

Tielaitoksen selvityksiä

44/2000

Tim Länsivaara

Painumalaskentamenetelmien käyttökel- poisuuden arviointi

Tielaitos

Tiehallinto

Helsinki 2000

Julkaisua myy
Tiehallinto, julkaisumyynti
Faksi 0204 44 2652

Tielaitos
TIEHALLINTO
Tie- ja liikennetekniikka
Opastinsilta 12 A
PL 33
0521 HELSINKI
Puh.vaihde 0204 44 150

TIIVISTELMÄ

Suomessa käytetään savikerrosten painumalaskentaan yleisesti niin sanottua tangenttimoduulimenetelmää (Janbu 1963). Menetelmässä suhteellinen kokoonpuristuma lasketaan ödometrikokeesta saatavan jännityksestä riippuvan kokoonpuristuvuusmoduulin avulla. Kokoonpuristuvuusmoduulin jännitys-riippuvuutta kuvataan moduuliluvun m ja jännityseksponentin β avulla. Menetelmän käytöstä on saatu joitakin huonoja kokemuksia pehmeillä saviilla, joissa jännityseksponentilla on käytetty negatiivisia arvoja. Nämä huonot kokemukset johtuvat kuitenkin virheistä, joita on tehty koska menetelmää ja sen parametrejä ei tunneta riittävän hyvin. Yleisin virhe on ollut, että moduulilukua ja jännityseksponenttia käytetään yleisinä parametreinä huomioidmatta miltä jännitysväliltä ne on määritetty. Näin laskemalla voidaan saada hyvinkin suuria, täysin epätodellisia painumia. Tangenttimoduulimenetelmän parametrejä tulisikin muuntaa mikäli jännityseksponentin arvo on negatiivinen ja niitä käytetään esikonsolidaatiojännityksen arvolla joka poikkeaa kokeen arvosta. Ainoastaan näin saadaan laskennan kokoonpuristuma vastaamaan ödometrikokeessa havaittua muodonmuutoskäyttäytymistä. Muuntamisen tärkeys kasvaa mitä suurempi negatiivinen lukuarvo jännityseksponentilla on ja mitä suurempi on ero esikonsolidaatiojännityksillä. Mikäli $\beta = 0$ ei moduuliluvun arvo muutu.

Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä perustuu myös kokoonpuristuvuusmoduulin käyttämiseen. Siinä ödometrikokeen kokoonpuristuma- ja moduulikuvaajat jaetaan kolmeen osaan. Koska menetelmässä annetaan moduulille minimiarvo, ei sillä ole mahdollista tehdä yhtä suuria virheitä painumalaskennassa kuin Janbun tangenttimoduulimenetelmällä.

Kokoonpuristuvuusindeksi -menetelmä ja muut puolilogaritmiseen mittakaavaan perustuvat menetelmät ovat tangenttimoduulimenetelmän ja ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän erityistapauksia. Näin ollen ei ole mitään syytä siirtyä käyttämään yksinomaan tällaisia logaritmista jännitystä käyttäviä menetelmiä.

Esikonsolidaatiojännitys annetaan painumalaskennassa usein ylikonsolidaatioasteen OCR avulla. Tämä saattaa kuitenkin johtaa virheellisen esikonsolidaatiojännityksen syvyysriippuvuuteen, etenkin heti kuivakuorikerroksen alapuolella. Yleensä parempi tapa on käyttää niin sanottua ylikonsolidaatiota POP (Pre-Overburden Pressure).

Tärkein asia painumalaskennan parametrien ja esikonsolidaatiojännityksen arvioimisessa on, että ne perustuvat riittävän laajaan ödometrikoe aineistoon. Mikään laskentamenetelmä, parametrien muuntotapa tai esikonsolidaatiojännityksen antamistapa ei korvaa ödometrikokeiden tärkeyttä.

Key words geotechnical calculations, settlements, clay

ABSTRACT

The settlement calculations of clay layers is usually in Finland done with the compression modulus concept by Janbu. The vertical compression is calculated using a stress dependent compression modulus obtained from oedometer tests. The stress dependency of the modulus is described with the aid of a modulus number m and a stress exponent β . There has been some bad experiences in applying the method for soft clays having negative values of the stress exponent. This has, however, been caused by errors due to insufficient knowledge of the method and its parameters. The most common mistake has been to use the parameters as general, without considering if the applied stress range differs from the test. If the parameters are to be used with an other preconsolidation pressure than the one obtained from the oedometer test and if the stress exponent is negative the modulus number has to be modified. Only this way the calculated stress strain response will correspond to the obtained oedometer result. A mathematical modification method is introduced in the report. The importance of the modification increases the higher negative value the stress exponent has. If the value of $\beta = 0$ the value of the modulus number is not changed.

The Swedish method for settlement calculations is also based on the compression modulus. In this method the stress-strain and stress-modulus diagrams are divided into three parts. As a minimum value is given for the modulus it is not possible to make as large errors with the method than with the Janbu compression modulus method.

The compression index method, and other methods using a linear relationship in a semi-logarithmic stress-strain diagram are special cases of the Janbu and the Swedish compression modulus methods. There is therefore no reason in starting to apply only methods like the compression index method.

The preconsolidation pressure is often given with the aid of the overconsolidation ration OCR . This may, however, cause a distorted preconsolidation profile with depth, especially just below the dry crust. A better way is often to use the pre-overburden pressure POP to define the preconsolidation pressure.

The most important matter in evaluating the parameters for the settlement calculation is that they are based on a sufficient number of experimental data. No calculation method, modification method or way of giving the preconsolidation pressure replaces the importance of oedometer testing.

ALKUSANAT

Tämä selvitys on tehty parantamaan nykyisiä saven konsolidaatiopainuman laskentamenetelmiä. Suomessa yleisesti käytetty Janbun tangenttimoduulimenetelmä on osoittautunut käyttökelpoiseksi menetelmäksi, kunhan menetelmään liittyvät lähinnä matemaattiset ongelmat vältetään. Keinot tähän on selvityksessä kartoitettu. Ruotsalainen konsolidaatiopainuman laskentamenetelmä arvioidaan hyvin käyttökelpoiseksi eikä sen käytölle ole esteitä jatkossa. Puolilogaritmisten laskentamenetelmien käyttö tulee harkita kussakin tapauksessa erikseen. Vesipitoisuusmenetelmää on järkevää käyttää lähinnä painumien alustaviin tarkasteluihin tai niiden suuruusluokan oikeellisuuden tarkistamiseen.

Työn on tehnyt Tim Länsivaara SCC Viatek Oy:stä. Tielaitoksen puolelta työtä ovat valvoneet Pentti Salo (Tiehallinto) sekä Mikko Smura ja Panu Tolla (Tuotanto/Konsultointi).

Helsingissä lokakuussa 2000

*Tielaitos
Tie- ja liikennetekniikka*

ALKULAUSE VERKKOVERSIOON

Tämä verkkoversio on sisällön osalta identtinen kopio Tielaitoksen julkaisusta TIEL 3200630 (ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-681-2, Oy Edita Ab Helsinki 2000). Painotuotetta myy Tiehallinnon julkaisumyynti, faksi 0204 44 2652 tai sähköposti julkaisumyynti@tiehallinto.fi.

Helsingissä helmikuussa 2003

*Tiehallinto
Tekniset palvelut*

SISÄLTÖ

<u>1 JOHDANTO</u>	<u>7</u>
<u>2 SAVIKERROSTEN JÄNNITYS-MUODONMUUTOS-AIKA HISTORIA</u>	<u>7</u>
<u>3 JANBUN TANGENTTIMODUULIMENETELMÄ</u>	<u>10</u>
3.1 Tangenttimoduulimenetelmän esittely	10
3.2 Tangenttimoduulimenetelmän virhemahdollisuudet	12
3.2.1 Yleistä	12
3.2.2 Virheiden havainnollistaminen	13
3.3 Esikonsolidaatiojännityksen antaminen painumalaskennassa	19
3.4 Tangenttimoduulimenetelmän parametrien oikea käyttö	20
3.4.1 Syyt nykyisen käytännön mukaisen parametrien käytön virheisiin	20
3.4.2 Moduuliluvun muuntaminen	21
3.4.3 Esimerkkejä tangenttimoduulimenetelmän käytöstä	23
<u>4 RUOTSALAINEN KONSOLIDAATIOPAINUMAN LASKENTAMENETELMÄ</u>	<u>28</u>
4.1 Menetelmän esittely	28
4.2 Parametrien muuntaminen	29
4.3 Arvio menetelmän soveltuvuudesta	36
<u>5 PUOLILOGARITMISET LASKENTAMENETELMÄT</u>	<u>37</u>
5.1 Yleistä	37
5.2 Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä	37
5.3 Vesipitoisuusmenetelmä	38
5.4 Arvio menetelmien soveltuvuudesta	40
<u>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</u>	<u>41</u>
<u>7 KIRJALLISUUTTA</u>	<u>43</u>

1 JOHDANTO

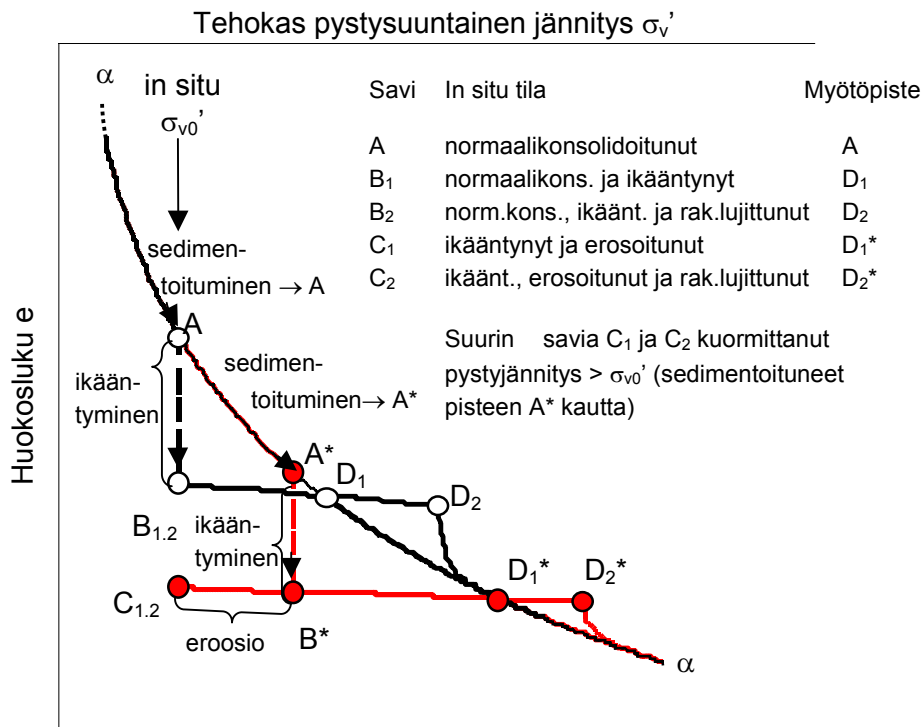
Suomessa käytetään savikerrosten painumalaskentaan yleisesti niin sanottua tangenttimoduulimenetelmää. Menetelmässä kokoonpuristuma laskeetaan ödometrikokeesta saatavan jännityksestä riippuvan kokoonpuristuvuusmoduulin avulla. Kokoonpuristuvuusmoduulin jännitys-riippuvuutta kuvataan moduuliluvun m ja jännityseksponentin β avulla. Menetelmän käytöstä on saatu joitakin huonoja kokemuksia pehmeillä savilla, joilla jännityseksponentin arvo on ollut negatiivinen. Nämä huonot kokemukset johtuvat kuitenkin virheistä, joita on tehty koska menetelmää ja sen parametrejä ei tunneta riittävän hyvin. Yleisin virhe on ollut, että moduulilukua ja jännityseksponenttia käytetään yleisinä parametreinä huomioimatta miltä jännitysväliltä ne on määritetty. Toinen yleisesti tehty virhe on esikonsolidaatiojännityksen antaminen ylikonsolidaatioasteen (OCR) avulla. Näin annettuna on esikonsolidaatiojännityksen syvyysriippuvuus yleensä virheellinen.

Tämän työn tavoitteena on parantaa nykyistä saven konsolidaatiopainumalaskentamenetelmää pyrkimällä ennen kaikkea poistamaan nykyisin usein tehtävät virheet. Työssä tuodaan esiin ja havainnollistetaan kyseiset virheet, sekä esitetään keinot niiden välttämiseksi. Lisäksi työssä esitellään muita painumalaskentamenetelmiä sekä käsitellään niiden soveltuvuutta suomalaisille saville. Koska ongelmat koskevat lähinnä savien normaalikonsolidoitunutta aluetta keskitytään tässä työssä lähinnä siihen.

2 SAVIKERROSTEN JÄNNITYS-MUODONMUUTOS-AIKA HISTORIA

Saven muodonmuutosominaisuuksien, sekä niiden kuvaamiseen käytettävien mallien arvioiminen edellyttää, että tunnetaan niihin mahdollisesti vaikuttaneet mekanismit. Tärkeitä tekijöitä ovat jännitys- ja aikahistoria sekä rakenteellinen lujittuminen. Esimerkiksi esikonsolidaatiojännitys määrittellään monasti suurimpana jännityksenä johon savi on konsolidoitunut. Kuitenkin ödometrikokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys kuvaa saven rakenteellista myötäämistä ja riippuu kaikista edellä esitetyistä tekijöistä. Tämän johdosta se poikkeaa monesti suurimmasta savea kuormittaneesta tehokkaasta jännityksestä. Saven viskoosista ominaisuudesta johtuen esikonsolidaatiojännitys on lisäksi riippuvainen sekä muodonmuutosnopeudesta että lämpötilasta. Seuraavassa pyritään antamaan lyhyt perusta saven jännitys-muodonmuutos-aika historiasta.

Savi joka on vastikään saavuttanut tasapainotilan painonsa suhteen voidaan luokitella nuoreksi normaalikonsolidoituneeksi saveksi (Bjerrum 1973). Kuormituksen kasvaminen johtaa tällaisella savella heti suuriin muodonmuutoksiin initiaalitalan sijaitessa neitseellisellä kokoonpuristumakäyrällä α - α , piste A, kuva 1.



Kuva 1. Saven jännitys-aika historian ja rakenteellisen lujittumisen vaikutus saven muodonmuutuskäyttäytymiseen eri tyyppisillä savilla. Kuvan savilla on kaikilla sama in situ tehokas pystysuuntainen jännitys σ'_{v0} . Erilaisista jännitys-aika historioista johtuen saven in situ huokosluku on erilainen, pisteet A, B ja C. Tästä johtuen saven myötöjännitykset ovat myös erisuuruisia. Näihin in situ tiloihin voi myös liittyä rakenteellista lujittumista, mikä edelleen kasvattaa myötöjännitystä.

Mikäli tehokas jännitys pysyy vakiona nuorella savella, sen huokosluku pienenee edelleen sekundaaripainuman johdosta, piste B kuva 1. Tästä ikääntymisestä johtuvasta huokosluvun pienemisestä johtuen savi pystyy ottamaan lisäkuormaa ilman, että välittömästi syntyy suuria muodonmuutoksia. Tällainen ikääntynyt normaalikonsolidoitunut savi myötää neutraalisella kokoonpuristumakäyrällä α - α , piste D₁ kuva 1. Sen myötöjännitys on siten suurempi kuin sitä koskaan kuormittanut tehokas jännitys.

Erosion tai pohjavedenpinnan vaihtelun seurauksena in situ tehokas jännitys voi olla pienempi kuin mitä se on ollut aikaisemmin, jolloin savi voidaan luokitella ylikonsolidoituneeksi. Mahdollinen jännitys-aikahistoria voi tällöin olla esimerkiksi seuraava: sedimentoitumisesta johtuva konsolidoituminen α - α käyrää pitkin pisteeseen A*, ikääntymisestä johtuva huokosluvun pieneminen pisteeseen B* ja eroosion aiheuttama tehokkaan jännityksen pieneminen pisteeseen C. Pisteessä C huokosluku voi edelleen pienetä, olla vakio tai kasvaa, riippuen aikaisemmasta jännitys- ja aikahistoriasta sekä saven ominaisuuksista. Tällaisen saven myötöjännitys, piste D₁* kuva 1, on siten riippuvainen sekä jännitys- että aikahistoriasta.

Saven muodonmuutoskäyttäytymistä ei voida kuitenkaan selittää ainoastaan jännitys- ja aikahistorian avulla. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että in situ näytteillä huokosluku voi olla suurempi kuin mitä laboratoriossa konsolidoituneilla näytteillä (Mesri et al. 1975, Burland 1990, Smith et al. 1992). Savi ei siis ole myötänyt vielä α - α käyrällä vaan vasta tämän jälkeen. Tätä kutsutaan rakenteelliseksi lujittumiseksi (engl. structuration) ja se voi olla esimerkiksi kemiallisten reaktioiden tai jäätyksen aikaansaamaa. Rakenteellista lujittumista on havaittu myös laboratoriossa, missä sen on todettu riippuvan saven ominaisuuksista. Esimerkiksi humuspitoisuuden kasvaessa on rakenteellisen lujittumisen havaittu olevan vähäisempää (Perret et al. 1995). Rakenteellisesti lujittuneella savella on pieni ylimääräinen reservi ottaa vastaan kuormaa ennen rakenteellista myötöä. Sen myötäessä, pisteet D_2 ja D_2^* kuva 1 ovat muodonmuutokset kuitenkin yleensä suuria huokosluvun romahtaessa α - α käyrälle.

Rakenteellinen lujuus on herkkä häiriintymiselle, eikä sitä yleensä voida havaita kuin hyvälaatuisilla näytteillä. Sitä ei myöskään välttämättä havaita portaittaisilla ödometrikokeilla mikäli kuormitusportaiden väli on suuri.

