



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Soratien kantavuuden määrittäminen laboratoriossa CBR- ja kolmiaksoalikoella

Veli-Matti Takkinen

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

kesäkuu 2018



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Soratien kantavuuden määrittäminen laboratoriossa
CBR- ja kolmiaksaalikokeella**

Veli-Matti Takkinen

Ohjaaja: Veikko Pekkala

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

kesäkuu 2018

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Takkinen, Veli-Matti		Työn ohjaaja yliopistolla Veikko Pekkala	
Työn nimi Soratie kantavuuden määrittäminen laboratoriossa CBR- ja kolmiakiaalikoella			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika kesäkuu 2018	Sivumäärä 28 s., 2 liitettä
<p>Tiivistelmä</p> <p>Suomen sorateiden kunnan heikkeneminen on ollut polttava puheenaihe jo jonkin aikaa. Yhtenä osana sorateiden kunnossapitoa on selvittää soratien rakennekerrosten kantavuus. Soratien kantavuuden määrittämiseksi tierakenteesta tulee selvittää materiaaliolosuhteet, olosuhdetekijät ja jännitystilaa kuvaavat tekijät. Materiaaliolosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa maksimiraekoko, rakeisuuskäyrän muoto ja hienoainespitoisuus. Olosuhdetekijöitä kuvaavia tekijöitä ovat muun muassa tiiveystila, routimis-sulamisprosessi ja kosteustila. Jännitystilaa kuvataan kenttä- ja laboratoriotutkimuksilla saatavilla muodonmuutosominaisuuksilla.</p> <p>CBR- ja kolmiakiaalikoet ovat yleisimmin käytössä olevat laboratoriomenetelmät muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseksi. Kokeiden tuloksena saadaan muodonmuutosmoduuli, jota voidaan hyödyntää soratien kantavuutta määritettäessä.</p> <p>Työn tavoitteena on selvittää CBR- ja kolmiakiaalikokeen eroavaisuuksia ja antaa suosituksia, mitä menetelmää tulisi käyttää missäkin tilanteessa. Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka lisäksi työhön kuuluu käytännön osuus, jossa työn tekijä suorittaa CBR- ja rakeisuuskäyräkoetta Oulun Yliopiston geotekniikan laboratoriossa.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksen perusteella ei voida antaa tarkkoja rajoja, milloin käyttää mitään menetelmää. Sekä CBR- että kolmiakiaalikoet näytteen edustavuudella on suuri merkitys koetuloksiin. Molemmissa kokeissa voidaan joutua poistamaan suuria rakeita näytteen muodostamiseksi, jolloin edustavuus heikkenee. CBR-kokeessa tuloksena saadaan CBR-luku, jota verrataan empiirisesti saatua standardilukuun. Kolmiakiaalikoet tuloksena saadaan jännitysparametrit, joiden avulla voidaan määrittää näytteen koheesio ja kitkakulma. CBR-kokeessa näytettä puristetaan yksiakiaalisesti. Kolmiakiaalikoet näytettä puristetaan kolmesta jännityssuunnasta. kolmiakiaalisessa puristuksessa ongelmaksi muodostuu jännitysten kiertymisen, sillä kolmiakiaalikoet jännityssuuntien kiertymistä ei oteta huomioon.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Bachelor's Thesis		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Takkinen Veli-Matti		Thesis Supervisor Veikko Pekkala	
Title of Thesis Determining loading capacity of a gravel road in a laboratory using CBR- and Triaxial compression tests			
Major Subject Water and Geo Engineering	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date June 2018	Number of Pages 28 p., 2 App.
<p>Abstract</p> <p>Declining conditions in Finland's gravel roads have been hot topic for a while. One part of gravel road maintenance is to find out loading capacity of the road. To define loading capacity, material conditions, situational features and stress state needs to be defined. Factors affecting material conditions are among other things maximum grain size, grading curve and fine content. Factors describing situational features are for example tightness, frost-melt cycle and moisture content. Stress state is defined by deformation features in field survey and laboratory tests.</p> <p>CBR- and Triaxial compression tests are most used laboratory tests to determine deformation features. Deformation modulus is received as a result from both tests. Modulus can be used to define loading capacity of gravel road.</p> <p>Objective of this thesis is to find out differences between CBR- and Triaxial compression tests and give recommendations which test to use at given situation. Thesis is performed as a literature review. In addition, author does CBR- and grading curve tests as a practical part in Geotechnical Laboratory of University of Oulu.</p> <p>Based on literature review, no precise boundaries can be given for method selection. Both CBR- and Triaxial compression tests are very dependent on how well specimen represents real conditions. In both tests, large grains may need to be removed to construct specimen. In this case, representativeness of the specimen declines. In CBR-test, the result is a CBR value, which is then compared to standard CBR value. In Triaxial test, the test results are stress parameters, which are used to determine cohesion and angle of friction of specimen. In CBR-test, specimen is compressed uniaxially, where as in Triaxial test specimen is compressed triaxially. Triaxial test doesn't take into consideration twisting of stresses which becomes a problem.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 SORATIEN RAKENNE	6
3 TIEN KANTAVUUDEN MÄÄRITTÄMISEN PERIAATTEET	8
4 TIEN KANTAVUUDEN MÄÄRITTÄMINEN LABORATORIOSSA	12
4.1 California Bearing Ratio – CBR	12
4.2 Kolmiaksiaalikoeloe.....	15
6 CBR- JA KOLMIAKSIAALIKOKEEN VERTAILUA.....	18
7 KÄYTÄNNÖN OSUUS	21
8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	24
LÄHDELUETTELO.....	25
LIITTEET	5
Liite 1. Käytännön osuudessa suoritettut rakeisuuskäyräkokeet	
Liite 2. Käytännön osuudessa suoritettut CBR-kokeet	

1 JOHDANTO

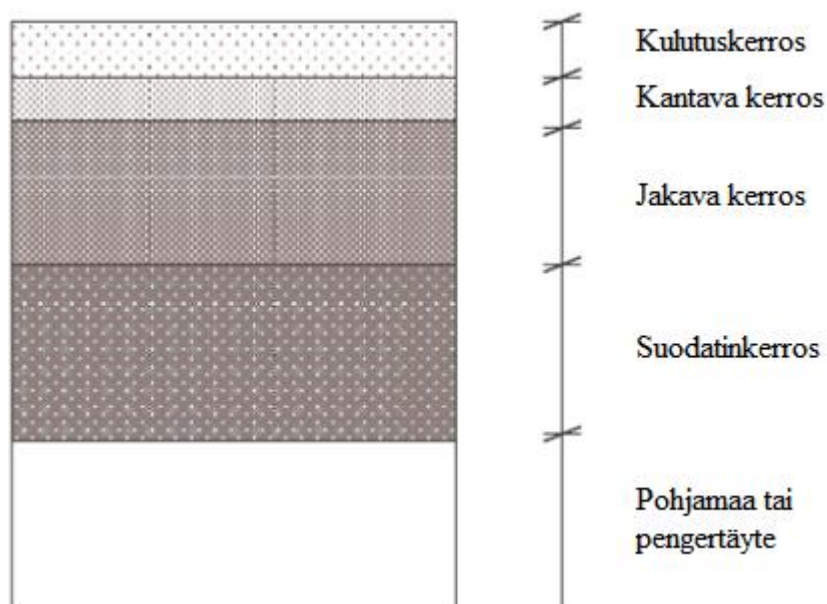
Tien kantavuuden määrittäminen perustuu tien rakenteen muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseen. Näiden ominaisuuksien määrittämiseen käytetään sekä laboratorio- että kenttäkokeita. Kokeiden tuloksia yhdistelemällä ja vertailemalla saadaan määritettyä rakenteen muodonmuutosominaisuudet niissä olosuhteissa, missä materiaali on tierakenteessa. Tässä työssä keskitytään käytössä olevien laboratoriomenetelmien selvittämiseen. Lisäksi työssä rajataan pois bitumilla sidotut rakenteet, eli keskitytään vain sitomattomien rakenteiden muodonmuutosominaisuuksiin. Sorateiden kuntoon liittyvä aihe vaikutti kiinnostavalta, koska aihe on ajankohtainen teiden kunnan heikentymisen vuoksi.

