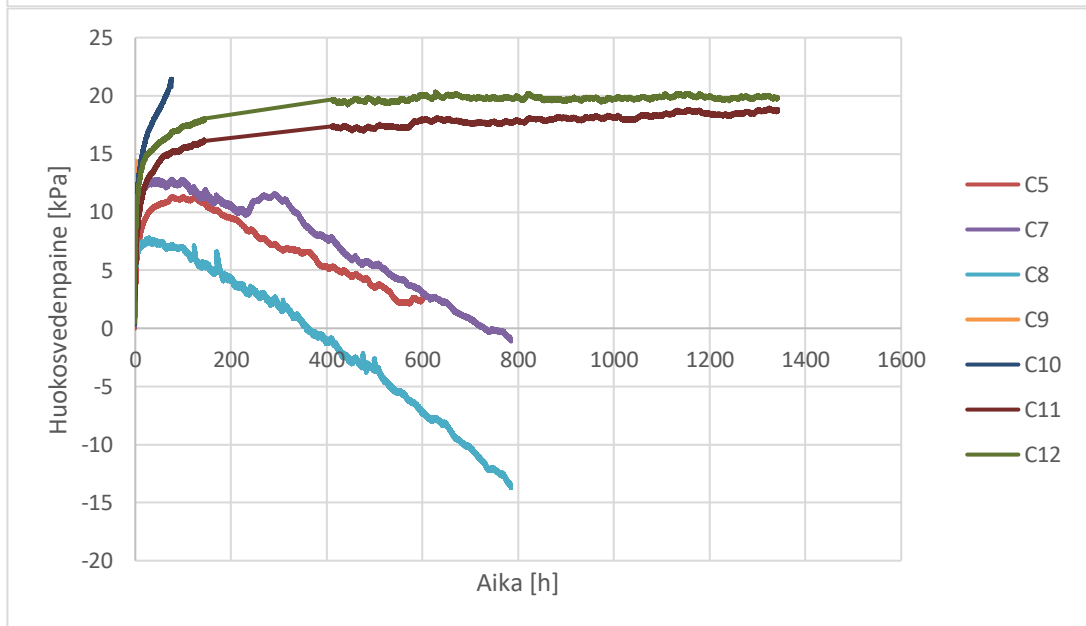
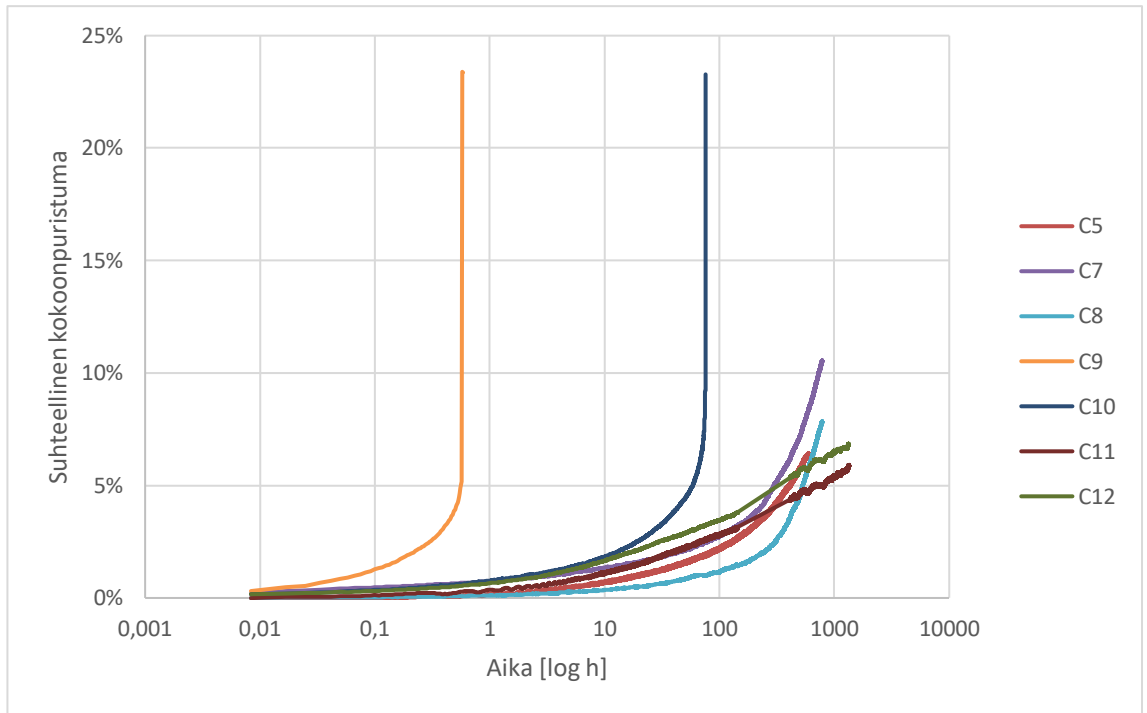
Wood, D.M. 1990, *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York.