Suomalaiset savet ovat yleensä joko normaalikonsolidoituneita, tai lievästi ylikonsolidoituneita, ja niiden vesipitoisuus on suuri. Tällöin in situ tila on jännitys-huokoslukukuvaajalla lähellä α - α käyrän jyrkintä osaa. Myötöjännityksen ylittymistä seuraa tällöin suuret muodonmuutokset, etenkin mikäli savella on ollut rakenteellista lujuutta. Ödometrikokeista voidaankin usein havaita tangenttimoduulin romahtaminen hetkeksi hyvin alas, ja tätä seuraava monasti lähes lineaarinen moduulin kasvu kun α - α käyrä on saavutettu. Kun tällaisella savella käytetään tangenttimoduulimenetelmää joudutaan normaalikonsolidoituneella alueella useimmiten käyttämään negatiivista jännityksen eksponenttia.

Savilla, joilla vesipitoisuus on alhainen on esikonsolidaatiojännityksen havaitseminen monesti vaikeampaa, koska kokoonpuristumisen kasvu esikonsolidaatiojännityksen jälkeen on vähäisempää. Tällaiset savet ovat usein myös karkearakeisempia, ja samalla häiriintymisherkempiä, mikä edelleen vaikeuttaa esikonsolidaatiojännityksen havaitsemista.

3 JANBUN TANGENTTIMODUULIMENETELMÄ

3.1 Tangenttimoduulimenetelmän esittely

Tangenttimoduulimenetelmä perustuu suoraviivaiseen, klassisessa fysiikassa paljonkäytettyyn syy-seuraus suhteen tarkasteluun, jossa vastus määritetään vaikutuksen ja vasteen avulla, yhtälö (1).

$$Vastus R = \frac{\text{inkrementaalinen vaikutus}}{\text{inkrementaalinen vaste}} \quad (1)$$

Tarkasteltaessa maan muodonmuutosta kuormituksen johdosta on tehokkaan jännityksen lisäys vaikutus ja muodonmuutos vaste. Maan vastukseksi saadaan tällöin klassisen määritelmän mukaan:

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (2)$$

missä M = tangenttimoduuli (vastus)
 $d\sigma'$ = jännityslisäys inkrementti (vaikutus)
 $d\varepsilon$ = muodonmuutos inkrementti (vaste)

Toisin kuin usealla klassisen fysiikan sovellutuksella (sähköinen vastus, kimmoinen vastus jne.), maan vastus on epälineaarinen. Janbu (1963) esitti tangenttimoduulille seuraavan yleisen yhtälön:

$$M = m\sigma_a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a} \right)^{1-\beta} \quad (3)$$

missä m = moduuliluku
 β = jännityseksponentti
 σ' = tehokas jännitys
 σ_a = referenssijännitys = 100 kPa

Syy referenssijännityksen käyttämiselle yhtälössä on, että näin muodonmuutosparametreistä saadaan dimensiottomia.

Mikäli jännityseksponentti β on yhtä kuin nolla saadaan moduulille yksinkertainen lineaarisesti jännityksestä riippuva lauseke (4).

$$M = m\sigma' \quad (4)$$

Yhtälö muodonmuutokselle saadaan muodostettua yhtälöiden (2), (3) ja (4) avulla integroimalla jännitysmuutoksen yli. Mikäli jännitys kasvaa alkuarvosta σ'_0 arvoon σ' , saadaan muodonmuutokselle yhtälö:

$$\varepsilon = \int_{\sigma'_0}^{\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma_a} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_a} \right)^\beta \right] \quad \beta \neq 0 \quad (5a)$$

$$\varepsilon = \int_{\sigma'_0}^{\sigma'} \frac{d\sigma'}{M} = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad \beta = 0 \quad (5b)$$

Tangenttimoduulimenetelmän käytöstä on saatu vuosien varrella runsaasti kokemuksia. Eri maalajeille käytetään yleensä hieman eri muunnoksia yhtälöstä (3). Yleisimmät muunnokset ovat seuraavat:

- Saven ylikonsolidoituneella alueella käytetään yleensä yksinkertaisuuden vuoksi vakiomoduulia, eli $M = M_{OC}$. Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää yhtälöä (3).
- Hiekalla ja silttisellä hiekalla jännityseksponentti vaihtelee yleensä välillä $\beta = 0,4 \dots 0,65$. Arvoa $\beta = 0,5$ voidaan yleensä pitää hyvänä keskiarvona, jolloin moduulille saadaan lauseke $M = m\sqrt{\sigma' \cdot \sigma_a}$. Hiekalla moduuliluku vaihtelee tällöin tyypillisesti välillä $m = 100 \dots 500$ (Janbu 1985, PLAXIS 1998).
- Kansainvälisessä kirjallisuudessa esiintyy savilla usein jännityseksponentin arvona $\beta = 0$, tai tätä vastaavia yhtälöitä, kuten esimerkiksi kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä. Tällöin tangenttimoduulin yhtälö supistuu yhtälössä (4) esitettyyn muotoon. Kyseisillä savilla vesipitoisuus on yleensä alhaisempi kuin suomalaisilla savilla. Janbu on esittänyt runsaasti aineistoa moduuliluvun vaihtelusta vesipitoisuuden funktiona (esim. Janbu 1985). Näiden pohjalta hän esitti (1998) seuraavan empiirisen yhtälön moduuliluvulle normaalikonsolidoituneella alueella:

$$m = \frac{700\%}{w_n} \quad \text{epävarmuus } \pm 30 \%. \quad (6)$$

missä w_n = saven luonnollinen vesipitoisuus

Jos vesipitoisuus on esimerkiksi $w_n = 50 \%$, saadaan moduuliluvuksi $m = 14 \pm 4$. Minimiarvo vastaa Janbun mukaan savia, jolla esikonsolidaatijännityksen arvo on pieni (< 100 kPa), ja maksimi arvo savia jolla esikonsolidaatijännityksen arvo on suuri (> 1000 kPa).

On syytä korostaa, että yhtälö on tarkoitettu ainoastaan kun jännityseksponentin arvo on nolla. Lisäksi on huomautettava, että Janbun aineisto pohjautuu pääosin saviin, joiden vesipitoisuus on alle 70% . Ottamalla nämä asiat huomioon voidaan yhtälöä (6) käyttää myös suomalaisilla savilla moduuliluvun alustavassa arvioimisessa.

- Kuten luvussa 2 tarkemmin käsiteltiin, putoaa moduuli suomalaisilla savilla esikonsolidaatiojännityksen jälkeen usein hetkellisesti hyvin alas. Tästä johtuen joudutaan monesti käyttämään negatiivisia jännityseksponentin arvoja. Tyypillisesti jännityseksponentin arvo vaihtelee välillä $\beta = 0 \dots -1$. On hyvä huomata, että jännityseksponentin arvo $\beta = -1$ tarkoittaa, että tangenttimoduulin arvo kasvaa suhteessa jännityksen toiseen potenssiin. Suomessa yleisesti käytetty tangenttimoduulimenetelmän parametrien määrittäminen perustuu mitatun jännitys-kokoonpuristumakuvaajan käyränsovitukseen. Tällöin on joillakin savilla mahdollista saada jännityseksponentin arvoksi jopa luokkaa $\beta = -2$ olevia arvoja. Näin suuria negatiivisia arvoja tulisi kuitenkin pyrkiä välttämään, koska moduuli kasvaa suurilla jännityksillä tällöin usein aivan liian suureksi. Suurten negatiivisten jännityseksponenttien käyttäminen lisää myös painumalaskennan virheiden riskiä.

3.2 Tangenttimoduulimenetelmän virhemahdollisuudet

3.2.1 Yleistä

Janbun tangenttimoduulimenetelmän käytöstä on saatu joitain huonoja kokemuksia. Usein nämä ovat olleet epärealistisen suuria laskettuja painumia. Kyseiset tulokset johtuvat kuitenkin suurimmalta osalta virheistä menetelmän käytössä.

Usein tehty virhe tangenttimoduulimenetelmän käytössä on, että moduulilukua ja jännityseksponenttia käytetään yleisinä parametreinä huomioimatta miltä jännitysväliltä ne on määritetty. Parametrien määrittämisen perustuessa Suomessa käyränsovitukseen ei mitään systematisoitua järjestelmää, esimerkiksi vakio jännityseksponentin arvoa, ole juurikaan käytetty. Tällöin on tärkeää, että ödometrikokeesta määritettyjä moduulilukua ja jännityseksponenttia käytetään aina yhdessä, pitäen mielessä että ne ovat muodonmuutoskäyrän sovituskäyrän alkupisteen sijainti. Tällöin parametrejä tulisi käyttää suoraan vain sillä jännitysvälillä josta ne on määritetty. Mikäli parametrejä käytetään esimerkiksi pienemmillä jännityksillä kuin miltä ne on määritetty, voi tämä johtaa suuriin virheisiin negatiivisilla jännityseksponentin arvoilla. Näin tehdyn virheen suuruus on sitä suurempi, mitä suurempaa negatiivista jännityseksponentin arvoa on käytetty.

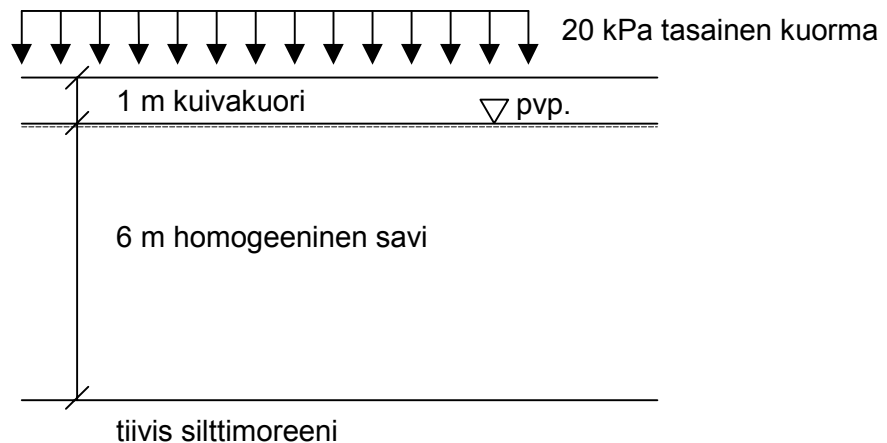
Toinen virhe mitä tehdään on esikonsolidaatiojännityksen antaminen ylikonsolidaatioasteen avulla. Tämä johtaa yleensä täysin virheelliseen esikonsolidaatiojännityksen syvyysriippuvuuteen. Koska parametrien käytössä tehdyt virheet liittyvät oleellisesti jännitysväliin jolla niitä käytetään, ja sitä kautta myös esikonsolidaatiojännityksen antamiseen, käsitellään virheiden syntyä yhdessä.

3.2.2 Virheiden havainnollistaminen

Tässä luvussa havainnollistetaan parametrien käytössä ja esikonsolidaatiojännityksen antamisessa yleisesti tehtäviä virheitä esimerkkien avulla. Jotta nämä virheet tulisivat mahdollisimman selkeästi esille, on esimerkkejä yksinkertaistettu muilta osin. Tämän takia on jännityslisäys annettu vakioliisäyksenä, ja ödometrikuvaajista on annettu ainoastaan parametrikäyrät.

Esimerkki 1.

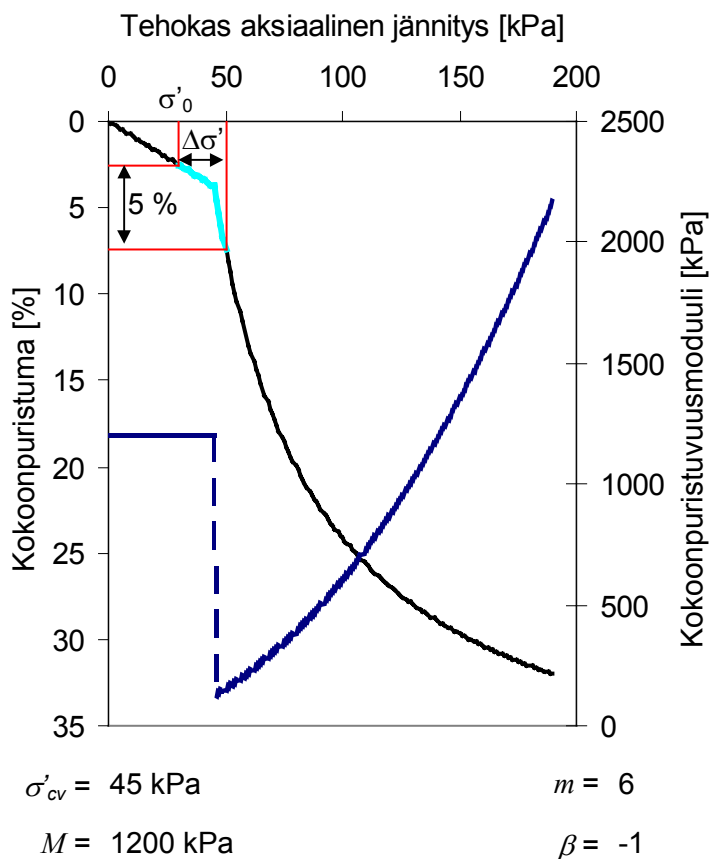
Tarkastellaan kuvan 2 mukaista tapausta. Pohjamaa muodostuu 1 m kuivakuorikerroksesta, jonka alapuolella on 6 m paksu homogeeninen savikerros. Savikerroksen alla on tiivis silttimoreeni. Pohjavedenpinta on kuivakuorikerroksen alapuolella tasolla -1 maanpinnasta. Tehtävänä on määrittää homogeenisen savikerroksen konsolidaatiopainuma 20 kPa tasaisen kuormituksen johdosta.



Kuva 2. Esimerkin 1 pohjasuhteet ja kuormitus.

Homogeenisen savikerroksen kokoonpuristumisominaisuuksien arvioimiseksi on olemassa yksi, 4 m syvyydeltä oleva ödometrikoe. Kokeen tulokset on esitetty kuvassa 3. Esikonsolidaatiojännitykseksi on ödometrikokeesta saatu $\sigma'_{cv} = 45$ kPa. Luonnontilainen jännitys syvyydellä 4 m on $\sigma'_{v0} = 30$ kPa, jolloin ylikonsolidoitumisaste olisi tällä syvyydellä $OCR = 1,5$. Moduuliluvuksi on normaalikonsolidoituneella alueella saatu $m = 6$ ja jännityksenpotentiksi $\beta = -1$

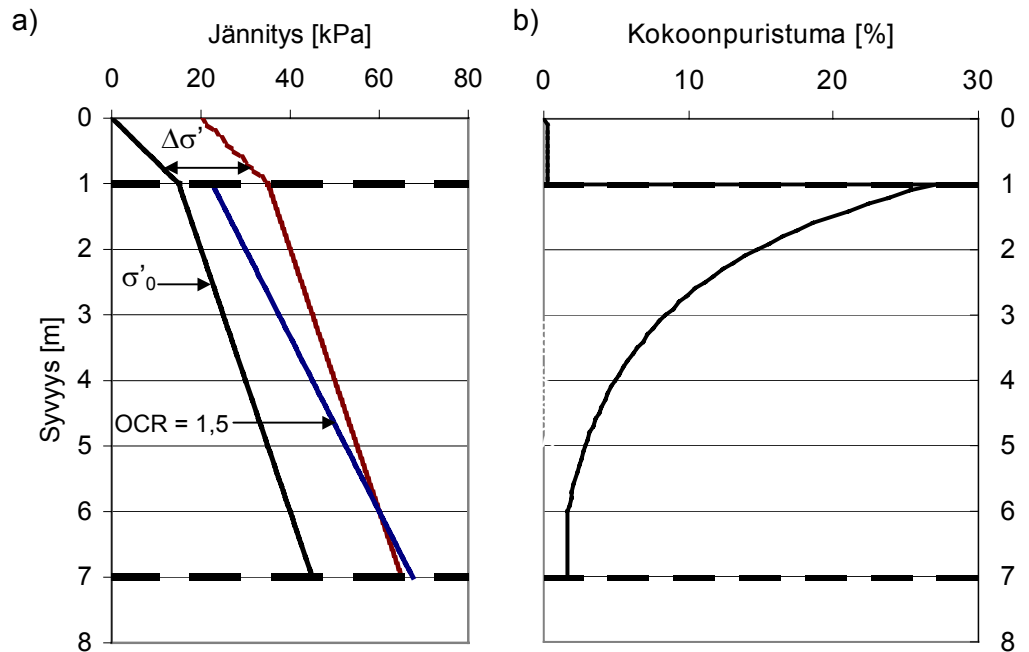
Kuvassa 3 on myös esitetty jännitys-kokoonpuristumapolku, joka vastaa 20 kPa jännityslisästä in situ jännityksestä. Kokeen mukaan kokoonpuristuma on tällöin 5 %. Mikäli savi olisi normaalikonsolidoitunut, eli in situ jännitys olisi esikonsolidaatiojännityksen suuruinen (45 kPa), olisi kokoonpuristuma 20 kPa lisäkuormalla kokeen mukaan 11,4 %.



Kuva 3. Esimerkin 1 syvyydeltä 4 m tehdyn ödometrikokeen tulos.

Esimerkin savikerroksen painumalaskennassa tehdään kaksi virhettä. Ensimmäinen virhe on, että savikerroksen esikonsolidaatiojännitys annetaan ylikonsolidoitumisasteen avulla, joka ödometrikokeen perusteella oli $OCR = 1,5$ 4 m syvyydellä. Toinen virhe on, että painumalaskennassa käytetään suoraan ödometrikokeesta määritettyjä parametrejä koko savikerroksella. Kuvassa 4 a) on esitetty In situ tehokas jännitys, ylikonsolidoitumisastetta $OCR = 1,5$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys. Kuvassa 4 b) on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuten kuvassa 4 b) nähdään, on näin saatu laskettua kerroksen yläosassa yli 25 % kokoonpuristuma 20 kPa kuormalla, mikä ei lainkaan ole yhtenevä tulos ödometrikokeiden kanssa. Kerroksen alaosassa laskettu kokoonpuristuma on vain 1,7 % koska annettua esikonsolidaatiojännitystä ei ylitetä.