Muodonmuutosominaisuuksilla tarkoitetaan kuormituksen johdosta tiessä tapahtuvia muodonmuutoksia. Muodonmuutokset riippuvat muun muassa rakennemateriaalista, olosuhteista ja kuormituksen määrästä. Laboratoriomenetelmistä yleisimpiä muodonmuutoksien määrittämiseen ovat CBR- ja kolmiakσιαalikoe. Työn tavoitteena on selvittää käytössä olevat laboratoriomenetelmät soratien kantavuuden määrittämiseksi ja lisäksi selvittää, mitä laboratoriomenetelmää tulisi käyttää missäkin tilanteessa mittauksia tehdessä. Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka lisäksi työhön kuuluu käytännön osuus, jossa työn tekijä suorittaa CBR- ja rakeisuuskäyräkokeita Oulun Yliopiston geotekniikan laboratoriossa.

2 SORATIEN RAKENNE

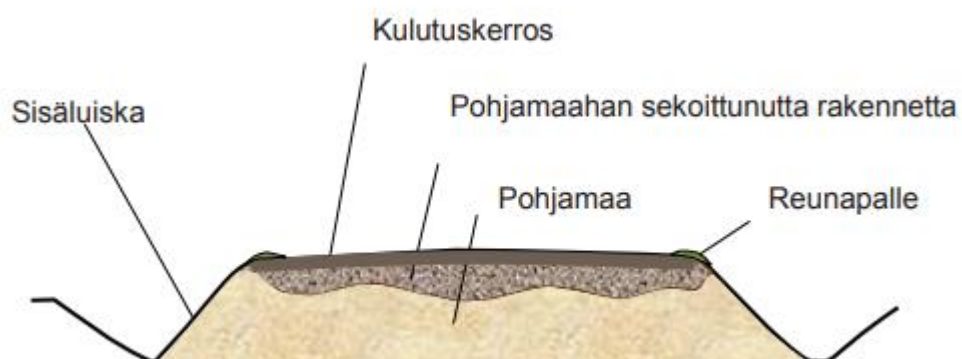
Sorateiden rakenne voidaan jakaa kahteen luokkaan, rakennettuun ja rakentamattomaan. Rakennetussa soratiessä tien rakenteina ovat yleensä kulutus-, kantava, jakava ja suodatinkerros. Pääosa Suomen sorateista on kuitenkin rakentamattomia teitä, joissa selviä rakenteellisia kerroksia ei ole havaittavissa. Kerroksellisuuden sijasta tie on rakennettu läheltä saatavilla olevista, monesti routivista materiaaleista. Tämän takia suurin osa Suomen sorateista on routivia. (Liikennevirasto 2014, s.11)

Soratien rakenteen kerrokset luokitellaan sitomattomiksi rakenteiksi. Kuvassa 1. on annettu rakennetun soratien kerrokset. Rakennetussa soratiessä alimpana kerroksena toimii alusrakenne, joka on pohjamaata tai pengertäytettä. Alusrakenteen tehtävänä on muodostaa tasainen, kantava ja painumaton pohja päällysrakenteille. Alusrakenteen päällä on suodatinkerros, joka tarvitaan, kun alusrakenne on routivaa. Suodatinkerroksen tehtävänä on katkaista veden kapillaarinen nousu alusrakenteesta sekä estää päällysrakenteiden ja alusrakenteen materiaalien sekoittuminen keskenään. Sekoittuminen voidaan estää myös suodatinkankaan avulla, joka on yleinen ratkaisu kunnostettavilla sorateilla. Suodatinkerroksen tehtävänä on myös suurentaa routimattoman päällysrakenteen paksuutta, mikä vähentää routivan alusrakenteen routanousuja (Liikennevirasto 2014, s.11-12). Rakennetussa soratiessä kantavan ja jakavan kerroksen tehtävänä on siirtää päällysteelle tuleva paino alempiin kerrokseen siten, että liikennekuormasta aiheutuva rasitus ei aiheuta ongelmia päällysteessä. Kerrosten tehtävänä on myös jakaa paino tasaisesti alemmille kerroksille, jottei suodatinkerros ja alusrakenne petä liikennekuorman alla. Kulutuskerroksen tehtävänä on muodostaa tasainen, turvallinen ja miellyttävä ajopinta, joka kestää sekä liikennekuorman, että sääilmiöiden suorat rasitukset pinnalle. Kulutuskerroksen kuuluu myös siirtää seisova vesi pois tienpinnasta halkeamien ja kolojen muodostumisen estämiseksi. Kulutuskerros lisää myös koko tierakenteen yläosan jäykkyyttä. (Liikennevirasto 2014, s.12-13,)



Kuva 1 Rakennetun soratien kerrokset

Kuvassa 2. on annettu rakentamattoman soratien rakenne. Kuvasta huomioitavaa on kerroksellisen rakenteen puuttuminen. Selkeiden kerroksien puuttumisen lisäksi pohjamaan ja kulutuskerroksen materiaalin sekoittuminen on iso ongelma rakentamattomilla sorateilla, koska routimaton kulutuskerros sekoittuessaan routivaan pohjamaahan muuttuu routivaksi. (Liikennevirasto 2014, s.11-12,)