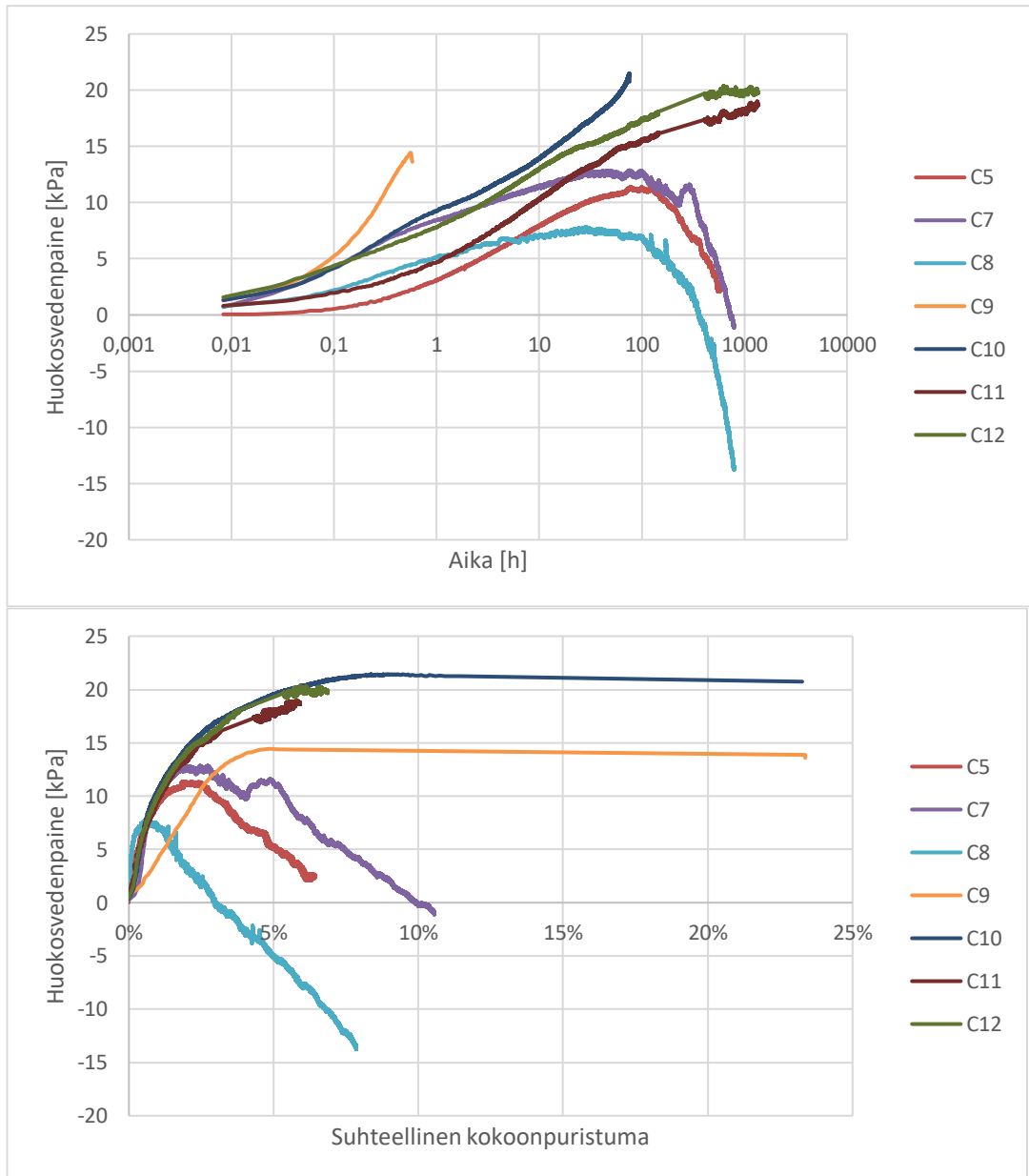
Zhu, J. & Yin, J. 2000, Strain-rate-depended stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clay, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 6, pp. 1272-1282.