Ensimmäinen virhe oli esikonsolidaatiojännityksen antaminen ylikonsolidaatioasteena avulla. Ylikonsolidaatioastetta voidaan hyvin käyttää savien luokittelussa. Painumalaskentaan se ei kuitenkaan läheskään aina sovellu. Kuten kuvassa 4 a) nähdään, saadaan ylikonsolidaatioastetta käyttämällä epärealistinen esikonsolidaatiojännityksen jakautuminen, jonka mukaan esikonsolidoituminen kasvaisi syvyyden mukaan. Varsinkin heti kuivakuorikerroksen alapuolella sijaitsevalle savelle saadaan näin monesti liian pieni esikonsolidaatiojännitys.

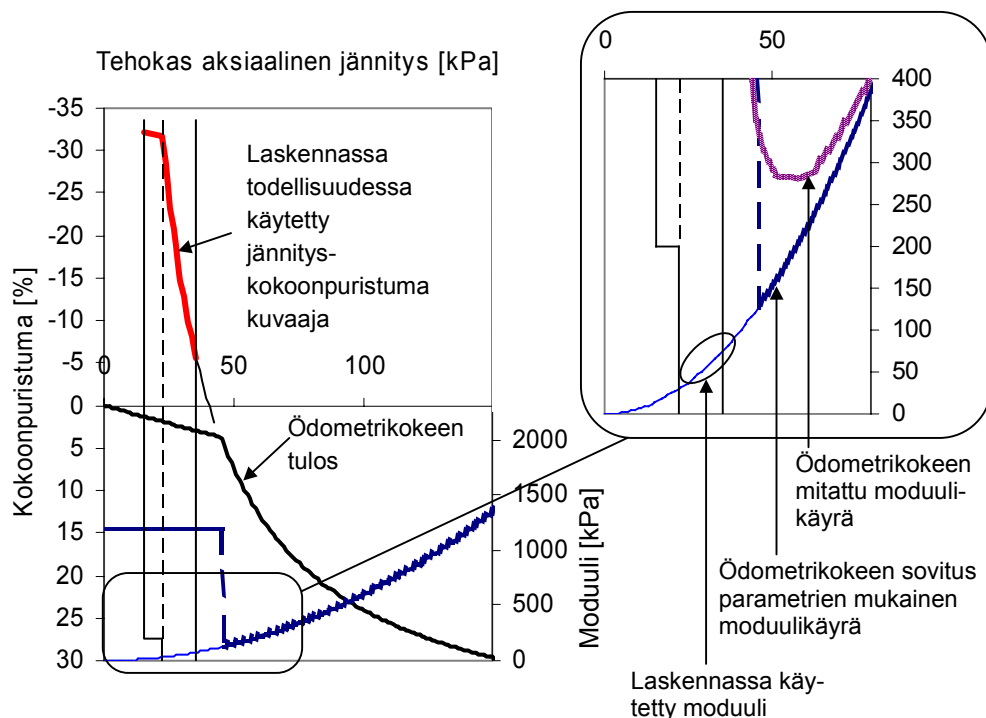


Kuva 4 *In situ* tehokas jännitys, ylikonsolidoitumisastetta $OCR = 1,5$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).

Toinen virhe oli, että ödometrikokeesta määritettyjä parametrejä käytettiin suoraan jännitysväleillä, joista niitä ei ole määritetty. Tätä virhettä on havainnollistettu kuvassa 5 savikerroksen yläosan osalta. Koska parametrejä on käytetty pienemmällä jännitysvälillä kuin mistä ne on määritetty, on käytetty kokoonpuristuvuusmoduulikin selvästi pienempi kuin ödometrikokeen pienin moduuli. Jännitysekspontin ollessa negatiivinen on kokoonpuristuvuusmoduulin kasvu vakiojännityslisäyksellä myös selvästi pienempää kuin mitä ödometrikokeessa esikonsolidaatiojännityksen jälkeen. Näin saatu jännitys-kokoonpuristumakuvaaja ei esikonsolidaatiojännityksen ylittymisen jälkeen lainkaan enää vastaa ödometrikokeen tulosta.

On syytä muistaa, että parametrien määrittäminen Suomessa perustuu jännitys-kokoonpuristumakuvaajan käyräsovitukseen. Laskentamenetelmä perustuu kuitenkin kokoonpuristuvuusmoduuliin. Pehmeillä savilla joudutaan usein käyttämään negatiivisia jännitysekspontin arvoja, jotta ödometrikokeen jännitys-kokoonpuristumakuvaajan esikonsolidaatiojännityksen jälkeinen ”romahtaminen” ja tätä seuraava lujeneminen saataisiin mallinnettua. Ödometrikokeen kokoonpuristuvuusmoduulia yhtälö (3) ei kuitenkaan välttämättä kuvaa yhtä hyvin. Kuvassa 5 on hahmoteltu myös todellista mitattua moduulikäyrää vastaava kuvaaja. Mitatut kokoonpuristuvuusmoduulin arvot eivät useimmiten ole yhtä pieniä kuin sovitus käyrän arvot heti esikonsolidaatiojännityksen jälkeen. Suuret negatiiviset jännitysekspontin arvot ovat tarpeellisia jotta yhtälön (3) mukaisella, origon kautta kulkevalla kokoonpuristuvuusmoduulilla saataisiin mallinnettua havaittu jännitys-kokoonpuristuma-

käyrä hyvin. Mitä suurempi negatiivinen luku jännitysekspONENTILLA on, sitä kaarevampi on moduulikuvaaja ja suurempi virhe pienillä jännityksillä. Liitteessä 1 on esitetty sama esimerkki jännitysekspONENTIN arvolla $\beta = -2$.



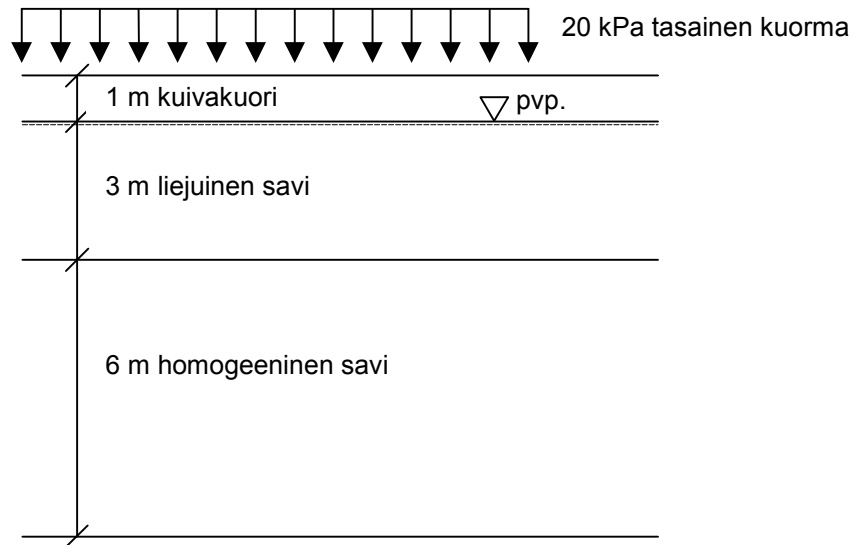
Kuva 5. Ödometrikokeen tulos, sekä laskennassa 1 m syvyydellä käytetty jännitys-kokoonpuristumakuvaaja sekä kokoonpuristuvuusmoduuli.

Virheellisen painuma-arvion lisäksi on esimerkin laskennassa saatu täysin virheellinen kokoonpuristumakuvaaja. Tämä vaikuttaa puolestaan aika painuma laskentaan mikäli käytetään jäännösmuodonmuutokseen perustuvaa Janbun konsolidaatioteoriaa.

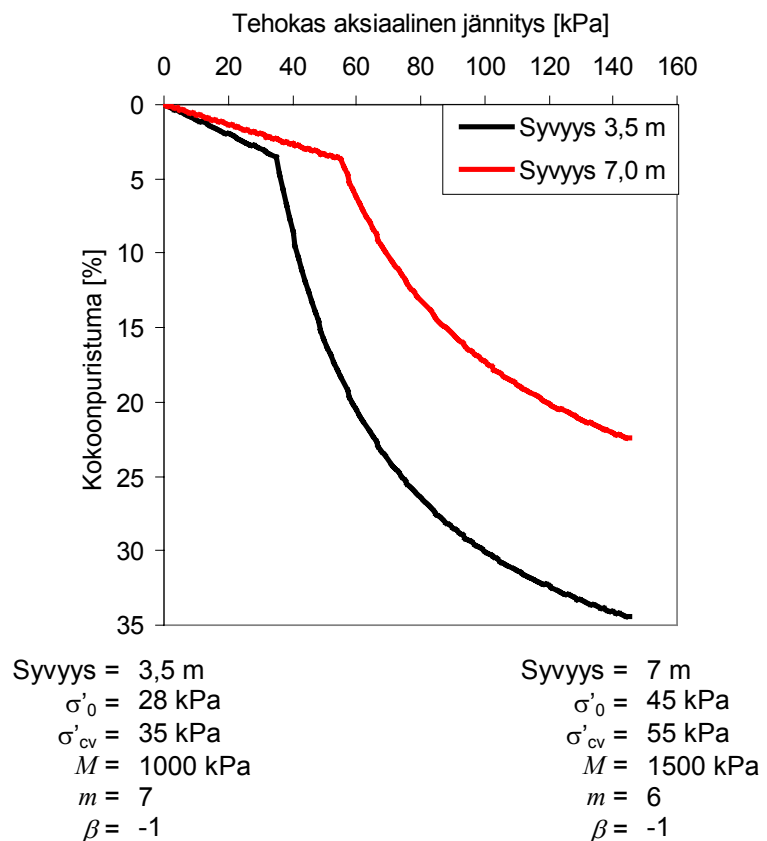
Esimerkki 2.

Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 6 mukaista tapausta. Pohjamaa muodostuu 1 m kuivakuorikerroksesta, jonka alapuolella on 3 m paksu liejuinen savikerros ja tämän alapuolella 6 m paksu savikerros. Pohjavedenpinta on kuivakuorikerroksen alapuolella tasolla -1 maanpinnasta. Tehtävänä on määrittää savikerrosten konsolidaatiopainuma 20 kPa tasaisen kuormituksen johdosta.

Kummatkin savikerrokset ovat homogeenisia ja niistä molemmista on tehty vain yksi ödometrikoe. Kokeiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajat on esitetty kuvassa 7. Kummankin kokeen ylikonsolidoituminen on vähäistä, ylikonsolidaatioasteen ollessa noin 1,2. Painumalaskenta on tämän vuoksi päätetty tehdä olettamalla savikerrokset normaalikonsolidoituneiksi. Ödometrikokeista määritettyjä parametrejä käytetään jälleen suoraan kummassakin savikerroksessa.

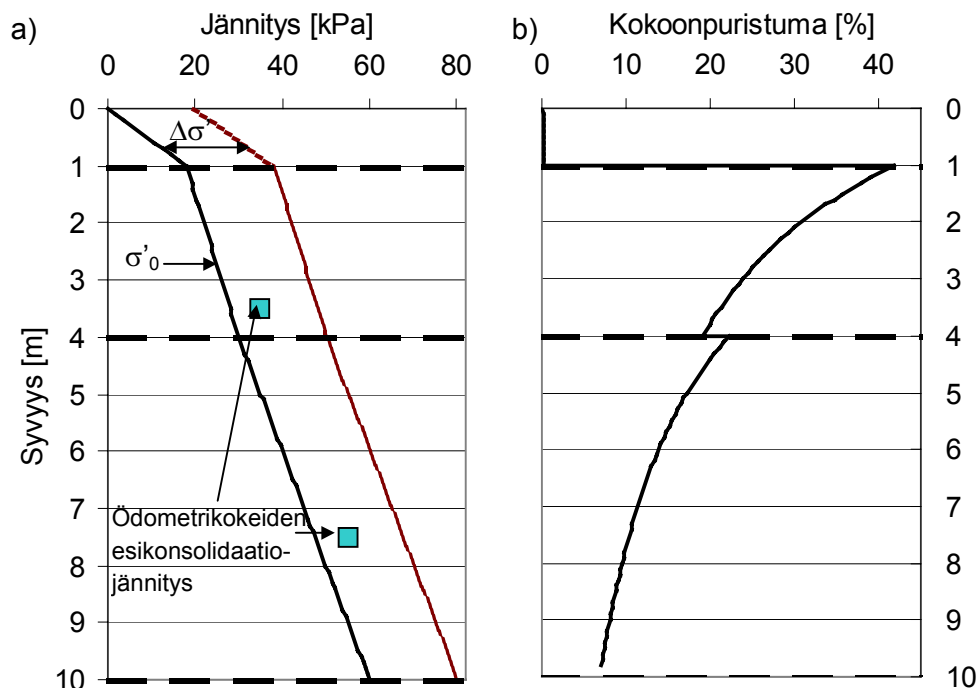


Kuva 6. Esimerkin 2 pohjasuhteet ja kuormitus.



Kuva 7. Esimerkin 2 ödometrikokeiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajat.

Kuvassa 8 a) on esitetty in situ tehokas jännitys, 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys sekä ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännitys. Kuvassa 8 b) on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuten kuvasta 8 b) nähdään, on näin saatu laskettua liejuisen savikerroksen yläosassa noin 40 % kokoonpuristuma ja savikerroksen yläosassa yli 20 % kokoonpuristuma, 20 kPa kuormalla. Tulokset eivät nytkään ole lainkaan yhteneviä ödometrikokeiden kanssa.



Kuva 8. *In situ* tehokas jännitys, jännityslisäystä vastaava jännitys sekä ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).

Virheelliset kokoonpuristumat johtuvat jälleen siitä, että parametrejä käytetään pienemmillä jännityksillä kuin miltä ne on määritetty. On hyvä myös havaita, että laskettu painuma on suurempi savikerroksen yläosassa kuin liejuisen saven alaosassa vaikka liejuinen savi on ödometrikokeiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajien perusteella kokoonpuristuvampi. Tämä havainnollistaa parametrien luonnetta. Vaikka alempi savi on jäykempää, on sille saatu ”pehmeämmät” parametrit koska parametrit on määritetty eri jännitysväliltä. Mikäli niitä käytetään suoraan kuten esimerkissä, saadaan kerrosten rajapinnassa luonnollisesti suurempi kokoonpuristuma ”pehmeimmillä” parametreillä. Sama esimerkki on esitetty myös Liitteessä 2 jännitysekspONENTIN arvolla $\beta = -2$.

Esimerkit 1 ja 2 ovat tuoneet esille virhemahdollisuuden kun parametrejä käytetään eri jännitysvälillä kuin mistä ne on määritetty. Poikkeava jännitystaso voi johtua esimerkiksi siitä, että parametrejä käytetään eri syvyydellä kuin mistä ne on määritetty tai että ödometrikokeesta määritettyä esikonsolidaatiojännitystä redusoidaan.

3.3 Esikonsolidaatiojännityksen antaminen painumalaskennassa

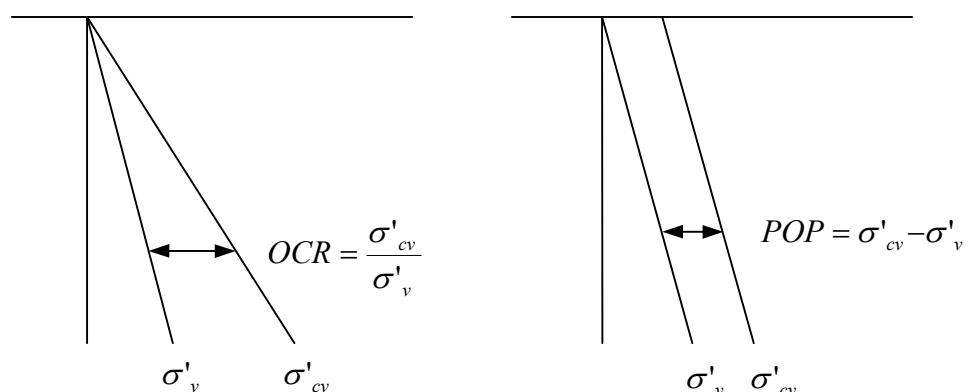
Esikonsolidoitumisen arvioiminen tulisi aina perustua riittävään määrään ödometrikokeita. Tarvittaessa sitä voidaan alustavasti arvioida myös suljetun leikkauslujuuden perusteella. Kuten kuvassa 4 havainnollistettiin johtaa ylikonsolidaatioasteen käyttäminen yleensä virheelliseen esikonsolidaatiojännityskuvaajaan. Esikonsolidoituminen, eli in situ jännityksen ylittävä osa esikonsolidaatiojännityksen arvosta, kasvaisi tämän mukaan syvyyden kasvaessa. Kuitenkin osittaisesta kuivumisesta ym. seikoista johtuen voi esikonsolidoituminen olla jopa suurempaa kerroksen yläosassa.

Ylikonsolidaatioasteen sijasta esikonsolidaatiojännitys on yleensä parempi antaa ylikonsolidaation avulla. Ylikonsolidaatio määritellään yhtälöllä (7). Ylikonsolidaatiosta käytetään kansainvälisesti yleensä merkintää *POP*, mikä tulee sanoista Pre-overburden Pressure (Esimerkiksi PLAXIS 1998). Ylikonsolidaatioasteen *OCR* ja ylikonsolidaation *POP* määrittely on esitetty myös kuvassa 9.

$$POP = \sigma'_{cv} - \sigma'_v \quad (7)$$

- missä
- POP = Ylikonsolidaatio (Pre-Overburden Pressure)
 - σ'_{cv} = esikonsolidaatiojännitys
 - σ'_v = tehokas pystysuuntainen in situ jännitys

Maan kerroksellisuudesta ja epähomogeenisuudesta johtuen esikonsolidaatiojännityksen arvo suhteessa pystyjännitykseen vaihtelee. Tästä syystä on korostettava, että mikään σ'_{cv} antamistapa ei korvaa riittävän monen ödometrikokeen tarpeellisuutta.