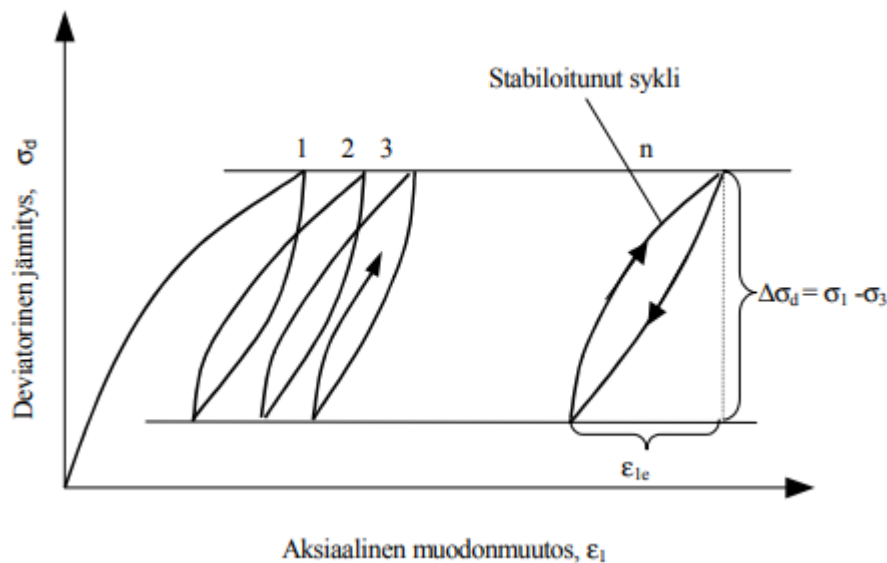


Kuva 2 Rakentamattoman soratien rakenne

3 TIEN KANTAVUUDEN MÄÄRITTÄMISEN PERIAATTEET

Tien kantavuuden määrittäminen perustuu rakenteen muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseen. Tierakenteeseen valittavien materiaalien kannalta on olennaista tietää, millaisia liikennekuormia tiellä esiintyy. Liikennekuorma aiheuttaa tierakenteeseen muodonmuutoksia aiheuttamalla jännitystä rakenteeseen. Muodonmuutosten ja jännitysten välistä suhdetta pyritään kuvaamaan kokemusperäisillä ja kokeellis-analyttisillä menetelmillä. Kokemusperäisessä lähestymisessä muodonmuutoksia selvitetään kokemuksiin perustuvien tietojen avulla. Kokemusperäiset menetelmät ovat olleet yleisessä käytössä aina 1900-luvun alkupuolelta lähtien. Analyttisten menetelmien tavoitteena on tarkastella kuormitusten aiheuttamia muodonmuutoksia jännitysten ja taipumien avulla. Analyttinen määrittäminen vaatii rakenteessa esiintyvien jännitysten ja muodonmuutosten välisten riippuvuuksien esittämistä matemaattisessa muodossa. (Ehrola 1996, s.166-167)

Kantavuutta määritettäessä tulee erotella palautuvat ja palautumattomat muodonmuutokset. Palautuvilla muodonmuutoksilla tarkoitetaan sitä osaa muodonmuutoksesta, joka rasituksen poistumisen jälkeen palautuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Palautumattomilla muodonmuutoksilla tarkoitetaan sitä osaa muodonmuutoksesta, joka ei kuorman poistumisen jälkeen palaudu alkuperäiseen tilaansa. Tierakenteessa, materiaalista riippuen, esiintyy sekä palautuvaa että palautumatonta muodonmuutosta. Palautuvia muodonmuutoksia syntyy yleensä koko rakennemateriaalin käyttöiän ajan. Kun rakenne saavuttaa riittävän määrän muodonmuutoksia, on rakenne painunut jo niin, että rakenteessa esiintyy enää palautuvia muodonmuutoksia. Kuvassa 3 on esitetty palautuvien ja palautumattomien muodonmuutosten käyttäytyminen toistuvien kuormien alla. Kun maamateriaalia kuormitetaan riittävän monta kertaa samalla kuormalla, palautumattomien muodonmuutosten osuus pienenee ja palautuvien muodonmuutosten osuus kasvaa. Lopulta kaikki tai lähes kaikki muodonmuutokset ovat palautuvia. (Kolisoja 1993, s.1-2)



Kuva 3 Maamateriaalin käyttäytyminen toistuvien kuormien alla

Muodonmuutoksiin vaikuttavia tekijöitä ovat jännitystilaa, rakeisuusmuuttujat, tiivystilaa, kosteustilaa, rakeiden fysikaaliset ominaisuudet ja ilmaston vaikutus. Näistä tekijöistä tärkeimpänä yleisesti pidetään jännitystilaa. Jännitystilalla tarkoitetaan rakenteeseen kohdistuvaa jännitystä kuorman johdosta. (Kolisija 1993, s.70)

Rakeisuusmuuttujilla tarkoitetaan raekokojakauman, maksimiraekoon ja hienoainespitoisuuden vaikutusta muodonmuutoksiin. Raekokojakaumaltaan lajittuneimmilla näytteillä saavutetaan paras kyky vastustaa palautuvia muodonmuutoksia. Maksimiraekoon merkitys laboratoriotutkimusten osalta on merkittävä, sillä laboratorionäytteiden kokoa joudutaan monesti kasvattamaan maksimiraekoon kasvaessa. Maksimiraekoon pienentäminen alentaa palautuvaa muodonmuutosmoduulia merkittävästi. Palautumattomien muodonmuutosten osalta selkeitä johtopäätöksiä maksimiraekoon vaikutuksesta ei ole pystytty todistamaan. Hienoainespitoisuuden vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin ei ole yksikäsitteinen, sillä se riippuu tutkittavasti materiaalista. (Kolisija 1993, s.71-76)

Tiivystilan vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin on todettu olevan yllättävän pieni. Tiivistyksen kasvaessa myös muodonmuutosmoduuli kasvaa. (Kolisija 1993, s.80-82)

Kosteustilalla katsotaan olevan selvä vaikutus rakenteen muodonmuutosominaisuuksiin. Palautuvien muodonmuutosten osalta kosteuden kasvattaminen voi kasvattaa muodonmuutosmoduulia karkearakeisilla maalajeilla. Kosteuden muodostama pintajännitys rakeiden huokostilassa saa aikaan näennäisen koheesion, joka kasvattaa muodonmuutosmoduulia. Liiallinen kosteus sen sijaan täyttää suuremman osan huokostilasta, jolloin huokosvedenpaineen vaikutus vähenee ja muodonmuutosmoduuli pienenee. Pienin muodonmuutosmoduuli saavutetaan, kun huokostila on täysin kyllästynyt eikä näennäistä koheesiota ole. Kaiken kaikkiaan karkearakeisilla materiaaleilla on optimivesipitoisuus muodonmuutosmoduulin maksimiarvolla, joka ei yleensä ole minimi- eikä maksimivesipitoisuus vaan jotain siltä väliltä. (Kolisoja 1993, s.76-80)

Rakeiden fysikaalisista ominaisuuksista tärkeimmät muodonmuutosmoduulin kannalta ovat raemuoto, rakeen pinta ja rakeen kestävyys. Rakeen muoto vaikuttaa merkittävästi pysyviin muodonmuutoksiin, koska erimuotoisia rakeilla on toisistaan poikkeava tiivistettävyyys. Rakeiden pinnan vaikutus karkeuden ja kitkan ansiosta muuttaa myös muodonmuutosmoduulia. Rakeiden kestävyys vaikuttaa merkittävästi muodonmuutosmoduulin. Kestävyyden kannalta olennaisena tekijänä on materiaalin syntyhistoria. Kalliosta murskatun kiviaineksen kestävyys ei ole niin suuri kuin jääkauden aikana syntyneiden lajittuneiden karkearakeisten ainesten. Kestävyyttä huomioitaessa tulee myös ottaa huomioon kiviaineksen kyky kestää ilmaston aiheuttamaa rapautumista. (Kolisoja 1993, s.82-86)