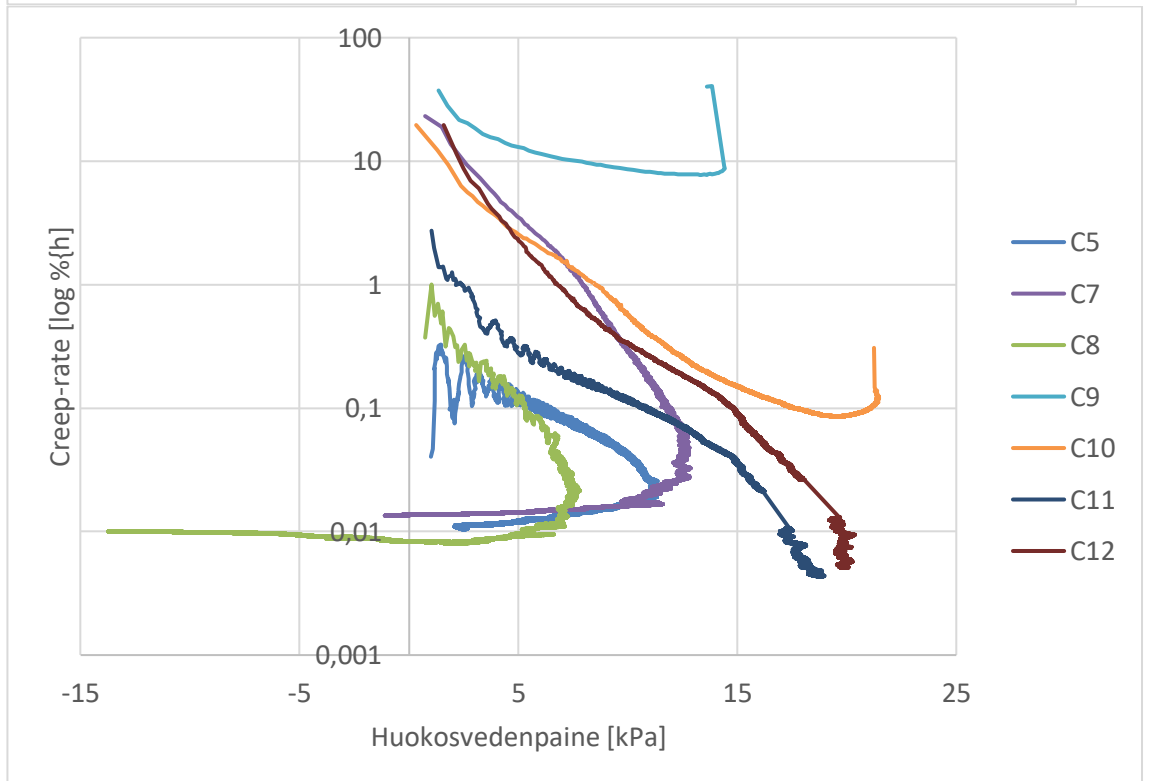
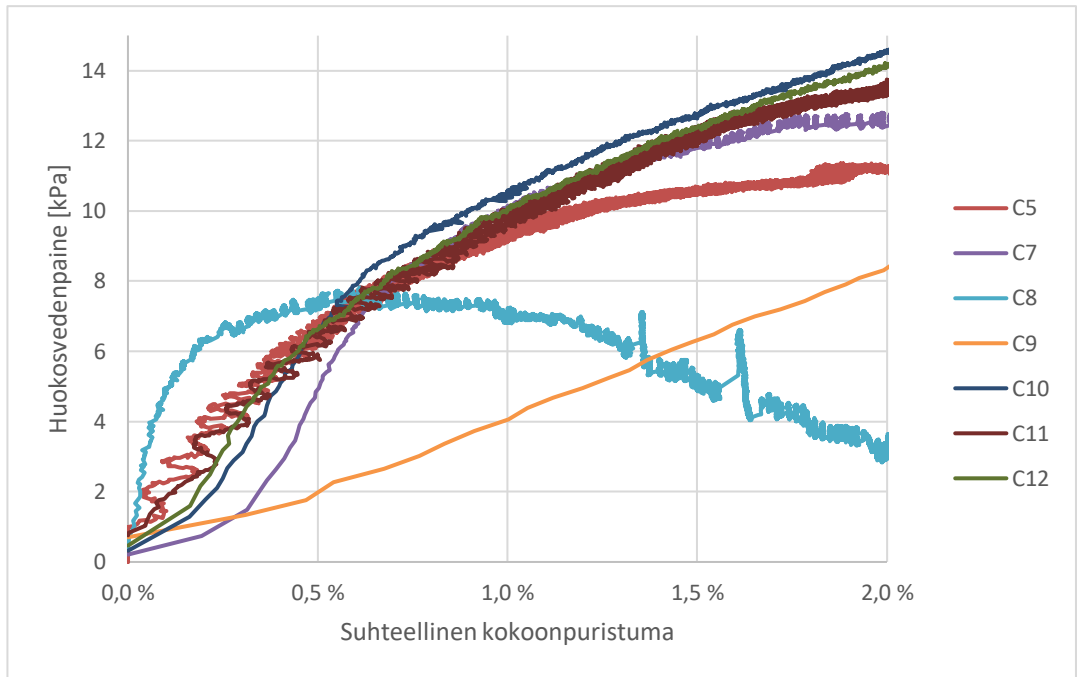
LIITE A: CREEP-KOLMIAKSIAALIKOEKUVAAJIA