Kuva 9. Ylikonsolidaatioasteen *OCR* ja ylikonsolidaation *POP* määrittelyt

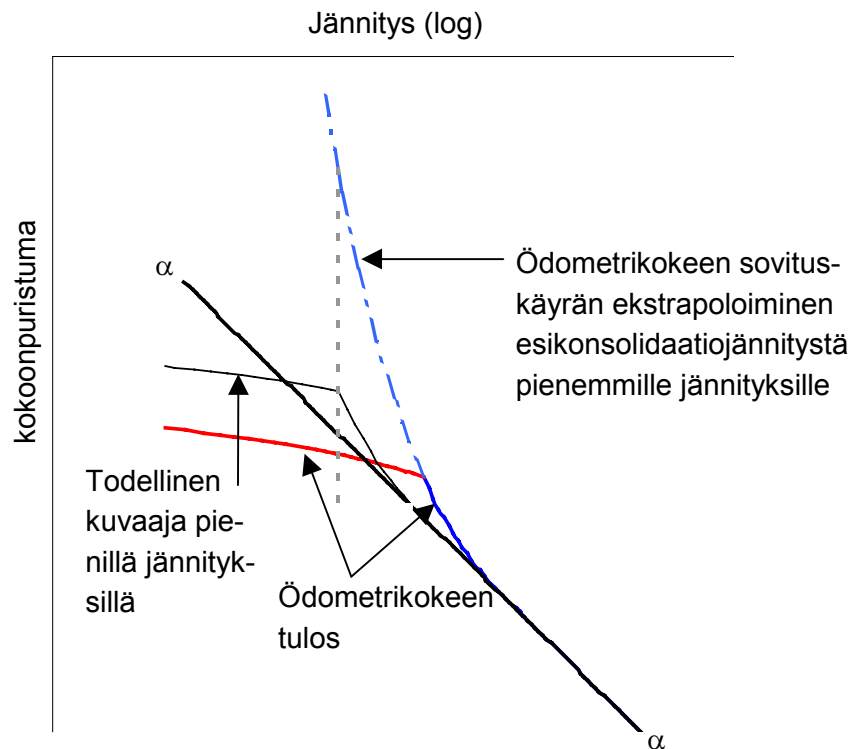
3.4 Tangenttimoduulimethodin parametrien oikea käyttö

3.4.1 Syyt nykyisen käytännön mukaisen parametrien käytön virheisiin

Kuten luvun 3.2.2 kahdessa esimerkissä havainnollistettiin, johtuvat nykyisen käytännön mukaisen parametrien käytön virheet siitä, että parametrejä käytetään suoraan myös eri jännitysväleillä kuin mistä ne ovat määritetty. Suomalaisen käytännön mukaiset m ja β ovat jännitys-kokoonpuristumiskäyrän sovituspametreja. Ne eivät välttämättä kuvaa kokoonpuristumiskäyrää tai kokoonpuristuvuusmoduulikäyrää eri jännitysvälillä kuin mistä ne ovat määritetty. Erot, ja samalla virheet kasvavat mitä suurempi negatiivinen arvo jännityseksponentilla on. Vaikka tietyt $m:n$ ja $\beta:n$ arvot antavatkin kuvan saven ominaisuuksista, ei yhteyttä voida yleisesti käyttää toisinpäin ja sanoa, että tällä pehmeällä savella on nämä $m:n$ ja $\beta:n$ arvot. Tällainen jännitystasosta riippumaton systematisointi on savilla oikeutettua vain jännityseksponentin arvolla $\beta = 0$. Hiekoilla ja silteillä voidaan myös antaa tyypillisiä moduuliluvun arvoja esimerkiksi tiiveyden funktiona käyttämällä $\beta:n$ arvoa 0,5.

Syy minkä takia muodonmuutosparametrit eivät suoraan päde esikonsolidaatiojännitystä pienemmillä jännityksillä on, että saven käyttäytymisellä on kaksi toisistaan poikkeavaa osaa normaalikonsolidoituneella alueella. Kuten luvussa 2 esitettiin seuraa esikonsolidaatiojännityksen ylittämistä rakenteellisesti lujittuneella savella suuret muodonmuutokset pienellä jännityslisäyksellä kunnes sedimentoitumiskäyrä $\alpha-\alpha$ saavutetaan, katso kuva 1. Tällaisella savella joudutaan nimenomaan käyttämään negatiivisia jännityseksponentin arvoja. Jos kokoonpuristumiskäyrän sovituskäyrää nyt ekstrapoloidaan pienemmille jännityksille ei se enää kuvaa todellista käyttäytymistä vaan ylikorostaa rakenteellista romahtamista. Tätä on havainnollistettu kuvassa 10. Kuvassa on myös esitetty todenmukainen jännityskokoonpuristumakuvaaja pienemmällä esikonsolidaatiojännityksellä kuin kuvan ödometrikokeessa.

Saven rakenteellinen lujittuminen, ja siitä johtuva muodonmuutuskäyttäytyminen selittävät myös osaltaan eroja portaittaisten ja jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden välillä. Portaittaisen kokeen verrattain suurista kuormitusportaista johtuen ei kokeen mittaustuloksiin välttämättä tule informaatiota rakenteellisesta lujittumisesta. Kokeesta määritetty jännityseksponentti onkin savilla usein välillä $\beta = 0 \dots -0,5$ ja tulos kuvaa sedimentoitumiskäyrää $\alpha-\alpha$. Ongelmat tangenttimoduulimethodin käytössä ovatkin tulleet esiin enimmäkseen jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden yleistyessä. On kuitenkin korostettava, että virheet eivät johdu koetyypistä. Jatkuvapuristeisellä kokeella saadaan vain yleensä tarkempi kuva saven kokoonpuristumiskäyttäytymisestä. Tämän tiedon soveltaminen on tangenttimoduulimethodin nykyisen virheellisen käytön takia johtanut virheisiin painumalaskennassa.



Kuva 10. Ödometrikokeen sovituskäyrän ekstrapoloimisesta aiheutuva virhe.

3.4.2 Moduuliluvun muuntaminen

Tähänastisista havainnoista voidaan tehdä seuraava yhteenveto:

1. Ödometrikokeen normaalikonsolidoituneen alueen sovituskäyrää ei voida ekstrapoloida esikonsolidaatiojännitystä pienemmille jännityksille.
2. Mikäli jännitysekspONENTTI on negatiivinen voidaan tangenttimoduulimenetelmän parametrejä käyttää suoraan vain sillä esikonsolidaatiojännityksen arvolla, mikä on saatu parametrejä määritettäessä.

Mikäli tangenttimoduulimenetelmän parametrejä käytetään selvästi poikkeavalla esikonsolidaatiojännityksen arvolla kuin mistä parametrit ovat määritetty, tulee moduulilukua muuntaa jos jännitysekspONENTTI on negatiivinen. Moduuliluvun muuntaminen voidaan tehdä samalla tavalla kuin huomioitaessa muodonmuutosnopeuden vaikutus esikonsolidaatiojännitykseen (Länsivaara 1994). Menetelmä perustuu oletukseen että mikäli keskenään homogeenisilla savilla on eri esikonsolidaatiojännitykset, yhtyvät jännityskokoonturistumakuvaajat kun ne normalisoidaan esikonsolidaatiojännityksillä. Vastaava käyttäytyminen on havaittu laboratoriossa eri muodonmuutosnopeuksilla tehdyillä kokeilla (Leroueil et al. 1983, 1985, Länsivaara 1994, 1997, 1999). Otaksoma voidaan kirjoittaa yhtälö muotoon, jolloin saadaan tehokkaille jännityksille saman muodonmuutoksen arvolla lauseke:

$$\frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{cv1}} = \frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{cv2}} \quad (8)$$

missä σ'_{vi} = tehokas jännitys, $i = 1 \vee 2$
 σ'_{cvi} = esikonsolidaatiojännitys, $i = 1 \vee 2$

Tekemällä kyseiset oletukset, saadaan moduuliluvulle yhtälö (9), Länsivaara (1994).

$$m_{laskenta} = m_{koe} \cdot k^{-\beta} = m_{koe} \cdot \left(\frac{\sigma'_{cv koe}}{\sigma'_{cv laskenta}} \right)^{-\beta} \quad (9)$$

missä $m_{laskenta}$ = laskennassa käytettävä moduuliluvun arvo
 m_{koe} = kokeesta määritetty moduuliluvun arvo
 k = muuntokerroin
 $\sigma'_{cv koe}$ = kokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys
 $\sigma'_{cv laskenta}$ = laskennassa käytettävä esikonsolidaatiojännitys

JännitysekspONENTIN arvo pysyy muuttumattomana eli:

$$\beta_{laskenta} = \beta_{koe} \quad (10)$$

Mikäli ylikonsolidoituneella alueella käytetään vakiomoduulia M saadaan tälle yhtälön (9) avulla muuntamiskaava:

$$M_{laskenta} = M_{koe} \cdot k^{-1} = M_{koe} \cdot \left(\frac{\sigma'_{cv koe}}{\sigma'_{cv laskenta}} \right)^{-1} = M_{koe} \cdot \frac{\sigma'_{cv laskenta}}{\sigma'_{cv koe}} \quad (11)$$

Kuten luvussa 3.2.2 ja liitteissä 1 ja 2 esitetyistä esimerkeistä havaitaan, kasvavat virheet, ja näin ollen myös muuntamisen tärkeys, mitä suurempi negatiivinen luku jännitysekspONENTILLA on. Mikäli jännitysekspONENTIN arvo on nolla ei moduuliluvun arvo yhtälön (9) mukaan muutu.

Moduuliluvun muuntaminen voidaan tehdä joko antamalla moduuliluku suoraan yhtälön (9) muodossa, tai jakamalla maapohja riittävän pieniin kerroksiin ja määrittämällä näille moduuliluku yhtälön (9) avulla.

Saven reologisesta luonteesta johtuen vaikuttaa ödometrikokeessa käytetty muodonmuutosnopeus kokeen tulokseen ja siitä määritettyyn esikonsolidaatiojännityksen arvoon. Tielaitoksen ohjeiden mukaan esikonsolidaatiojännitys tulee redusoida vastaamaan kuormitusnopeutta 10^{-7} 1/s (Tielaitos, 1994). Redusoidaessa esikonsolidaatiojännitys muodonmuutosnopeuden perusteella saadaan muuntokerroin yhtälöstä (12) jolloin laskennassa käytettävä esikonsolidaatiojännitys saadaan yhtälöllä (13).

$$k = \left(\frac{\dot{\mathcal{E}}_{koe}}{\dot{\mathcal{E}}_{laskenta}} \right)^B \quad (12)$$

$$\sigma'_{cv\ laskenta} = \frac{\sigma'_{cv\ koe}}{k} \quad (13)$$

missä B = muodonmuutosnopeusparametri.

Parametrin B arvo on Suomalaisilla savilla noin $B = 0,07$. Lihavilla humuspi-toisilla savilla arvo on suurempi ja laihoilla savilla pienempi. Länsivaara on osoittanut että parametri B on riippuvainen saven primaari ja hiipuma omi-naisuuksista (Länsivaara, 1999). B :n arvolle voidaankin johtaa lauseke:

$$B = \frac{m}{r_s} = \frac{C_\alpha}{C_C} \quad (14)$$

missä m = $\beta = 0$ vastaava moduuliluku
 r_s = hiipumaluku
 C_α = sekundaaripainumaindeksi
 C_C = kokoonpuristuvuusindeksi

Parametrin B ilmaisemalle suhteelle löytyy lukuarvoja myös kirjallisuudesta. Esimerkiksi Mesri ja Castro (1977) ovat esittäneet että sekundaari-painumaindeksin ja kokoonpuristuvuusindeksin suhde on vakio tietyllä sa-vella. He esittivät arvoja väliltä 0,025 – 0,10 siten, että pienimmät arvot vas-tasivat karkearakeisimpia savia ja silttejä ja suurimmat arvot turpeita ja savia joissa humuspitoisuus on suuri.

3.4.3 Esimerkkejä tangenttimoduulimenetelmän käytöstä

Esimerkki 3.

Tarkastellaan aluksi parametrien muuntamista pelkästään ödometrikokeen tulosten avulla. Oletetaan, että ödometrikokeesta on saatu seuraavat para-metrit:

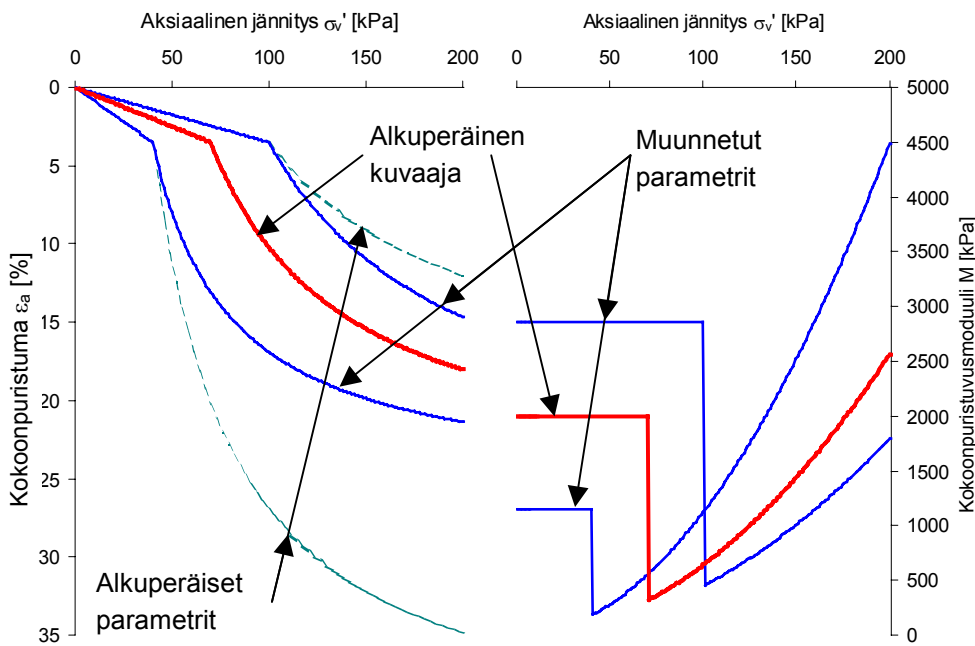
$$M_{OC} = 2000 \text{ kPa} \quad \sigma'_{cv} = 70 \text{ kPa} \quad m = 6,4 \quad \beta = -1$$

Tulokset halutaan saada vastaamaan esikonsolidaatiojännityksen arvoja $\sigma'_{cv} = 40 \text{ kPa}$ ja $\sigma'_{cv} = 100 \text{ kPa}$. Muuntaminen on esitetty taulukossa 1. Alkupe-räisiä ja muunnettuja parametrejä vastaavat jännitys-kokoonpuristuma ja kokoonpuristuvuusmoduulikuvaajat on esitetty kuvassa 11. Kuvassa on myös esitetty muuntamattomia moduulilukuja vastaavat kokoonpuristumaku-vaajat esikonsolidaatiojännityksen jälkeen. Näistä kuvaajista nähdään, että mikäli moduulilukua käytetään muuntamatta pienemmällä esikonsolidaa-tiojännityksen arvolla saadaan liian suuria kokoonpuristumia. Vastaavasti

saadaan liian pieniä kokoonpuristumia mikäli moduulilukua käytetään muuntamatta suuremmalla esikonsolidaatiojännityksen arvolla. Kokoonpuristuvuusmoduulikuvaajista nähdään, että kyseisellä muuntamisella projisoidaan moduulikuvaajia origon suhteen.

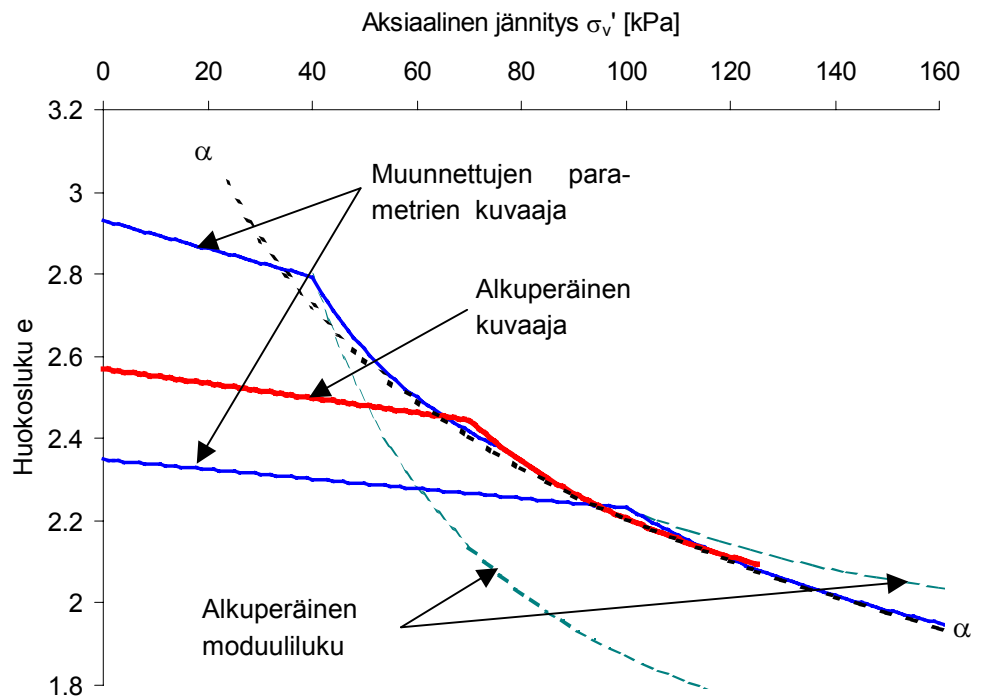
Taulukko 1. Muodonmuutosparametrien muuntaminen eri esikonsolidaatiojännityksen arvolle

	σ'_{cv}	M_{oc}	m
Koe	70	2000	6,4
Muunnettu	40	$2000 \cdot \frac{40}{70} = 1142$	$6,4 \cdot \left(\frac{70}{40}\right)^1 = 11,2$
Muunnettu	100	$2000 \cdot \frac{100}{70} = 2857$	$6,4 \cdot \left(\frac{70}{100}\right)^1 = 4,5$



Kuva 11. Alkuperäisiä ja muunnettuja parametrejä vastaavat jännitys-kokoonpuristuma ja kokoonpuristuvuusmoduulikuvaajat.