Ilmaston vaikutuksen osalta Suomen olosuhteissa suurimmat haasteet luovat vuodenaikojen vaihtelut, erityisesti roudan vaikutus. Kaikkein vaarallisin tilanne muodonmuutosten kannalta syntyy, kun pohjamaa on yläosastaan sulanut ja routalinssien sulamisvesien kyllästämä. Samaan aikaan alapuolella oleva jäätynyt maa estää veden poistumisen rakenteesta alaspäin, jolloin ylempi kerros ennen pitkää muuttuu täysin kyllästyneeksi. Kun täysin kyllästyneeseen rakenteeseen kohdistuu vielä liikennekuorma, kehittyy huokosveteen ylipaine, joka kumoaa maarakeiden välisen tehokkaan jännityksen. Tällöin rakenteen kyky vastustaa palautuvia ja palautumattomia muodonmuutoksia on pienimmillään. Epätasaisen sulamisen lisäksi talviolosuhteissa

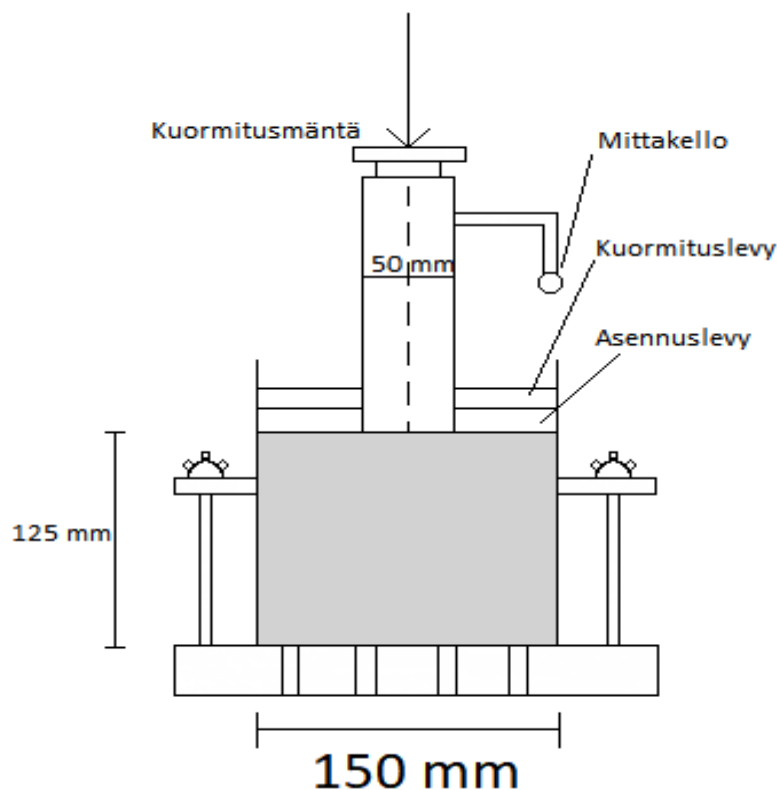
epätasaiset routanousut aiheuttavat epätasaisia muodonmuutoksia, joiden takia rakenne löyhtyy. (Kolisoja 1993, s.86-87)

Yllämainituista muodonmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä jännitystilän määrittäminen on olennainen osa laboratoriomenetelmiä. Jos tutkittavan materiaalinäytteen edustavuus on hyvä, voidaan kaikki muut tutkittavana olevan materiaalin ominaisuudet, kuten tiiviys- ja kosteustila, olettaa määritetyksi laboratoriokokeita tehtäessä. Laboratoriokokeiden tulosten varmistamiseksi edellä esiteltyt parametrit tulisivat testaushetkellä vastata mahdollisimman hyvin rakenteessa esiintyviä olosuhteita. Kun tutkittavana olevan materiaalin muodonmuutosominaisuudet määritetään laboratoriossa siten, että näyte on niissä olosuhteissa, joissa se tulee olemaan tierakenteessa, on suurin osa mainituista tekijöistä otettu automaattisesti huomioon. (Alkio ym. 2001, s.30-31)

4 TIEN KANTAVUUDEN MÄÄRITTÄMINEN LABORATORIOSSA

4.1 California Bearing Ratio – CBR

California Bearing Ratio tai yleisemmin CBR, on USA:n Kaliforniassa kehitetty testi, jolla määritetään tien rakennemateriaalin ja alusrakenteen kantavuusominaisuuksia epäsuorasti määrittämällä CBR-luku näytteelle. CBR-testi kehitettiin 1930-luvun Kaliforniassa vastaamaan lisääntyvän tieverkoston määritystarpeisiin. Ennen CBR-testausta tiemateriaalien ominaisuuksien määrittämiseen käytettiin vain maalajitunnistamista ja pienimpien rakeiden raekokoanalyysia. Testi noudattelee O.J Porterin kehittämää testimenetelmää, jossa näyte tiivistetään muottiin, jonka jälkeen näytettä puristetaan sylinterin muotoisella männällä vakionopeudella ja mitataan tarvittu voima nopeuden ylläpitämiseksi. Saadusta puristusvoimasta ja puristusmatkasta voidaan johtaa CBR-luku, josta voidaan aiempien empiiristen kokeiden avulla johtaa näytteen muodonmuutosominaisuudet. Kuva 4. esittää CBR-kokeen laboratoriolaitteistoa. (Head 1982, s. 469)



Kuva 4 CBR-kokeen laboratoriolaitteisto Proctor-menetelmällä

CBR-luku perustuu standardimalliin, jossa kalkkikivimursketta on puristettu vakionopeudella. Tehtyjä CBR-testituloksia verrataan standardimalliin prosentuaalisesti. CBR-testiä varten on olemassa useita eri näytteen valmistelutapoja, riippuen missä testiä käytetään. Näytteen valmistustavasta huolimatta, itse näytteen testaus toteutetaan samalla yllä mainitulla tavalla. (Ehrola 1996, s.189)

Muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseksi kokeessa mitatut painuma- ja painetulokset piirretään käyrälle, jossa x-akseli vastaa painumaa ja y-akseli painetta. CBR-luvun määrittämiseen tarvitaan 2,5 mm ja 5,0 mm painumia vastaavia painearvoja, joita verrataan standardimalliin. (Head 1982, s. 469)

Standardipaineet ovat 2,5 mm painumalle 7,0 MPa ja 5,0 mm painumalle 10,5 MPa. (Ehrola 1996, s.189)

$$CBR = \frac{\text{Mitattu paine}}{\text{Standardi paine}} * 100 \%$$

Kaava 1. CBR-luvun määrittäminen

Yllä olevalla kaavalla 1 2,5 mm ja 5,0 mm painumista saatuja prosenttiosuuksia verrataan keskenään, ja suurempi saaduista luvuista valitaan näytteen CBR-luvuksi. Näin saatu luku ei varsinaisesti vielä kerro materiaalin muodonmuutosominaisuuksista. CBR-luvun hyödyntämiseksi maailmalla on kerätty runsaasti tietoa CBR-luvun vastaavuudesta materiaalin palautuvia muodonmuutosominaisuuksia kuvaavan muodonmuutosmoduulin M_r määrittämiseksi. CBR:n ja muodonmuutosmoduulin riippuvuudelle on esitetty lukuisia lineaarisia ja epälineaarisia malleja, joiden tarkkuus vaihtelee. CBR-luvun ja muodonmuutosmoduulin välisen riippuvuuden esittäminen yleisen mallin avulla ei ole yksiselitteistä. Jäännösmoduulin määrittämiseen tulisi käyttää palautuvaa kimmoista muodonmuutosta, kun CBR-luvun määrittämiseen käytetään kokonaismuodonmuutosta, jossa plastisen ja kimmoisen muodonmuutoksen suhde vaihtelee. Lisäksi CBR-koetta varten näytteestä joudutaan poistamaan kaikki yli 30 mm raekooltaan olevat kappaleet, joita esiintyy tiemateriaaleissa jatkuvasti. Tällöin koestettava näyte ei ole edustava näyte käytettävästä tiemateriaalista. Muodonmuutosmoduulin riippuvuuksia on esitetty muun muassa Ehrolan kirjassa *Liikenneväylien rakenteet ja materiaalit*. (Ehrola 1996, s.189-193)