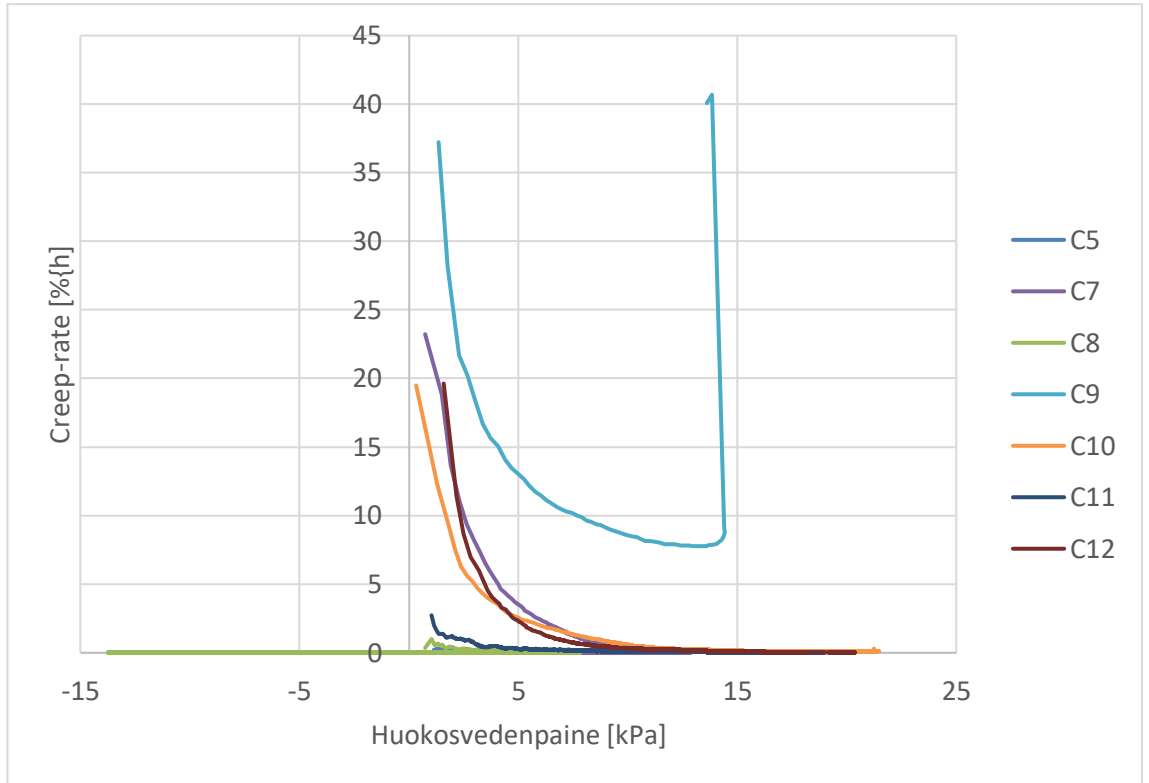
Tähän liitteeseen on koottu creep-kolmiakσιαalikoelaitteistolla tehdyt kokeet, joista on olemassa mittausdataa. Myös epäonnistuneiksi todetut kokeet ovat tässä liitteessä mukana.