Esimerkin muodonmuutoskuvaajat on esitetty myös jännitys-huokosluku kuvaajana kuvassa 12. Kuvassa on oletettu, että rakenteellisen lujittumisen aikaansaama sedimentoitumiskäyrän α - α ylittyminen on riippumaton esikonsolidaatiojännityksestä. Sedimentoitumiskäyrän kuvaaja vastaa jännityksenpotentin arvoa $\beta = 0$. Kuten kuvasta havaitaan, käyttäytyvät muunnettuja parametrejä vastaavat kuvaajat kuten alkuperäisenkin kuvaaja α - α käyrän suhteen. Kuvassa ei havainnollisuuden parantamiseksi ole esitetty kuvaajia koko jännitysalueella. Koska kuvaajien jännityksenpotentti on $\beta = -1$ erkanevat kuvaajat α - α käyrästä ylöspäin jännityksen kasvaessa.



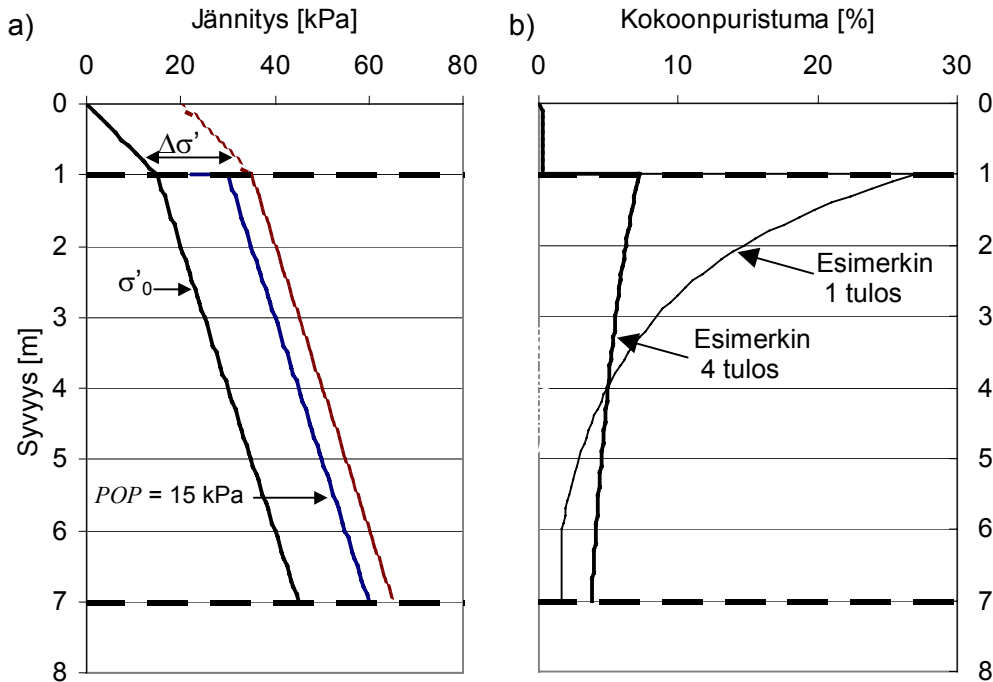
Kuva 12. Esimerkin 3 kuvaajat jännitys-huokosluku koordinaatistossa.

Esimerkki 4.

Esimerkissä tarkastellaan luvussa 3.2.2 esitetyn esimerkin 1 tapausta siten, että esikonsolidaatiojännitys annetaan nyt ylikonsolidaation POP avulla ja moduulilukua muunnetaan. Ödometrikokeella määritetty esikonsolidaatiojännitys on 4 m syvyydellä $\sigma'_{cv} = 45$ kPa, mitä vastaava luonnontilainen jännitys on $\sigma'_{v0} = 30$ kPa. Ylikonsolidaatioksi saadaan siten $POP = 15$ kPa. Kuten esimerkissä 1 oletetaan esikonsolidaatiojännitys oikeaksi, eikä sitä redusoida.

Muodonmuutosparametrien muuntaminen tehdään antamalla moduuliluku suoraan yhtälön (9) avulla ja ylikonsolidoituneen alueen moduuli M_{OC} yhtälön (11) avulla.

Kuvassa 13 a) on esitetty *In situ* tehokas jännitys, ylikonsolidoitumista $POP = 15$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys. Kuvassa 13 b) on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuvassa on myös esitetty esimerkissä 1 laskettu virheellinen kokoonpuristuma. Kuten kuvasta 4 b) nähdään, yhtyvät tulokset 4 m syvyydellä josta ödometrikokeet olivat, mutta ovat muutoin täysin erilaiset. Kerroksen yläosassa laskettu kokoonpuristuma on nyt noin 7 % ja kerroksen alaosassa noin 4 %,



Kuva 13. *In situ* tehokas jännitys, ylikonsolidoitumista $POP = 15 \text{ kPa}$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).

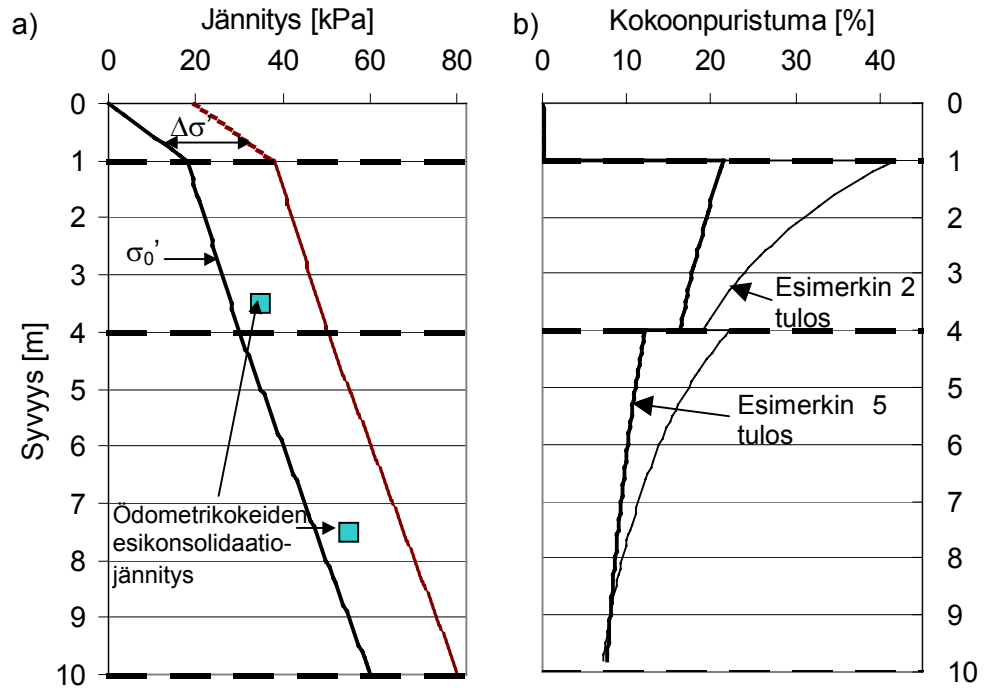
Esimerkki 5.

Esimerkissä tarkastellaan luvussa 3.2.2 esitetyn esimerkin 2 tapausta siten, että moduulilukua muunnetaan. Ödometrikokeiden perusteella on kummankin savikerroksen ylikonsolidoituminen vähäistä. Kuten esimerkissä 2 tehdään painumalaskenta olettamalla savikerrokset normaalikonsolidoituneiksi. Moduuliluvun muuntaminen tehdään antamalla se laskennassa suoraan yhtälön (9) avulla.

On ehkä syytä huomata, että nyt tehdään periaatteessa kaksi muuntamista. Ensin muutetaan ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännitystä jolloin myös moduuliluku muuttuu. Moduuliluvun toinen muuntaminen tehdään syvyyden mukaan muuttuvan esikonsolidaatiojännityksen johdosta. Ei ole kuitenkaan väliä, tehdäänkö moduuliluvun muuntaminen yhdessä vaiko kahdessa vaiheessa, kunhan yhtälöön (9) sijoitetut esikonsolidaatiojännityksen ja moduuliluvun arvot ovat pareja keskenään. Tämän vuoksi on kätevintä tehdä muuntaminen yhdessä vaiheessa, jolloin yhtälöön (9) sijoitetaan koetulosta kuvaaviin arvoihin alkuperäiset koetulokset.

Kuvassa 14 a) on esitetty *In situ* tehokas jännitys, ylikonsolidoitumista $POP = 15$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys. Kuvassa 14 b) on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuvassa on myös esitetty esimerkissä 2 laskettu virheellinen kokoonpuristuma. Tulokset eivät nyt yhdy syvyydellä josta ödometrikokeet olivat koska esikonsolidaatiojännitystä redusoiitiin.

Laskettu painuma on nyt pienempi savikerroksen yläosassa kuin liejuisen saven alaosassa aivan kuten ödometrikokeiden tulostenkin perusteella voitiin päätellä. Kerrosten rajapinnassa on muunnettu moduuliluku nyt liejuisessä savessa $m_{laskenta} = 8,2$ ja savikerroksessa $m_{laskenta} = 11$.

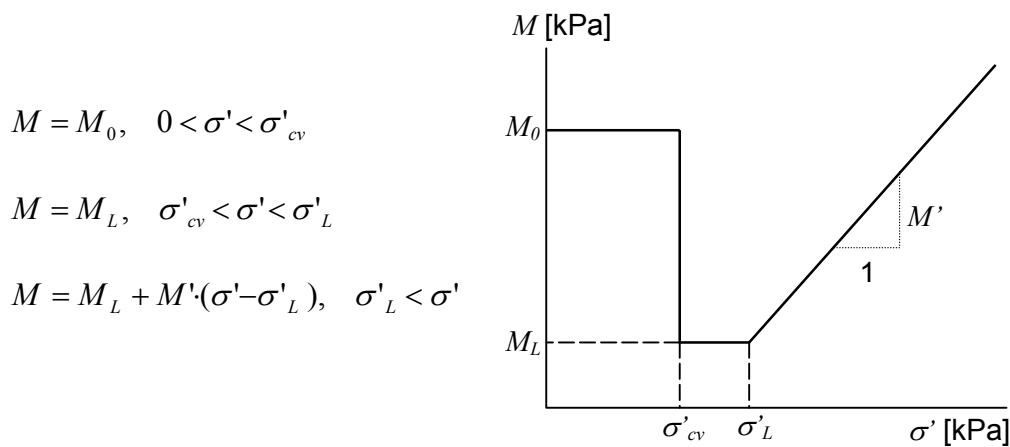


Kuva 14. *In situ* tehokas jännitys, jännityslisäystä vastaava jännitys sekä ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).

4 RUOTSALAINEN KONSOLIDAATIOPAINUMAN LASKENTAMENETELMÄ

4.1 Menetelmän esittely

Ruotsalainen painumalaskentamenetelmä perustuu CRS ödometrikokeiden jatkuvan kokoonpuristuvuusmoduulikuvaajan hyödyntämiseen. Menetelmää voitaisiinkin kutsua myös Ruotsalaiseksi tangenttimoduulimenetelmäksi, sillä se eroaa Janbun menetelmästä ainoastaan tangenttimoduulin kuvaamiseen käytettävien yhtälöiden osalta. Ruotsalaisessa menetelmässä kokoonpuristuvuusmoduulikäyrä jaetaan kuvan 15 mukaisesti kolmeen osaan. Ylikonsolidoituneella alueella käytetään vakiomoduulia $M = M_0$. Heti esikonsolidatiojännityksen jälkeen, ja ennen rajajännitystä σ'_L käytetään myös vakiomoduulia $M = M_L$. Tämän jälkeen käytetään lineaarisesti kasvavaa moduulia, moduulikäyrän kaltevuuden ollessa M' . Ruotsalaisessa käytännössä käytetään M' :lle nimitystä kokoonpuristuvuusmoduuliluku. On syytä huomata, että se ei yleisesti ole sama kuin moduuliluku m edes jännityksen eksponentin arvolla $\beta = 0$. Parametrit ovat yhtenevät ainoastaan kun $\sigma'_L = \sigma'_{cv}$ ja $\beta = 0$.



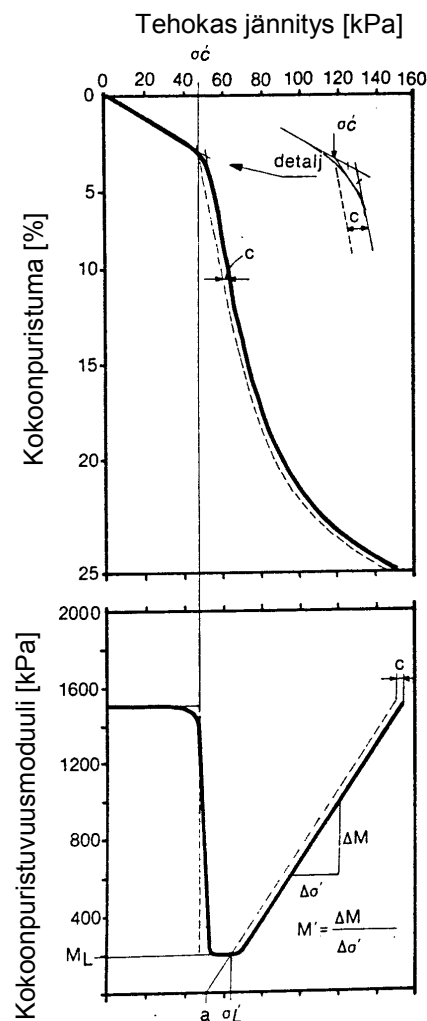
Kuva 15. Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän mukainen moduulikäyrä.

Kokoonpuristuma lasketaan tangenttimoduulin määritelmän mukaisesti yhtälöä (2) soveltaen. Yhtälöt muodonmuutokselle voidaan muodostaa yhtälön (2) ja kuvassa 15 esitettyjen yhtälöiden avulla integroimalla jännitysmuutoksen yli. Mikäli jännitys ylikonsolidoituneessa maakerroksessa kasvaa alkuarvosta σ'_0 arvoon $\sigma' > \sigma'_L$, saadaan suhteelliselle kokoonpuristumalle sopivasti supistamalla yhtälö:

$$\varepsilon = \frac{\sigma'_{cv} - \sigma'_0}{M_0} + \frac{\sigma'_L - \sigma'_{cv}}{M_L} + \frac{1}{M'} \ln \left(\frac{M'(\sigma' - \sigma'_L)}{M_L} + 1 \right) \quad (15)$$

4.2 Parametrien muuntaminen

Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän yhteydessä ei ole esitetty varsinaista parametrien muuntamismenetelmää tapaukselle, jossa laskennassa käytettävä esikonsolidaatiojännitys poikkeaa ödometrikokeen arvosta. Aikaisemmin esitettyjen esimerkkien valossa on kuitenkin syytä olettaa, että myös näitä parametrejä tulee muuttaa mikäli ero esikonsolidaatiojännityksissä on suuri. Ruotsalaisen CRS kokeen tulkinnan yhteydessä (Svensk Standard 1991) on esitetty, että sekä kokoonpuristuma- että moduulikuvaja tulee siirtää vaakasuunnassa, tulkitun esikonsolidaatiojännityksen mukaan, *kuva 16*. Yksi mahdollisuus muuttuvan esikonsolidaatiojännityksen huomioonottamiseen olisikin vastaavanlainen moduulikäyrän vaakasiirto samalla jännitysarvolla kuin millä esikonsolidaatiojännitystä muutetaan. On kuitenkin syytä korostaa, että tämä menetelmä on alun perin tarkoitettu ainoastaan CRS kokeen tulkintaan.

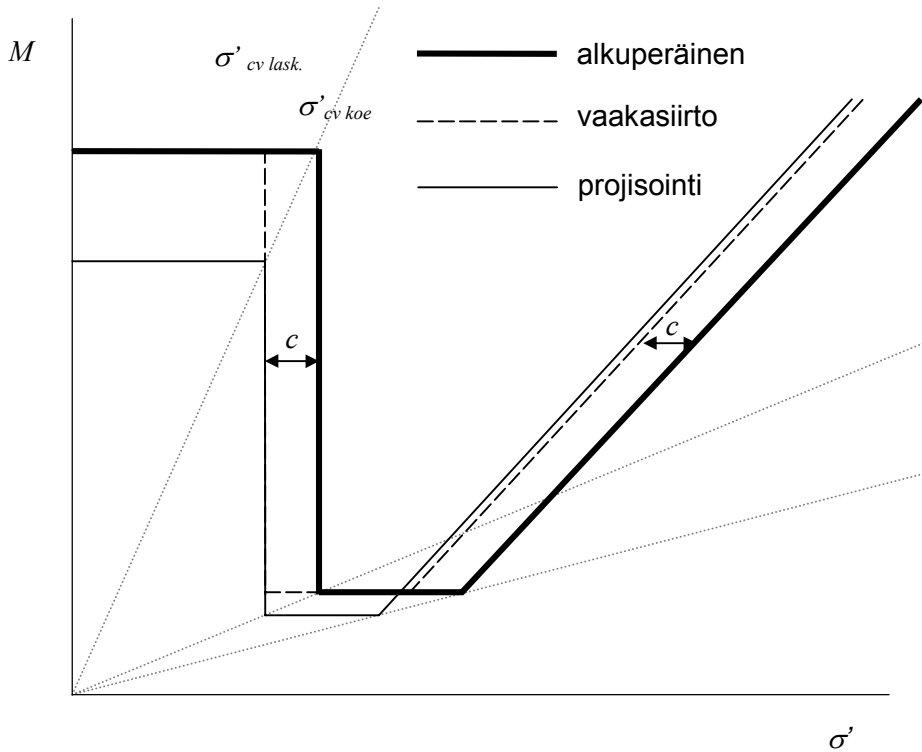


Kuva 16. Ruotsalainen CRS kokeen tulkinta (Larsson 1982).