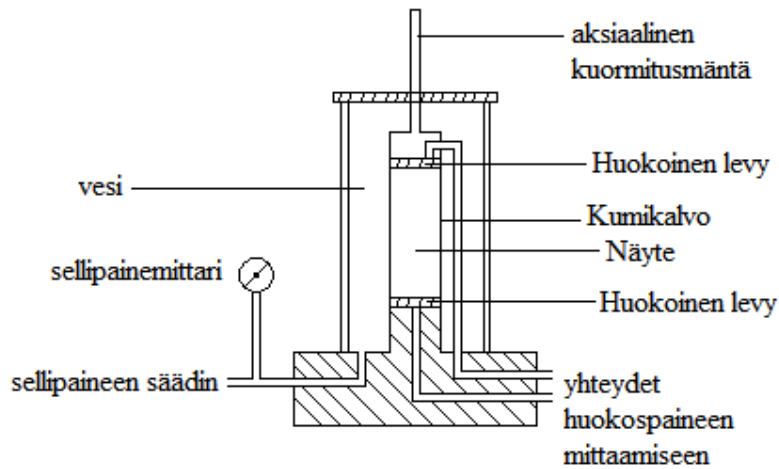
Suomessa CBR-näytteen valmistamiseen käytetään 150 mm halkaisijan muottiin Proctor-menetelmällä tiivistettyä näytettä. Proctor-menetelmässä näyte tiivistetään muottiin optimivesipitoisuudessa, tai siinä kosteudessa ja siinä tiiveydessä, missä materiaali tulee tierakenteessa olemaan. (Ehrola 1996, s.189)

Proctor-menetelmällä tarkoitetaan Proctor-koetta, jonka on kehittänyt R.R. Proctor 1930-luvulla. Kokeen pohjalta kehitettyä paranneltua Proctor-koetta, jota nykyisin kutsutaan yleensä yksinkertaisemmin Proctor-kokeeksi, käytetään CBR-kokeen näytteen valmistamiseen. Kokeessa näyte sullotaan muottiin viidessä kerroksessa siten, että jokaista kerrosta tiivistetään pudotusvasaralla 25 kertaa. Vasaran annetaan pudota näytteen päälle omalla painollaan, jolloin näyte tiivistetään aina samalla työmäärällä. (Jääskeläinen, 2009, s. 54-55)

4.2 Kolmiaksiaalikoete

Maamateriaalin muodonmuutosmoduulin määrittämiseen käytetään myös suoraa menetelmää, kolmiaksiaalikoetta. Kolmiaksiaalikoeteen ovat kehittäneet 1930-luvun Iso-Britanniassa C.J. Jenkin ja D.B. Smith. Vaikka kolmiaksiaalikoete sai alkunsa jo 30-luvulla, alettiin sitä käyttämään laajamittaisemmin vasta 1960-luvulla. CBR-kokeesta poiketen, kolmiaksiaalikoeteessa painetta näytteeseen kohdistetaan joka puolelta näytettä, ei vain näytteen päältä männän avulla. Kolmiaksiaalikoetta pidetäänkin nykypäivänä standardina muodonmuutosmoduulin määrittämiseen. (Reddy ym. 1992, s.89)

Kolmiaksiaalikoetta pidetään maamateriaalin leikkauslujuuden ja jännitys-muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseen monipuolisimpana ja tarkimpana kokeena. Kolmiaksiaalikoete perustuu näytteen staattiseen tai dynaamiseen kuormittamiseen sekä vaaka- että pystysuorassa. Vaaka- ja pystysuorilla kuormituksilla näytettä saadaan kuormitettua kohtisuorasti kolmesta eri suunnasta, jolloin näytteeseen kohdistuva paine vastaa parhaiten luonnossa vallitsevia kuormituksia. Kolmiaksiaalilaitteiston periaatekuva on annettu kuvassa 5. Laitteiston koko määräytyy tutkittavana olevan näytteen raekoon mukaan. Näytteen sellin on oltava noin viisi kertaa suurempi kuin materiaalin maksimiraekoko. Tienäytteen eri kerrosten tutkimiseen voidaan joutua käyttämään erikokoisia näytteitä riippuen eri kerrosten vaihtelevasta maksimiraekoosta. Esimerkiksi tien kantavan ja jakavan kerroksen määrittämiseen tulee valita vähintään 300 mm halkaisijaltaan oleva näyte, koska yleensä kantava ja jakava kerros sisältävät raekooltaan suurempia sora- tai kivirakeita kuin muut kerrokset. (Ehrola 1996, s.193)



Kuva 5 kolmiakσιαalikoelaitteiston periaatekuva

Hienorakeisia maalajeja tutkittaessa näyte voidaan koestaa häiriintymättömänä. Karkearakeisempia maalajien kanssa näyte joudutaan rakentamaan sylinteriin sopivaksi, jolloin näyte on häiriintynyt. Näyte asetetaan sylinteriin siten, että näytteen pohjassa ja päällä on päätylevyt, ja sylinterin vaipalla on vettä pitävä kalvo. Sylinterin ulkopuolella olevaan nesteeseen asetetaan paine siten, että sekä vaippaan että päätylevyihin kohdistuvat pääjännitykset $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ovat yhtä suuret. Tämän jälkeen näytettä aletaan puristamaan päätylevyjen avulla. Puristuksen takia näytteeseen syntyy pystysuora puristava voima, joka aiheuttaa näytteeseen muuttuvan pystysuoran lisäjännityksen. Tätä saatua lisäjännitystä mitataan, ja sama lisäjännitys lisätään sellipaineeseen, jotta jännitys pysyy yhtä suurena joka puolelta näytettä. Näytteen puristamista jatketaan niin kauan, että näyte murtuu. Näytteen murruttua pystysuora lisäjännitys on saavuttanut maksimiarvonsa. Samasta näytepaikasta otetaan useita näytteitä, jolloin eri paineen alla murtuvat näytteet muodostavat eri murtotilanteita. Eri murtotilanteiden perusteella voidaan piirtää murtotilanteiden mukaisia Mohrin jännitysympyröitä. Jännitysympyröiden perusteella voidaan määrittää näytteen tehokas kitkakulma ja tehokas koheesio (Rantamäki ym. 1979, s.134-137).