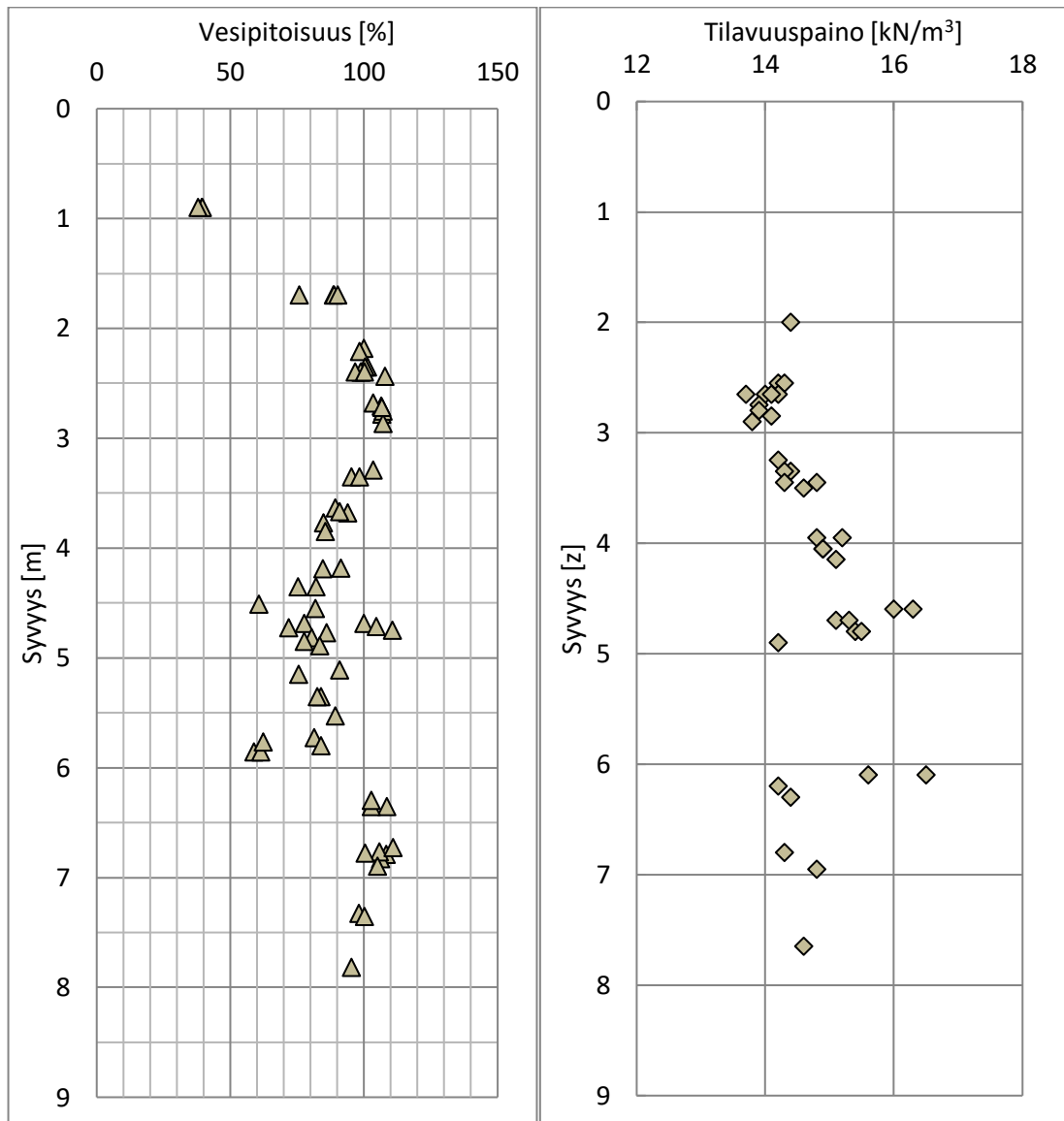


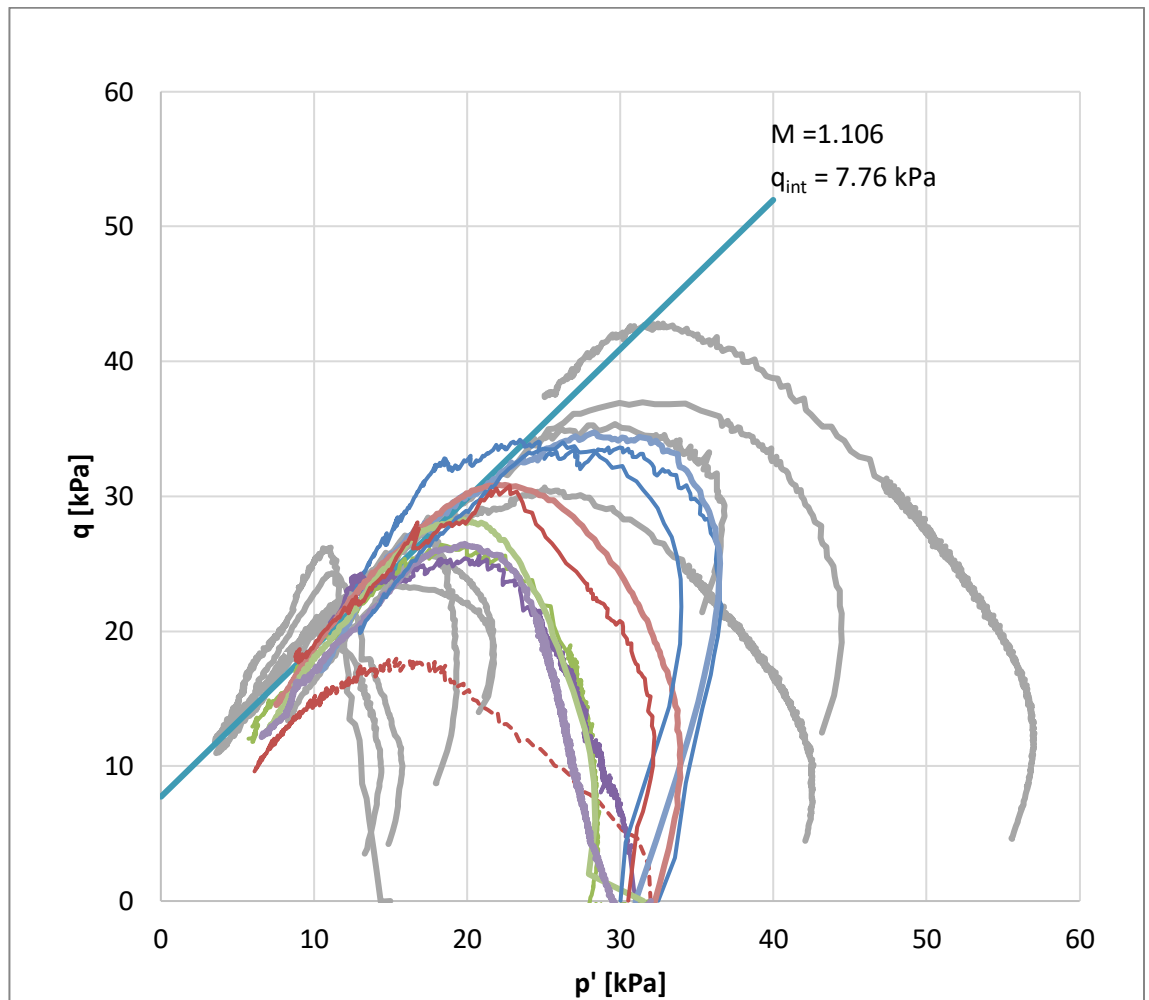
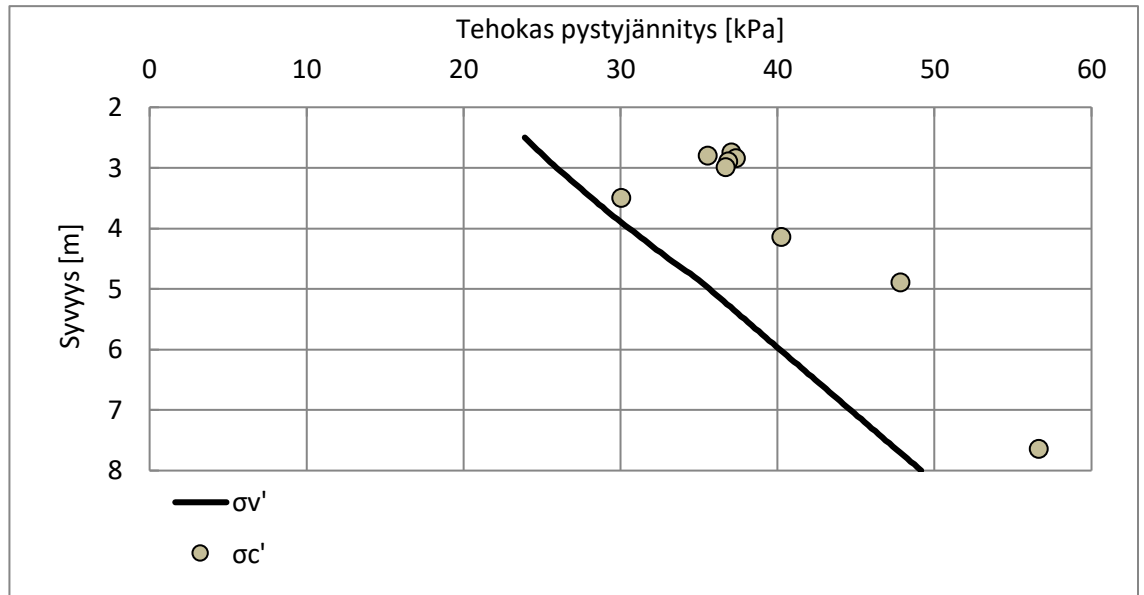






LIITE B: AIKAISEMMAT KOKEET PERNIÖSTÄ





Kuva. Kolmiakiaalikoheet eri muodonmuutosnopeuksilla yhdistettynä harmaalla värillä merkittyihin aikaisempiin kolmiakiaalikokeisiin Perniöstä.

LIITE C: KUVAT 3-AKSIAALIKOENÄYTTEISTÄ

I277_S1



I277_S2



I277_S3



I277_S4



I277_S5



I277_S6



I277_S7



I277_S8



I277_S9



I277_S10



I277_S11



I277_S12



I277_S13



I277_S14



I277_S15



I277_C1



I277_C2



I277_C3



I277_C4



I277_C5



I277_C6



I277_C7



I277_C8