Mikäli rajajännitystä muutetaan edellä esitetyn menettelyn mukaisesti samalla jännitysarvolla kuin esikonsolidaatiojännitystä, korostuu vakimoduulin M_L suhteellinen osuus pienillä esikonsolidaatiojännityksen arvoilla kun se vastaavasti pienenee suurilla σ'_{cv} :n arvoilla. Luvussa 3.4.2 esitetty tangenttimoduulimenetelmän muuntamistapa vastaa moduulikäyrän projisoimista origon suhteen. Vastaavanlainen muuntaminen voidaan tehdä myös Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän mukaisille parametreille. Kummankin muuntamistavan periaatteet on esitetty kuvassa 17. Vaakasiirtoon perustuvassa muuntamisessa saadaan rajajännitykselle yhtälö (16).

$$\sigma'_{L \text{ laskenta}} = \sigma'_{L \text{ koe}} - c \quad (16)$$

missä $c = \sigma'_{cv \text{ koe}} - \sigma'_{cv \text{ laskenta}}$



Kuva 17. Ruotsalainen CRS kokeen tukinta.

Projisointiin perustuvassa muuntamisessa saadaan muodonmuutosparametreille yhtälöt (17)- (20).

$$M_{0 \text{ laskenta}} = \frac{M_{0 \text{ koe}}}{k} = M_{0 \text{ koe}} \cdot \frac{\sigma'_{cv \text{ laskenta}}}{\sigma'_{cv \text{ koe}}} \quad (17)$$

$$M_{L \text{ laskenta}} = \frac{M_{L \text{ koe}}}{k} = M_{L \text{ koe}} \cdot \frac{\sigma'_{cv \text{ laskenta}}}{\sigma'_{cv \text{ koe}}} \quad (18)$$

$$\sigma'_{L \text{ laskenta}} = \frac{\sigma'_{L \text{ koe}}}{k} = \sigma_{L \text{ koe}} \cdot \frac{\sigma'_{cv \text{ laskenta}}}{\sigma'_{cv \text{ koe}}} \quad (19)$$

$$M'_{\text{laskenta}} = M'_{\text{koe}} \quad (20)$$

missä k = muuntokerroin

Tarkastellaan seuraavassa parametrien muuntamista esimerkkien avulla.

Esimerkki 6.

Esimerkissä tarkastellaan luvussa 3.4.3 esitetyn esimerkin 3 tapausta. Esimerkissä oletettiin, että ödometrikokeesta on saatu seuraavat tangenttimoduulimenetelmän parametrit:

$$M_{OC} = 2000 \text{ kPa} \quad \sigma'_{cv} = 70 \text{ kPa} \quad m = 6,4 \quad \beta = -1$$

Näitä vastaavat, Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän mukaiset uudet parametrit ovat:

$$M_L = 355 \text{ kPa} \quad \sigma'_L = 80 \text{ kPa} \quad M' = 15.8$$

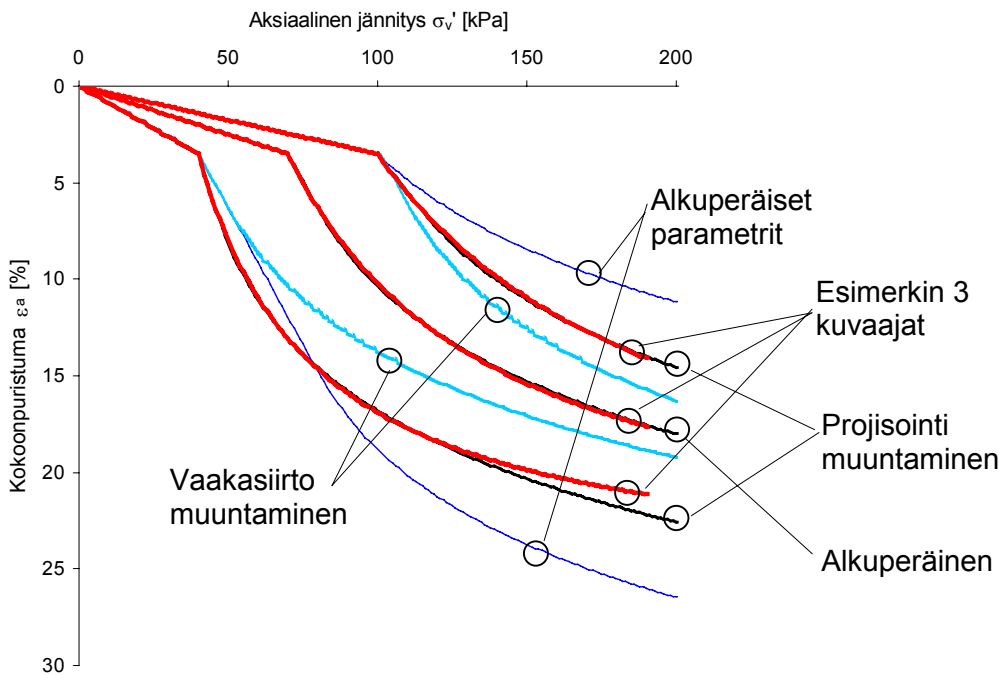
Tulokset halutaan saada vastaamaan esikonsolidaatiojännityksen arvoja $\sigma'_{cv} = 40 \text{ kPa}$ ja $\sigma'_{cv} = 100 \text{ kPa}$. Tarkastellaan kolmea tapausta. Ensimmäisessä käytetään alkuperäisiä parametrejä. Toisessa tehdään moduulikäyrän vaakasiirto, jolloin rajajännityksen arvoa joko pienennetään tai kasvatetaan arvolla 30 kPa. Kolmannessa tapauksessa tehdään projisointiin perustuva muuntaminen yhtälöiden (17) - (20) avulla. Tämä on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Muodonmuutosparametrien muuntaminen eri esikonsolidaatiojännityksen arvoille.

	σ'_{cv}	M_{OC}	M_L	σ'_L
Koe	70	2000	355	80
Muunnettu	40	$2000 \cdot \frac{40}{70} \approx 1143$	$355 \cdot \frac{40}{70} \approx 203$	$80 \cdot \frac{40}{70} \approx 46$
Muunnettu	100	$2000 \cdot \frac{100}{70} \approx 2857$	$355 \cdot \frac{100}{70} \approx 507$	$80 \cdot \frac{100}{70} \approx 114$

Alkuperäinen ja muunnettuja parametrejä vastaavat jännitys-kokoonpuristumakuvaajat on esitetty kuvassa 18. Selkeyden vuoksi on ylikonsolidoituneen alueen moduulia muunnettu kaikissa tapauksissa jotta kokoonpuristuma esikonsolidaatiojännityksen kohdalla olisi sama. Kuvassa on myös esitetty esimerkin 3 muunnetut kuvaajat

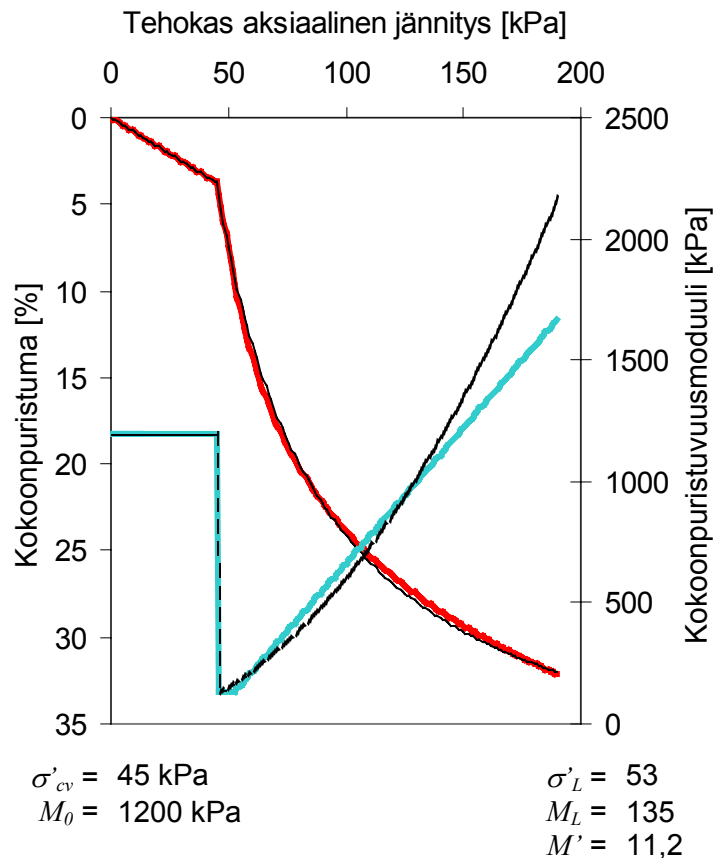
Kuvasta 18 nähdään, että moduulikäyrän projisoinnin mukainen parametrien muuntaminen vastaa tangenttimoduulimethodille esitettyä muuntamista. Muodonmuutoskäyrät eivät luonnollisesti kuitenkaan ole yhteneviä. Mikäli muuntamista ei tehdä, tai se tehdään moduulikäyrän vaakasuuntaisella siirtämisellä, muuttuu kuvaajien muoto. Parametrien käyttäminen ilman niiden muuntamista johtaa selvästi virheelliseen kuvaajaan. Vaakasuuntaiseen siirtoon perustuvan muuntamisen mielekkyuden arviointi ei ole yhtä selkeää. On hyvä huomata, että näin laskemalla saadaan vakiojännityslisäyksellä sama kokoonpuristuma riippumatta esikonsolidaatiojännityksestä. Tämä on sinällään laskennallisesti mielekästä, mutta ei kuvaa maan käyttäytymistä kaikkein parhaalla tavalla. Maan käyttäytymiselle on ominaista lujeneminen konsolidoitumisen seurauksena.



Kuva 18. Jännitys-kokoonpuristuma kuvaajat eri tavoin muunnetuilla Ruotsalaisen painumalaskentamethodin parametreillä.

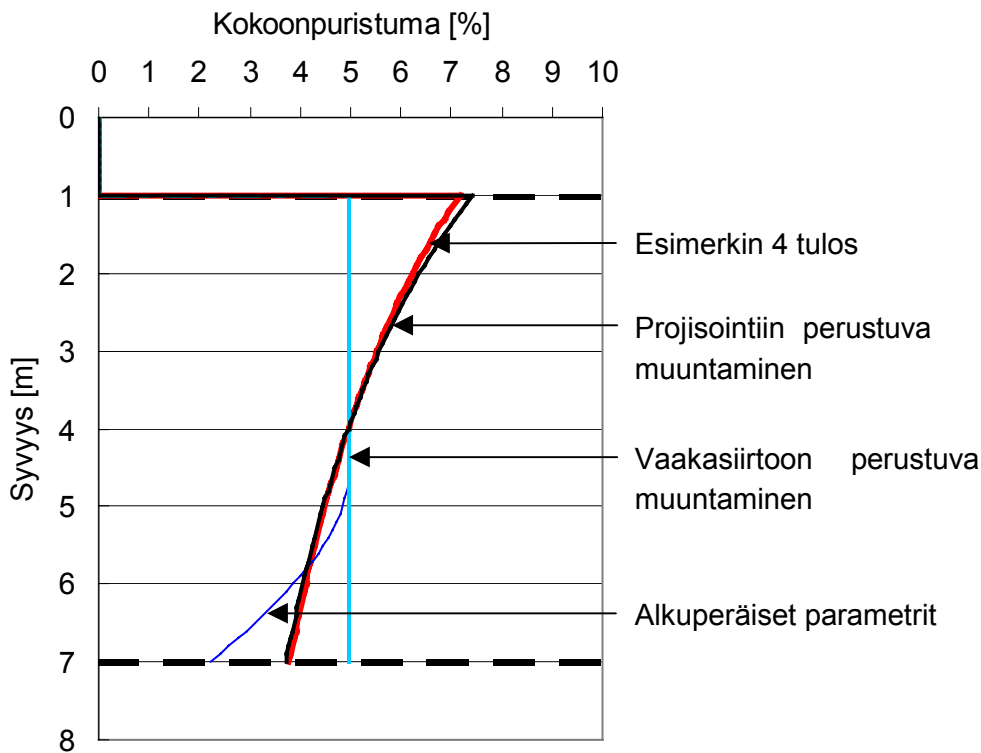
Esimerkki 7.

Esimerkissä tarkastellaan esimerkkien 1 ja 4 tapausta. Ruotsalaisen menetelmän mukaiset parametrit on valittu siten, että jännitys-koonpuristuma-kuvaajasta tulisi mahdollisimman yhtenäinen esimerkin 1 kuvaajan kanssa. Kuvaajat ja uudet parametrit on esitetty kuvassa 19. Kuvassa on myös esitetty molemmat alkuperäiset kuvaajat.



Kuva 19. Esimerkin 1 syvyydeltä 4 m tehdyn ödometrikokeen tulos, sekä Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän parametrit.

Esikonsolidaatiojännitys annetaan ylikonsolidaation *POP* avulla siten, että *POP* = 15. Tarkastellaan jälleen kolmea tapausta. Ensimmäisessä käytetään alkuperäisiä parametrejä, toisessa tehdään moduulikäyrän vaakasiirtoon perustuva parametrien muuntaminen ja kolmannessa tapauksessa tehdään projisointiin perustuva muuntaminen. Lasketut koonpuristumakuvaajat on esitetty kuvassa 20. Kuvasta nähdään, että moduulikäyrän projisointiin perustuvalla menetelmällä on saatu sama tulos kuin esimerkissä 4. Vaakasuuntaiseen siirtoon perustuvalla muuntamisella on saatu vakio 5 % koonpuristuma koko savikerroksessa. Mikäli parametrejä käytetään muuttamattomina, pienenee ja lopulta häviää Moduulin M_L osuus kerroksen alaosassa. Tästä johtuen muuttamattomia parametrejä vastaavan koonpuristuman arvo pienenee savikerroksen alaosassa. Kaikilla menetelmillä lasketut koonpuristumat ovat kuitenkin suhteellisen lähellä toisiaan, eikä esimerkin 1 kaltaista suurta virhettä ole syntynyt.

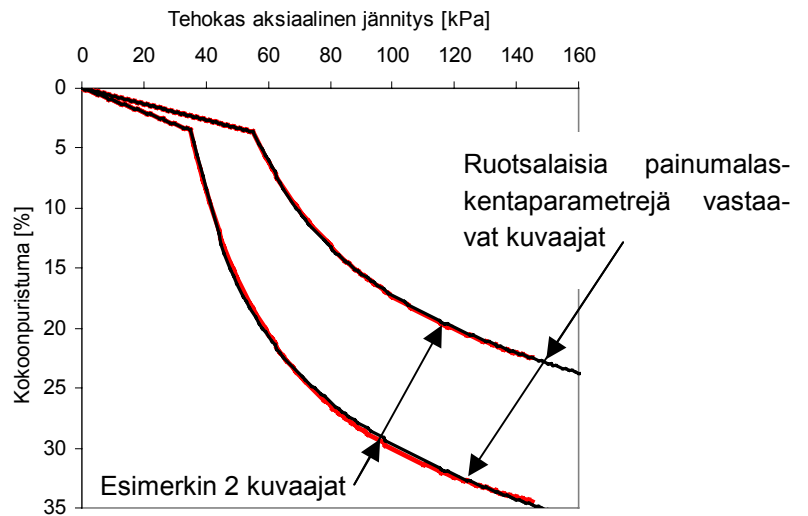


Kuva 20. Ruotsalaisella painumalaskentamenetelmällä lasketut kokoonpuristumakuvaajat.

Esimerkki 8.

Esimerkissä tarkastellaan esimerkkien 2 ja 5 tapausta. Ruotsalaisen menetelmän mukaiset parametrit on valittu siten, että jännitys-kokoonpuristumakuvaajista tulisi mahdollisimman yhtenäiset esimerkin 2 kuvaajien kanssa, kuva 21. Kuten esimerkeissä 2 ja 5 oletetaan savikerrokset normaalikonsolidoituneiksi.

Tarkastellaan jälleen kolmea tapausta. Ensimmäisessä käytetään alkuperäisiä parametrejä, toisessa tehdään moduulikäyrän vaakasiirtoon perustuva muuntaminen ja kolmannessa tapauksessa tehdään projisointiin perustuva muuntaminen. Lasketut kokoonpuristumakuvaajat on esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään, että moduulikäyrän projisointiin perustuvalla menetelmällä on jälleen saatu sama tulos kuin moduulilukuja muuntamalla (esimerkki 5). Vaakasuuntaiseen siirtoon perustuvalla muuntamisella on myöskin jälleen saatu vakio kokoonpuristuma savikerroksissa. Tässäkään tapauksessa ei millään menetelmällä ole syntynyt kovin suurta virhettä.



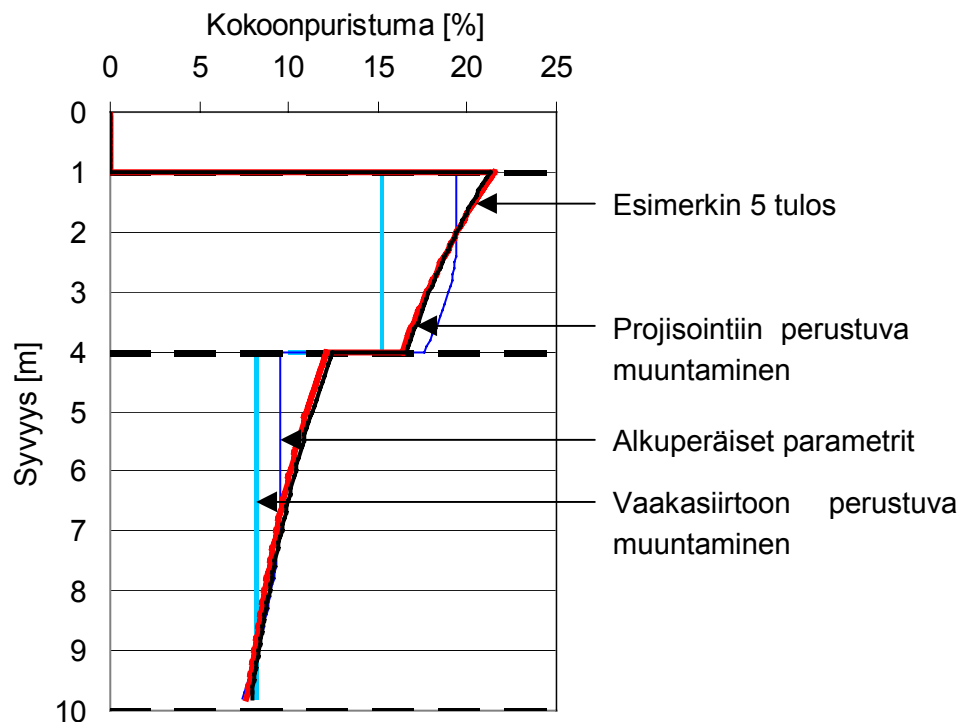
Syvyys = 3,5 m

$\sigma'_{cv} = 35$ kPa
 $\sigma'_L = 42,5$ kPa
 $M_0 = 1000$ kPa
 $M_L = 103$
 $M' = 10$

Syvyys = 7 m

$\sigma'_{cv} = 55$ kPa
 $\sigma'_L = 63$ kPa
 $M_0 = 1500$ kPa
 $M_L = 210$
 $M' = 11,2$

Kuva 21. Ödometrikokeiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajat, sekä Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän parametrit.