Muodonmuutosmoduuli M_r määritetään kolmiakσιαalikokeessa deviatorisen jännityksen vaihteluvälin ja palautuvan suhteellisen muodonmuutoksen avulla, kun kokeessa

saavutetaan tila jossa palautumattomia muodonmuutoksia ei enää synny. Muodonmuutosmoduulia varten määritetään palautuvien muodonmuutosten aksiaalinen muodonmuutos sekä aksiaalinen jännityspulssi. (Ehrola 1996, s.196)

Kuvassa 5 ylhäällä olevaa aksiaalista kuormitusmäntää kutsutaan yleensä dynaamiseksi kuormitusmännäksi, sillä kuormitusta pitää pystyä muuttamaan sykleissä. Kolmiaksaalikoe voidaan suorittaa myös yksinkertaistettuna, jolloin kuormitus on staattinen. Näytesylinterin ympärillä oleva neste saa aikaan horisontaalisen jännityksen näytteeseen. Kuormitusten aikaansaamat muodonmuutokset mitataan näytteen pinnalta näytteen keskivaiheilta sekä pysty- että vaakasuunnassa. Muodonmuutokset voidaan siis mitata sekä aksiaalisen kuormituksen suuntaan että kohtisuoraan aksiaalista kuormitusta. Dynaamisen syklisen kuormituksen tarkoituksena on kohdistaa näytteeseen mahdollisimman hyvin tieolosuhteita simuloiva jännitys, joka vastaa ajoneuvojen renkaiden aiheuttamaa kuormitusta rakennetta vasten. Dynaamisen kuormituksen simuloimisen lisäksi kolmiaksaalikokeella pystytään maanäyte koestamaan sellaisissa olosuhteissa, joissa näyte tierakenteessa on. Näihin ominaisuuksiin kuuluu materiaalin jännitystila, tiiveys ja kosteus. (Ehrola 1996, s.193-194)

Näytteen olosuhteiden vakioimisen lisäksi, näytteeseen kohdistuvaa aksiaalista jännitystä ja veden aiheuttamaa sellipainetta voidaan vaihdella. Samalla näytteelle voidaan tarpeen tullen tehdä kokeita aksiaalista jännitystä ja sellipainetta vaihtelemalla, jolloin saadaan selville näytteen käyttäytyminen erilaisissa olosuhteissa. Yleensä kuitenkin riittää, että näytettä kuormitetaan sellaisella jännityksellä, joka parhaiten simuloi liikennekuormituksen aiheuttamaa jännitystä. Tavallisesti kuormituspulssien määrä liikennekuormaa simuloitaessa on 20000 pulssia. Kuormituksen aikana seurataan pysyvien muodonmuutosten kehittymistä, jonka perusteella voidaan arvioida pysyvien muodonmuutostenkäyttäytymistä tierakenteessa. (Ehrola 1996, s.196)

Dynaamisen ja staattisen kolmiaksaalikokeen välillä ei varsinaisesti ole suurta eroa. Dynaamisella kokeella saatuja tuloksia pidetään yleisesti tarkimpina muodonmuutosmoduulin määrittämiseen. Staattisen kolmiaksaalikokeen etu on halvemmat laiteinvestoinnit verrattuna dynaamiseen kolmiaksaalikokeeseen. (Alkio ym. 2001, s.78-79)

6 CBR- JA KOLMIAKSIAALIKOKEEN VERTAILUA

Rakennemateriaalin muodonmuutosominaisuuksien määrittämiseksi CBR- ja kolmiaksiaalikoet ovat yleisimmän käytössä olevat menetelmät (Ehrola 1996, s.189). Näiden menetelmien välillä on kuitenkin eroja, joiden selvittämisen avulla voidaan hakea perusteluja menetelmien käyttämiselle. Seuraavissa kappaleissa on haettu molempien menetelmien hyviä ja huonoja puolia muodonmuutosmoduulin määrittämistä silmällä pitäen.

Sekä CBR- että kolmiaksiaalikoeteissa näytteen edustavuus verrattuna tierakenteessa olevaan materiaaliin on keskeisessä osassa kokeen lopputulosten tarkkuutta mitattaessa. Molemmissa koejärjestelyissä näytteen koolle on asetettu tiettyjä rajoitteita. CBR-kokeessa näyte puristetaan Proctor-kokeen mukaisesti muottiin, ja kolmiaksiaalikoeteissa näyte rakennetaan näytesylinteriin sopivaksi. Molemmissa tapauksissa tavoitteena on muodostaa näyte niin, että näytteen halkaisija on noin 5-kertainen näytteen maksimiraekokoon nähden. CBR-kokeen tapauksessa hienorakeisilla maalajeilla näytteen halkaisija voi olla huomattavasti paljon suurempi kuin 5-kertainen verrattuna näytteen maksimiraekokoon. Karkearakeisissa kerroksissa näytteestä voidaan joutua poistamaan suurimpia rakeita, jotta näyte saadaan tutkittua. Molemmissa tapauksissa näytteen edustavuus heikkenee. Kolmiaksiaalikoeteissa tilanne on CBR-kokeeseen verrattuna hieman parempi riippuen siitä, minkä kokoisia näytesylintereitä on käytettävissä ja kuinka paljon näytettä on saatavilla. Karkearakeisia maalajeja tutkittaessa voidaan myös kolmiaksiaalikoeteissa joutua poistamaan suurimpia rakeita liian suuren näytekokoon välttämiseksi. (Kolisaja 1993, s.91-100)

CBR-kokeessa saatua CBR-lukua verrataan empiirisesti saatuun standardilukuun. Standardilukuun vertaaminen aiheuttaa ongelmia eri materiaalien välillä. CBR-luvun määrittämiseen on käytössä useita eri korrelaatioita, joiden saamat tulokset vaihtelevat riippuen materiaalista. Kolmiaksiaalikoeteissa näytettä kuormitetaan murtotilaan saakka, jonka jälkeen murtotilan jännitysparametrit mitataan ja näiden perusteella määritetään näytteen kitkakulma ja koheesio. Kolmiaksiaalikoeteista saatavat tulokset kuvaavat materiaalin kestämiä jännityksiä suorasti, missä CBR-kokeen tulokset ovat epäsuoria. (Kolisaja 1993, s.92-93)

CBR-korrelaatioiden soveltuvuutta sitomattomien karkearakeisten materiaalien tutkimiseen pidetään yleisesti kyseenalaisena. CBR-kokeesta saatavan muodonmuutosmoduuli on vahvasti riippuvainen jännitystilasta, jolloin eri CBR-korrelaatioilla saatavat tulokset antavat saman arvon jännitystilasta riippumatta. Karkearakeisissa näytteissä suuria rakeita joudutaan poistamaan näytteestä koestamista varten, jolloin tulokset eivät edusta tiemateriaalia. Suurten rakeiden poistaminen vaikuttaa muodonmuutoskäyttäytymiseen oleellisesti. (Kolisoja 1993, s.91-100)

Dynaamista kolmiaksiaalikoetta pidetään yleisesti keskeisimpänä karkearakeisten sitomattomien materiaalin perustutkimusmenetelmänä. Koeratalaitteiden ohella dynaaminen kolmiaksiaalikoete on ainoa laboratoriomenetelmä, jossa ominaisuudet on mahdollista tutkia niiden todellisen raekoostumuksen mukaisesti. Merkittävin rajoitus tierakennusmateriaalien tutkimisessä dynaamisessa kolmiaksiaalikoeteessa on kokeen pääjännityssuuntien muuttumattomuus. Todellisuudessa pääjännitykset kiertyvät kuormituksen alla, näin ei kolmiaksiaalikoeteessa kuitenkaan tapahdu. Kiertymisellä on huomattava vaikutus muodonmuutoskäyttäytymiseen. (Kolisoja 1993, s.91-100)

Staattisen kolmiaksiaalilaitteiston etuna voidaan pitää sen yksinkertaisempaa käyttöä ja halvempia investointikustannuksia. Staattisella kolmiaksiaalilaitteistolla saadaan suuntaa antavia tuloksia muodonmuutosominaisuuksista. (Kolisoja 1993, s.93)

CBR- ja kolmiaksiaalikoete ovat yleisimmin käytössä olevat laboratoriotutkimusmenetelmät tien kantavuuden määrittämiseksi. Menetelmien välille löydettiin joitain eroavaisuuksia, joita on koottu taulukkoon 1. Alla olevaan taulukkoa voi hyödyntää tutkimusmenetelmää valittaessa.

	CBR-koe	kolmiakselialikoe
Edustavuus	Suurien rakeiden poistaminen karkearakeisissa näytteissä	Suurien rakeiden poistaminen, jos isoa näytesylinteriä ei ole saatavilla
Näytekoko	5 kertaa maksimiraekoko, Näytekoko lukittu 150 mm halkaisijan muottiin	5 kertaa maksimiraekoko, käytettävissä olevat näytesylinterikoot, riittävä määrä näytettä
Näytteen valmistelu	Parannetun Proctor-kokeen mukaisesti	Käytettävissä olevien näytesylinterien mukaisesti valitaan maksimiraekoon mukaan sopivin
Tulosten tarkastelu	saadun CBR-luvun vertaileminen empiirisesti saatuun standardilukuun	Suora menetelmä, jossa jännitysparametrien avulla määritetään koheesio ja kitkakulma
Muodonmuutosmoduulin M_r määrittäminen	CBR-luvun avulla empiirisesti saaduilla riippuvuuksilla	murtotilassa määritettyjen palautuvien muodonmuutosten ja saatujen paineiden avulla
Karkearakeiset materiaalit	korrelaatioiden soveltuvuus kyseenalainen, suurien rakeiden poistaminen	dynaaminen koe keskeinen menetelmä, suurien rakeiden poistaminen
pääjännityssuunnat	yksiakselinen puristuskoe, vain pystysuorajännitys	kolmiakselinen puristuskoe, pääjännitysten kiertyminen ongelmallinen
Tutkimusvariaatiot	Eri standardeissa eri näytteen valmistusmenetelmät	dynaaminen ja staattinen menetelmä

Taulukko 1. CBR- ja kolmiakselialikokeen vertailua

7 KÄYTÄNNÖN OSUUS

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi työn suorittamiseen kuului CBR-kokeiden ja rakeisuusmääritysten tekeminen Oulun Yliopiston geoteknisessä laboratoriossa. Laboratoriokokeiden tarkoituksena oli harjoitella laboratoriotyöskentelyä sekä opetella väylärakentamisessa yleisesti käytössä olevien tutkimusten tekemistä. Oulun Yliopistolla ei ole kolmiaksiaalikoelaitteistoa.

Rakeisuusmääritysten ja CBR-kokeiden tuloksia käytetään hyväksi Oulun Yliopiston vuoden 2017 aikana toteuttamassa tutkimusprojektissa, jossa tutkittiin HCT-yhdistelmien erilaisille teille aiheuttamaa rasitusta. Rakeisuusmäärityksiä suoritettiin 16 ja CBR-kokeita 3. Rakeisuuskäyrän määrittämiseksi maanäytteille tehtiin märkä- ja kuivaseulonta sekä tarvittaessa hydrometrikoe. Liitteessä 1 on piirrettynä työn aikana suoritettujen rakeisuuskäyrämäärittäykset. Liitteessä 2 on annettu kolmen CBR-kokeen tulokset.

Liitteen 1 rakeisuuskäyrien perusteella voidaan määrittää näytteiden maalaji. Alla olevassa taulukossa 1 on määritetty GEO-luokituksen mukaiset maalajit näytteille.

Näyte	Maalaji		Näyte	Maalaji
K 1/1	srHkMr		VO 1/1	siHkMr
K 1/2	hkSrMr		VO 1/2	srHkMr
K 1/3	srHkMr		VO 1/3	siHkMr
K 2/1	SrMr		VO 1/4	srHkMr
R 1/1	hkSr		VO 1/5	hkSr
R 1/2	Hk		Y 2/1	srMr
VJ 1/1	hkSr		Y 2/2	hkMr
VJ 1/2	Hk		Y 4/1	srMr

Taulukko 2. Maalajimääritykset maanäytteille

Liitteen 2 CBR-lukujen ja kaavan 1 avulla voidaan määrittää näytteen CBR-luku. 2,5 mm ja 5,0 mm painuman paineita verrataan standardipaineeseen, ja suurempi saaduista luvuista valitaan näytteen CBR-luvuksi. Standardipaine 2,5 mm kohdalla on 7 MPa ja 5,0 mm kohdalla 10,5 MPa. Taulukossa 2 on laskettu kolmen näytteen CBR-luvut 2,5 mm ja 5,0 mm painumalle ja määritetty näytteen CBR-luku.

Näyte	Paine 2,5 mm (MPa)	CBR _{2,5} (%)	Paine 5,0 mm (MPa)	CBR ₅ (%)
R1/1	8,654	126	19,166	185
R1/2	3,35	47	5,90	57
K1/1	10,376	151	23,703	229

Taulukko 3 CBR-luvut näytteille

Suurempi saaduista CBR-luvuista valitaan näytteen CBR-luvuksi, jolloin saadaan seuraavat tulokset:

R1/1: CBR = 185 %

R1/2: CBR = 57 %

K1/1: CBR = 229 %

Saadut CBR-luvut eivät varsinaisesti kerro näytteen muodonmuutoskäyttäytymisestä. CBR-luvun muuttamiseksi muodonmuutosmoduuliksi on käytössä muuntokaavoja, joiden avulla CBR-lukua voidaan verrata esimerkiksi kolmiakσιαalikokeella saatuihin tuloksiin. Yleisimmin käytössä oleva muuntokaava on Shellin tierakenteen mitoitusmenetelmän mukainen muuntokaava. Kaavassa 2 on annettu lineaarinen malli CBR- ja kenttämittausten välille. (Ehrola 1996, s.191)

$$M_r = 10 * CBR$$

Kaava 2. Muodonmuutosmoduulin laskeminen CBR-luvun avulla

Tällöin yllä olevien näytteiden muodonmuutosmoduuleiksi saadaan:

$$R1/1: M_r = 10 * CBR = 10 * 185 = 1850 \text{ MPa}$$

$$R1/2: M_r = 10 * CBR = 10 * 57 = 570 \text{ MPa}$$

$$K1/1: M_r = 10 * CBR = 10 * 229 = 2290 \text{ MPa}$$

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn aiheena oli selvittää soratien kantavuutta, siihen vaikuttavia tekijöitä sekä laboratoriossa tehtäviä kokeita kantavuuden selvittämiseksi. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka lisäksi työhön kuului käytännön osuus, jossa työn tekijä suoritti rakeisuusmäärittäyksiä ja CBR-kokeita Oulun Yliopiston geoteknisessä laboratoriossa.