Kuva 22. Ruotsalaisella painumalaskentamenetelmällä lasketut kokoonpuristumakuvaajat

Yhteenveto parametrien muuntamisesta

Kuten edellä esitetyt esimerkit havainnollistivat, ovat suhteelliset erot parametrien eri muuntamistapojen tai muuntamatta jättämisen välillä yleensä melko pienet verrattuna Janbun tangenttimoduulimenetelmän virhemahdollisuuksiin. Tästä huolimatta tulee myös ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän parametrit muuntaa, mikäli laskennan esikonsolidaatiojännitys poikkeaa selvästi kokeen arvosta. Koska maa lujittuu konsolidoituessaan on moduulikäyrän projisointiin perustuva muuntaminen paras tapa. Parametrien muuntaminen tulee siten tehdä yhtälöiden (17)-(20) avulla.

4.3 Arvio menetelmän soveltuvuudesta

Ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän käyttäminen vaatii uusien parametrien opettelemisen. Normaalikonsolidoituneella alueella tarvitaan nyt kolme parametriä. Menetelmässä on kuitenkin tiettyjä hyviä puolia, joten sen käyttämistä kannattaa ehdottomasti harkita. Ensinnäkin kokoonpuristuvuus- ja kokoonpuristuvuusmoduulikäyrän jakaminen kolmeen osaan vastaa periaatteeltaan luvussa 2 esitetyn rakenteellisesti lujittuneen saven tapausta. Tarvittaessa tämä rakenteellinen lujittuminen voidaan poistaa asettamalla rajajännitys yhtä suureksi kuin esikonsolidaatiojännitys. Menetelmä on myös melko turvallinen. Koska menetelmässä annetaan moduulin minimiarvo, ei sillä ole mahdollista vahingossa laskea käyttäen hyvin pientä moduulia ja saada hyvin suuria, epätodellisia painumia, kuten Janbun tangenttimoduulimenetelmässä.

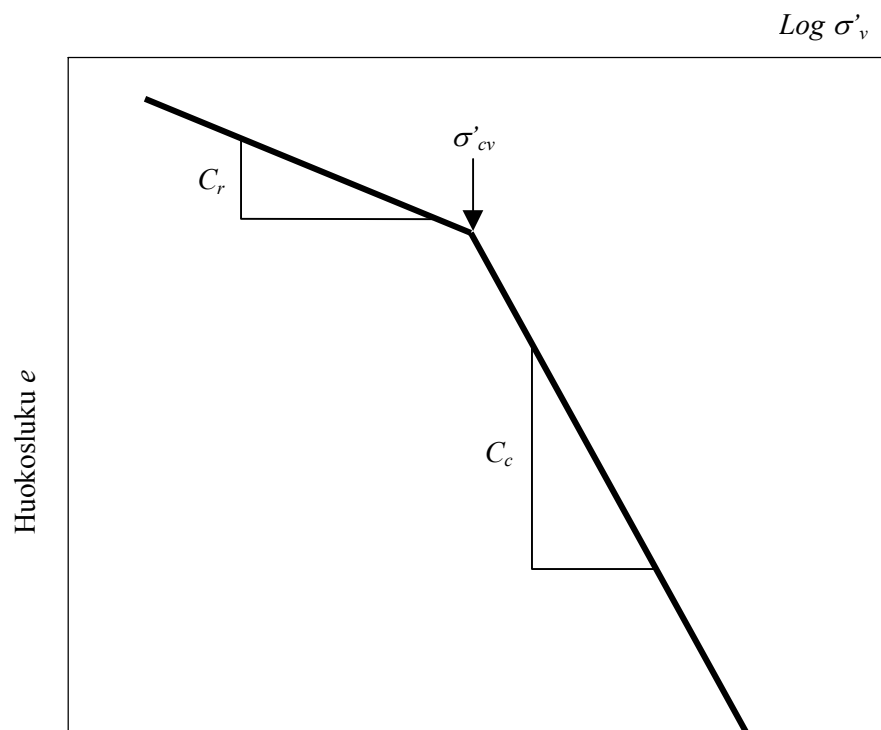
5 PUOLILOGARITMISET LASKENTAMENETELMÄT

5.1 Yleistä

Aritmeettisen mittakaavan sijasta käytetään joissakin ödometrikokeiden tulointamenetelmissä ja niihin perustuvissa painumalaskentamenetelmissä puolilogaritmista mittakaavaa. Lisäksi suhteellinen kokoonpuristuma on monesti korvattu huokosluvulla. Yleisin näistä on niin sanottu kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä. Koska muut menetelmät ovat johdettu kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmästä käsitellään tässä ainoastaan sitä, ja sen yhtä sovellutusta vesipitoisuusmenetelmää. Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmän esittelyn yhteydessä on lisäksi esitetty yhtäläisyyksiä muihin puolilogaritmista asteikkoja käyttäviin painumalaskentamenetelmiin.

5.2 Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä

Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmässä oletetaan maan huokosluvun ja logaritmiseen mittakaavaan piirretyn tehokkaan pystyjännityksen välille lineaarinen riippuvuus, *kuva 23*.



Kuva 23. Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä.

Mikäli jännitys normaalikonsolidoituneella alueella kasvaa alkuarvosta σ'_0 arvoon σ' , saadaan muodonmuutokselle yhtälö:

$$\varepsilon = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (21)$$

missä C_c = kokoonpuristuvuusindeksi
 e_0 = alku huokosluku

Ylikonsolidoituneella alueella käytetään kaltevuudesta merkintää C_r . Kuten yhtälöstä (21) havaitaan, ei kokoonpuristuvuusindeksi ole yksinään täydellinen muodonmuutosparametri, koska painumalaskennassa tarvitaan tämän lisäksi huokosluku.

Vertailemalla yhtälöitä (5b) ja (21) havaitaan, että jännityksen eksponenttia $\beta = 0$ vastaavan moduuliluvun ja kokoonpuristuvuusindeksin välille voidaan johtaa yhtälö:

$$C_c = \frac{1 + e_0}{m} \ln 10 \quad (22)$$

Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmä vastaa siis tangenttimoduulimenetelmää kun jännityksen eksponentin arvoksi on kiinnitetty $\beta = 0$. Tästä johtuen sen arvoa ei tarvitse muuttaa, vaikka esikonsolidaatiojännityksen arvoa muutetaisiinkin. Kokoonpuristuvuusindeksin ja eräiden muiden puolilogaritmiseen mittakaavaan perustuvien menetelmien parametrien välille voidaan johtaa seuraavat riippuvuudet:

$$C_c = \ln 10 \cdot \lambda \quad (23)$$

$$C_c = (1 + e_0) \cdot \ln 10 \cdot \lambda^* \quad (24)$$

missä λ = Cam-Clay mallin parametri
 λ^* = Plaxis Soft-Soil-Creep mallin parametri

5.3 Vesipitoisuusmenetelmä

Kokoonpuristuvuusindeksin ja maan ominaisuuksien välille on esitetty useita eri yhtälöitä. Näistä Suomessa tunnetuin on Helenelundin (1967) esittämä, vesipitoisuusmenetelmäksi kutsuttu laskentatapa. Siinä kokoonpuristuvuusindeksiä arvioidaan vesipitoisuuden perusteella yhtälöllä (25). Suhteellinen muodonmuutos saadaan tällöin yhdistämällä yhtälöt (21) ja (25) jolloin saadaan yhtälö (26). Täysin vedellä kyllästyneessä kerroksessa korvataan huokosluku usein lausekkeella $e = w \cdot \gamma_s / \gamma_w$. Olettamalla maan kiintotiheysdeksi $2,7 \text{ g/cm}^3$ ja kertoimelle k_c arvo 0,85 saadaan muodonmuutokselle yhtälö (27).

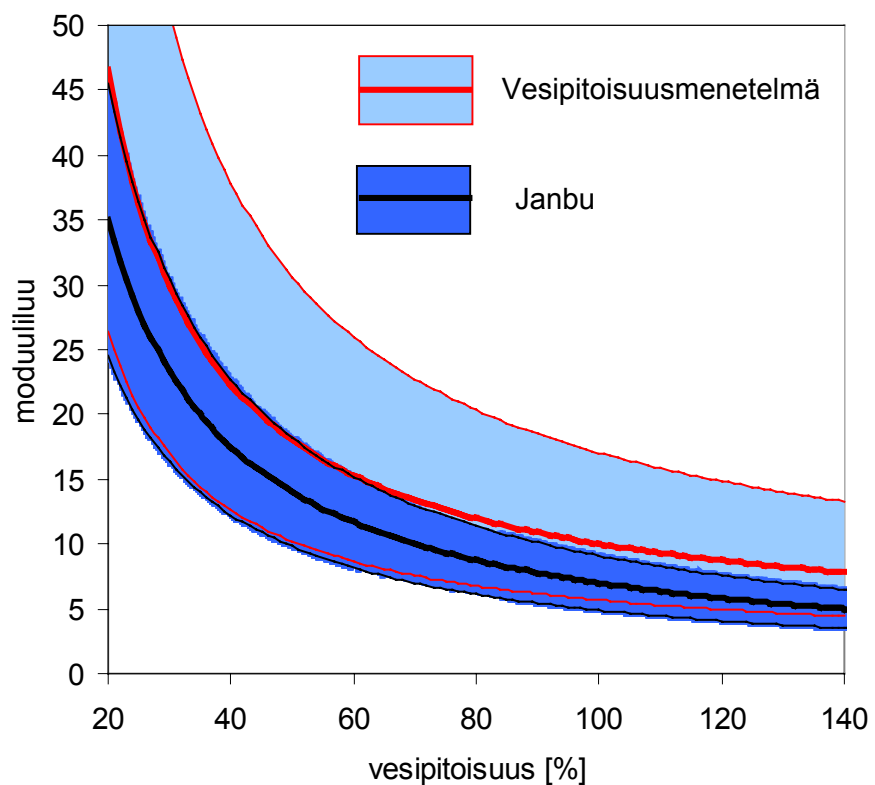
$$C_c = k_c \cdot \sqrt{w^3} \quad (25)$$

$$\varepsilon = \frac{k_c \cdot \sqrt{w^3}}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (26)$$

$$\varepsilon = \frac{0,85 \cdot \sqrt{w^3}}{1 + w \cdot 2,7} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} = \frac{0,85 \cdot \sqrt{w}}{\frac{1}{w} + 2,7} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (27)$$

missä k_c = kerroin useimmiten noin 0,85
 vaihtelu yleensä $0,5 < k_c < 1,5$
 w = vesipitoisuus

Vesipitoisuusmenetelmän mukainen kokoonpuristuvuusindeksi voidaan yhtälön (22) avulla muuttaa jännityseksponttia $\beta = 0$ vastaavaksi moduuliluvuksi. Tällöin vesipitoisuusmenetelmää voidaan verrata luvussa 3.1 esitettyyn moduuliluvun empiiriseen yhtälöön (6). Tällainen vertailu on esitetty kuvassa 24, jossa on oletettu, että maa on täysin vedellä kyllästetty ja että kiintotiheys on $2,7 \text{ g/cm}^3$. Kuten kuvasta havaitaan antavat yhtälöt saman suuntaisia tuloksia, kuitenkin niin, että vesipitoisuusmenetelmällä saadaan suurempi moduuliluku, eli pienemmät painumat.



Kuva 24. Vesipitoisuusmenetelmää vastaavan moduuliluvun ja yhtälön (6) vertailu. Kuvassa on esitetty yleisin arvo sekä vaihteluväli.

5.4 Arvio menetelmien soveltuvuudesta

Logaritmissen jännitysyksikön käyttö on peräisin portaittaisten ödometrikokeiden tulkintatavasta. Perinteisissä 24 tunnin kuormitusportain tehtävissä ödometrikokeissa käytetään yleensä kuorman kaksinkertaistamista eli $\Delta\sigma/\sigma = \text{vakio}$, mikä on logaritminen kuormitusinkrementti. Logaritmissen asteikon käyttäminen ödometrikokeiden tulkinnassa ei ole kuitenkaan suositeltavaa koska se aina vääristää todellista kuvaajaa. Huokosluvun käyttäminen kokoonpuristuman kuvaamiseen lienee perua Terzaghilta.

Kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmää ja muita puolilogaritmissen mittakaavaan perustuvia menetelmiä käytetään kansainvälisesti paljon. Niiden soveltuvuus pohjoismaisille saviille, joiden vesipitoisuus on korkea, ei kuitenkaan ole välttämättä kovin hyvä. Tämän työn lähtökohtana on ollut selvittää painumalaskennan ongelmia saviilla, joilla kokoonpuristuvuusmoduuli putoaa esikonsolidaatiojännityksen jälkeen hetkellisesti hyvin alas, ja joilla tämän vuoksi joudutaan tangentsmoduulimenetelmässä käyttämään negatiivista jännityksen eksponenttia. Koska kokoonpuristuvuusindeksi-menetelmä vastaa tangentsmoduulimenetelmää kun $\beta = 0$ on selvää, että yhden C_c :n arvon avulla ei tällaisilla saviilla voida kuvata käyttäytymistä koko normaalikonsolidoituneella alueella kovin hyvin. Tällöin olisi periaatteessa mahdollista jakaa normaalikonsolidoitunut alue kahteen osaan, joilla käytettäisiin eri C_c :n arvoja. Onkin ehkä hyvä pitää mielessä, että C_c :n alkuperäinen määritelmä oli mitatun kuvaajan kaltevuus, ei sovitetun suoran kuten nykykäytännössä (Janbu 1998). Koska kahden eri C_c :n arvon käyttäminen ei kuitenkaan sinällään toisi mitään lisäarvoa tangentsmoduulimenetelmään tai Ruotsalaiseen painumalaskentamenetelmään nähden, ei tällaista laskentatapaa suositella rutiinilaskentaan. Menetelmää käytettäessä tulisi kuitenkin aina varmistua, että kokoonpuristuvuusindeksi on määritetty tarkasteltavan tehtävän kanalta oikealta jännitysväliltä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Savikerrosten painumalaskenta tulee aina perustua riittävän laajaan ödometrikoeaineistoon. Mikään parametrien muuntamismenetelmä ei korvaa ödometrikokeiden tarvetta. Tarvittavan koemäärän suuruus tulee arvioida työn vaativuuden ja laajuuden perusteella. Verrattain pienen, yleensä vain 15 mm korkean ödometrikoenäytteen tuloksia tarvitsee kuitenkin aina käyttää tietyllä syvyysvälillä. Alustavissa laskelmissa käytettävissä oleva aineisto voi olla melko suppea, jolloin syvyysväli voi olla melko suurikin. Onkin erityisen tärkeätä, että käytetty painuman laskentatapa noudattaa ödometrikokeissa havaittua muodonmuutoskäyttäytymistä myös koetuloksista poikkeavilla esikonsolidaatiojännitysten arvoilla.

Suomessa on saatu Janbun tangenttimoduulimenetelmän käytöstä joitakin huonoja kokemuksia. Usein tämä on ilmennyt epätodellisen suurina painuman arvoina. Tapaukset johtuvat virheistä menetelmän käytössä. Ongelmat korostuvat pehmeillä savilla, joilla kokoonpuristuvuusmoduuli putoaa hetkelisesti hyvin alas, ja joilla joudutaan käyttämään negatiivista jännityseksponentin arvoa. Tällaisilla savilla ödometrikokeiden perusteella määritetyt tangenttimoduulimenetelmän parametrit m ja β ovat suoraan voimassa vain sillä esikonsolidaatiojännityksen arvolla, joka on saatu kun parametrit on määritetty. Mikäli niitä käytetään esikonsolidaatiojännityksen arvolla joka poikkeaa kokeen arvosta, tulee moduulilukua muuntaa. Ainoastaan näin saadaan laskennan kokoonpuristuma vastaamaan ödometrikokeessa havaittua muodonmuutoskäyttäytymistä. Onkin hyvä korostaa, että esitetty moduuliluvun muuntaminen ei ole empiirinen. Kyseessä on matemaattinen menettely, jolla laskenta saadaan tietyin oletuksin vastaamaan havaittua käyttäytymistä kun esikonsolidaatiojännityksen arvo poikkeaa kokeen arvosta. Parametrien muuntamisen tärkeys kasvaa mitä suurempi negatiivinen luku-arvo jännityseksponentilla on ja mitä suurempi on ero esikonsolidaatiojännityksillä. Mikäli $\beta = 0$ ei moduuliluvun arvo muutu.

Ruotsalaisessa painumalaskentamenetelmässä jännitys-kokoonpuristuma-kuvaaja ja kokoonpuristuvuusmoduulikuvaaja jaetaan kolmeen osaan. Normaalkonsolidoituneen alueen kuvaamiseen käytetään kolmea parametriä. Myös näitä tulee muuntaa, mikäli laskennassa käytettävä esikonsolidaatiojännityksen arvo poikkeaa selvästi kokeen arvosta. Mikäli parametrejä ei muunneta on virheen suuruus kuitenkin huomattavasti pienempi kuin tangenttimoduulimenetelmässä. Koska myös kuvaajien jako kolmeen osaan vastaa monelle savelle tyypillistä käyttäytymistä, voidaan menetelmää pitää hyvin käyttökelpoisena, eikä sen laajemmalle käytölle ole esteitä jatkossa.

Puolilogaritmiseen mittakaavaan perustuvia laskentamenetelmiä käytetään kansainvälisesti paljon. Niillä, tai niitä vastaavilla laskentamenetelmillä on myös omat soveltamisalueensa suomalaisilla savilla. Ei kuitenkaan ole mitään syytä siirtyä yksinomaan niiden käyttämiseen, koska ne ovat tangenttimoduulimenetelmän ja ruotsalaisen painumalaskentamenetelmän erityista-

pauksia. Vastaavanlainen muodonmuutoskäyttäytyminen saadaan tangenttimoduulimenetelmällä kiinnittämällä jännityseksponentin arvoksi $\beta = 0$ ja ruotsalaisella painumalaskentamenetelmällä poistamalla moduulin M_L osuus, eli antamalla $\sigma'_L = \sigma'_{cv}$. Tällainen laskentamalli ei kuitenkaan yleensä kuvaa pehmeiden savien käyttäytymistä hyvin koko normaalikonsolidoituneella alueella.

Ylikonsolidaatioasteen OCR käyttäminen esikonsolidaatiojännityksen antamisessa saattaa johtaa täysin virheellisen esikonsolidaatiojännityksen syvyysriippuvuuteen. Yleensä parempi tapa on käyttää niin sanottua ylikonsolidaatiota POP . Tärkein asia esikonsolidaatiojännityksen arvioimisessa on kuitenkin se, että arvio perustuu riittävän moneen ödometrikokeeseen.

7 KIRJALLISUUTTA

Bjerrum, L.. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 3.

Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, Vol. 40, No. 3.

Helenelund, K. V. (1967). Maarakennusmekaniikka, 137. Otakustantamo.

Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Europäische Baugrundtagung 1963, Wiesbaden*. Myös julkaisussa Bulletin 1, Geotechnical Division, Norwegian Institute of Technology.

Janbu, N. (1985). Soil models in offshore engineering. The 25th Rankine lecture. *Géotechnique* Vol. 35, No. 3.

Janbu, N. (1998). Sediment deformations. Bulletin 35, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Larsson, R. (1982). Jordens egenskaper. Statens Geotekniska Institut SGI, Information 1. Linköping.

Leroueil, S., Tavenas, F., Samson, L. and Morin, P: (1983). Preconsolidation pressure of Champlain clays. Part II. Laboratory determination. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 4.

Leroueil, S., Kabbaj, M. Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2.

Länsivaara, T. (1994). Portaaton ödometrikoe, TPPT projekti, väliraportti P1.

Länsivaara, T. (1996), Maan mekaanisen käyttäytymisen mallintaminen. Lisensiaatintutkimus, Geotekniikan laboratorio, julkaisu 34, TTKK

Länsivaara, T. (1999). A study of the mechanical behavior of soft clay. Doctoral dissertation. Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Mesri G. and Castro, A. (1987). C_{α}/C_c Concept and K_0 during secondary compression. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 3.

Mesri, G., Rokhsar, A. and Bohor, B. F. (1975). Composition and compressibility of typical samples of Mexico clay. *Géotechnique*, Vol. 25, No. 3.

Perret, D., Locat, J. and Leroueil, S. (1995). Strength development with burial in fine-grained sediments from the Saguenay fjord, Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 2.

PLAXIS (1998). Computational geotechnics. Plaxis course Trondheim, 24-26 November 1998, NTNU.

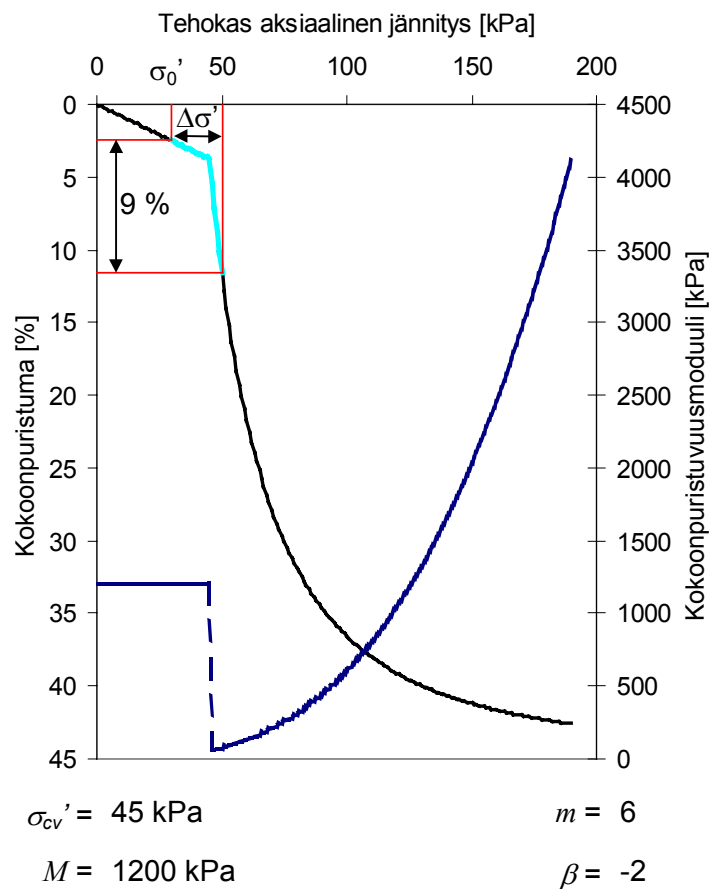
Smith, P. R., Jardine, R. J. and Hight, D. W. (1992). The yielding of Bothkennar clay. *Géotechnique*, Vol. 42, No. 2.

Svensk Standard (1991). Geotekniska provningsmetoder – kompressionsegenskaper – Ödometerförsök, CRS-försök – Kohesionsjord. Svensk standard SS 02 71 26. Standardiseringskommissionen i Sverige.

Tielaitos (1994). Maanvarainen tiepenger savikolla. Suunnitteluohje, Tielaitoksen selvityksiä 67/1994.

Esimerkki 1b.

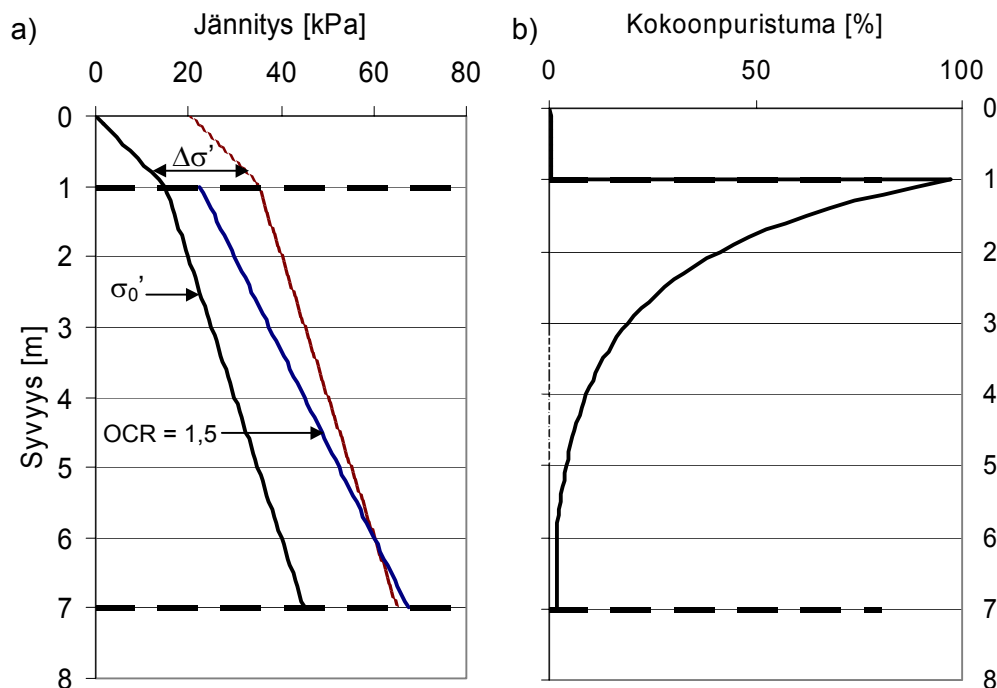
Esimerkissä tarkastellaan luvussa 3.2.2 esitetyn esimerkin 1 tapausta sillä erolla, että jännitysekspONENTIN arvo on nyt $\beta = -2$. Tätä vastaava ödometrikoetulos on esitetty *kuvassa L1.1*. Kuvassa on myös esitetty jännitys-kokoonpuristumapolku, joka vastaa 20 kPa jännityslisästä in situ jännityksestä. Kokeen mukaan kokoonpuristuma on tällöin noin 9 %. Mikäli savi olisi normaalikonsolidoitunut, eli in situ jännitys olisi esikonsolidaatiojännityksen suuruinen (45 kPa), olisi kokoonpuristuma 20 kPa lisäkuormalla kokeen mukaan 21,4 %.



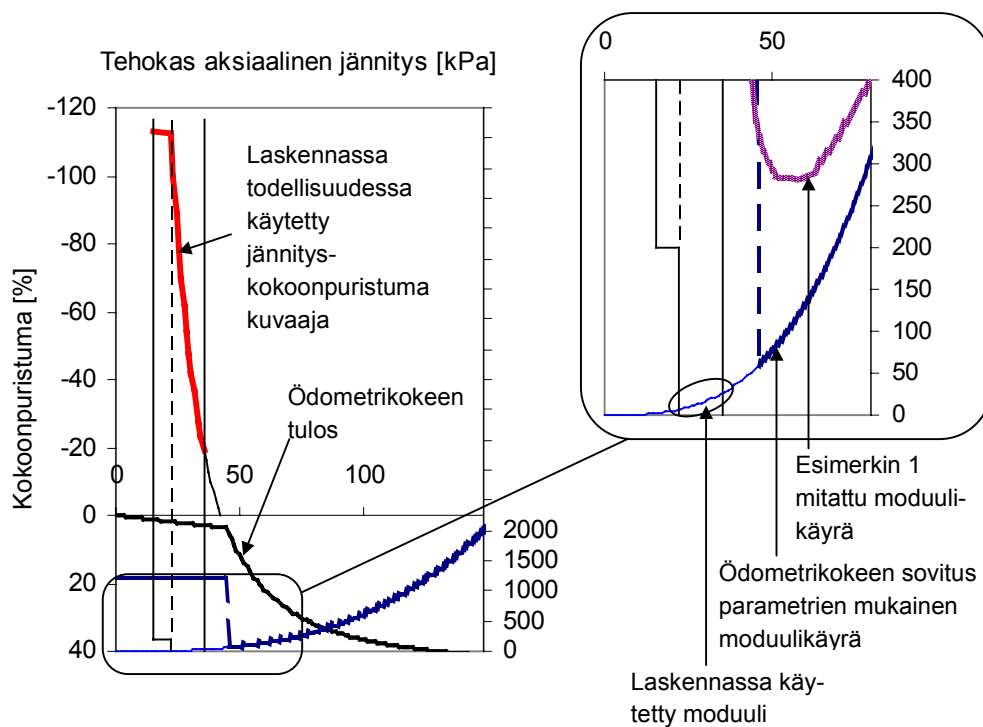
Kuva L1.1 Esimerkin 1b syvyydeltä 4 m tehdyn ödometrikokeen tulos.

Kuvassa L1.2 a) on esitetty in situ tehokas jännitys, ylikonsolidoitumisastetta $OCR = 1,5$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys. *Kuvassa L1.2 b)* on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuten kuvasta nähdään, on näin saatu laskettua kerroksen yläosassa noin 100 % kokoonpuristuma 20 kPa kuormalla, mikä on luonnollisesti täysin mahdoton tulos. Kerroksen alaosassa laskettu kokoonpuristuma on edelleen vain 1,7 % koska annettua esikonsolidaatiojännitystä ei ylitetä.

Kuvassa L1.3 on havainnollistettu laskentaa vastaava jännitys-kokoonpuristumakuvaaja ja laskennassa käytetty kokoonpuristuvuusmoduuli savikerroksen yläosan osalta. Esimerkissä 1 esitetyt virheet korostuvat entisestään. Syynä tähän on entistä suurempi negatiivinen jännitysekspONENTIN arvo. Tämän johdosta kokoonpuristuvuusmoduuli putoaa epärealistisen alas ja kasvaa liian hitaasti pienillä jännityksillä.



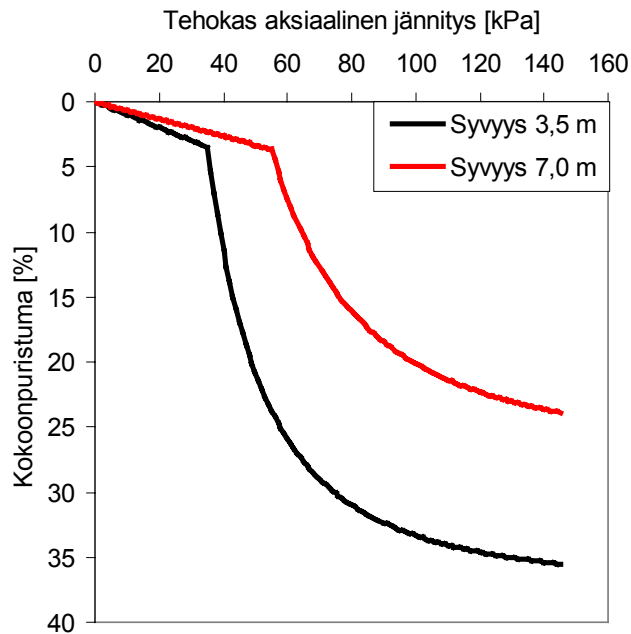
Kuva L1.2 In situ tehokas jännitys, ylikonsolidoitumisastetta $OCR = 1,5$ vastaava esikonsolidaatiojännitys sekä 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).



Kuva L1.3. Ödometrikokeen tulos, sekä laskennassa 1 m syvyydellä käytetty jännitys-kokoonpuristuma kuvaaja sekä kokoonpuristuvuusmoduuli.

Esimerkki 2b.

Esimerkissä tarkastellaan luvussa 3.2.2 esitetyn esimerkin 2 tapausta sillä erolla, että moduuliluvun ja jännityseksponentin arvoja on muutettu. Jännityseksponentin arvo on nyt molemmilla savilla $\beta = -2$. Tätä vastaavat ödometrikoetulokset on esitetty kuvassa L2.1.



Syvyys = 3,5 m

$$\sigma_0' = 28 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{cv}' = 35 \text{ kPa}$$

$$M = 1000 \text{ kPa}$$

$$m = 12$$

$$\beta = -2$$

Syvyys = 7 m

$$\sigma_0' = 45 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{cv}' = 55 \text{ kPa}$$

$$M = 1500 \text{ kPa}$$

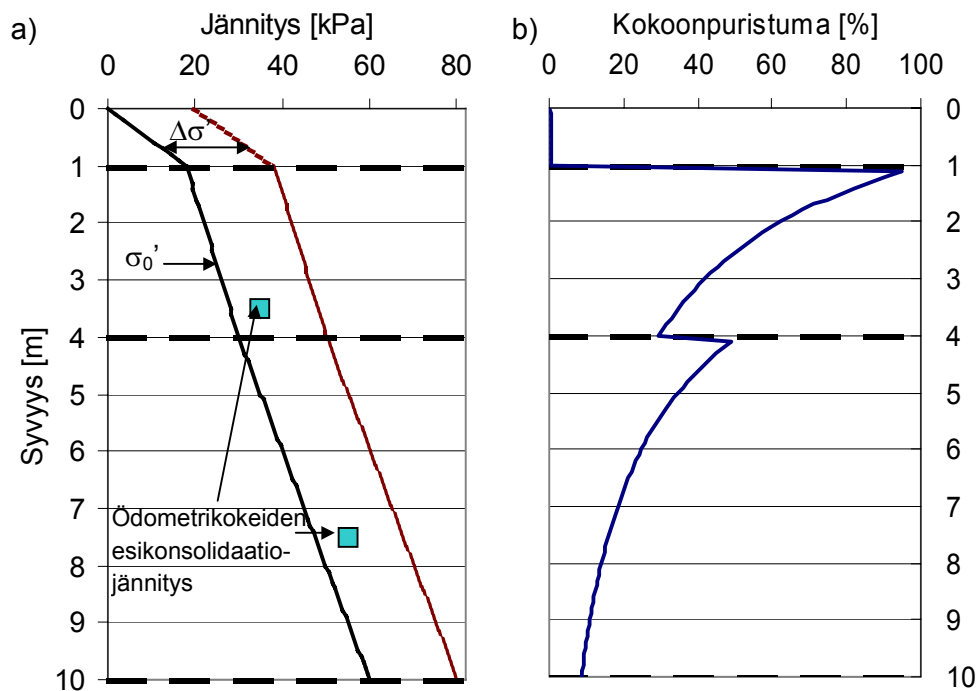
$$m = 7$$

$$\beta = -2$$

Kuva L2. 1 Esimerkin 2b ödometrikoiteiden jännitys-kokoonpuristumakuvaajat.

Kuvassa L2.2 a) on esitetty in situ tehokas jännitys, 20 kPa jännityslisäystä vastaava jännitys sekä ödometrikoiteiden esikonsolidaatiojännitys. Kuvassa L2.2 b) on esitetty laskettu kokoonpuristuma. Kuten kuvasta nähdään, on näin saatu laskettua liejuisen savikerroksen yläosassa lähes 100 % kokoonpuristuma ja savikerroksen yläosassa lähes 50 % kokoonpuristuma, 20 kPa kuormalla. Tulos on luonnollisesti täysin mahdoton.

Liitteiden 1 ja 2 esimerkit havainnollistavat, että parametrien väärästä käytöstä johtuvat virheet kasvavat sen mukaan mitä suurempi negatiivinen arvo jännityseksponentilla on.



Kuva L2. 2 In situ tehokas jännitys, jännityslisäystä vastaava jännitys sekä ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännitys a) ja laskettu kokoonpuristuma b).