Soratien rakenteiden muodonmuutoksiin vaikuttavia tekijöitä ovat jännitystila, rakeisuusmuuttajat, tiiviystila, kosteustila, rakeiden fysikaaliset ominaisuudet ja ilmaston vaikutus. Suurin vaikutus tien kantavuuteen katsotaan yleensä olevan jännitystilalla. Muiden tekijöiden vaikutus muodonmuutosominaisuuksiin on merkittävä, muttei niin suuri kuin jännitystilalla. Laboratoriomenetelmien käyttämisen tavoitteena on selvittää näytteen jännitystila siten, että muut tekijät vastaavat sitä tilannetta, missä materiaali tulee olemaan tierakenteessa. Jos tutkittavan materiaalinäytteen edustavuus on hyvä, voidaan kaikki muut tutkittavana olevan materiaalin ominaisuudet, kuten tiiviys- ja kosteustila olettaa määrittetyksi laboratoriokokeita tehtäessä.

CBR- ja kolmiakσιαalikokeet ovat yleisimmin käytössä olevat laboratoriotutkimusmenetelmät tien kantavuuden määrittämiseksi. Kappaleessa 6 esitettyyn taulukkoon 3 on kerätty CBR- ja kolmiakσιαalikokeen eroavaisuuksia.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella ei voida antaa selkeitä rajoja tai suosituksia, milloin käyttää CBR- tai kolmiakσιαalikoetta. Tärkeimpänä tekijänä menetelmän valinnassa tulisi ottaa huomioon näytteen edustavuus. Sekä CBR- että kolmiakσιαalikokeessa näytteestä voidaan joutua poistamaan suuria rakeita kokeen suorittamista varten, jolloin näytteen edustavuus heikkenee. Näytteen edustavuuden lisäksi menetelmien tapa tarkastella tuloksia eroaa toisistaan merkittävästi. CBR-kokeessa tuloksena saadaan CBR-luku, jota verrataan empiirisesti saatuun standardilukuun. Kolmiakσιαalikokeessa tuloksena saadaan jännitysparametrit, joiden avulla voidaan määrittää näytteen kitkakulma ja koheesio. Tämän lisäksi kolmiakσιαalikokeessa näytettä puristetaan kolmesta jännityssuunnasta, ja CBR-kokeessa vain yksiakσιαalisesti.

LÄHDELUETTELO

Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, Rainer., Laukkanen, K., Petäjä, S., Pihlajamäki, J., Spoof, H., 2001. Tien rakennekerrosten materiaalit. Helsinki: Tiehallinto. 140 s. Saatavilla: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/materiaalit66-2001.pdf>

Ehrola, E., 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Tampere: Rakennustieto Oy. 365 s. ISBN 951-682-338-6

Head, K.H., 1982. Manual of Soil Laboratory Testing Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Plymouth: Pentech. 742 s. ISBN 0-7273-1306-3

Jääskeläinen, R., 2009. Geotekniikan perusteet. 2.painos. Jyväskylä: Tammertekniikka, 332 s. ISBN 9789525491517

Kolisoja, P., 1993. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Helsinki: Tielaitos. 159 s. Saatavilla: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/138498/3700tie.pdf>

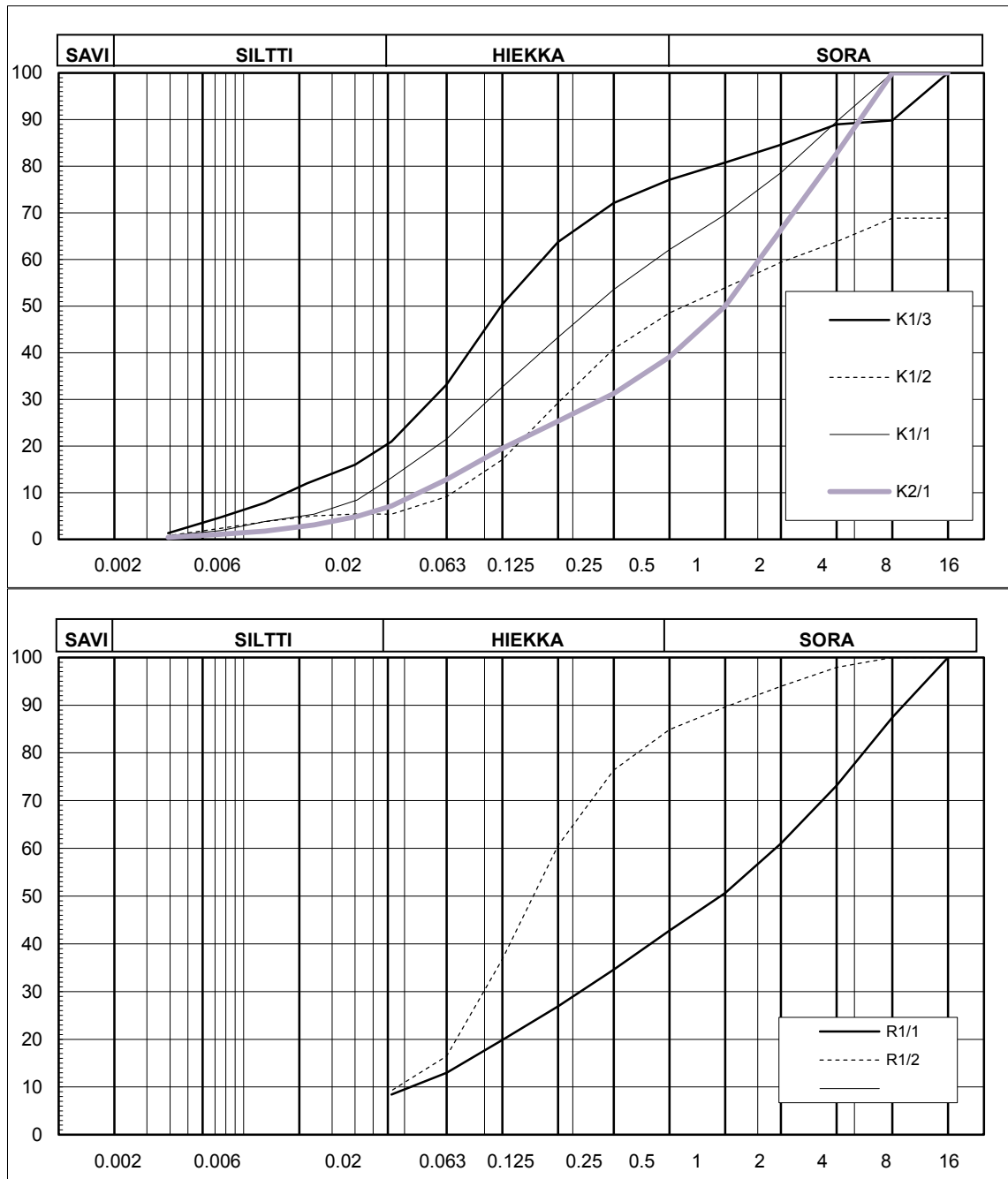
Liikennevirasto, Kunnossapito-osasto, 2014. Sorateiden kunnossapito. Helsinki, 72 s. ISBN 978-952-255-399-7. Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-01_sorateiden_kunnossapito_web.pdf

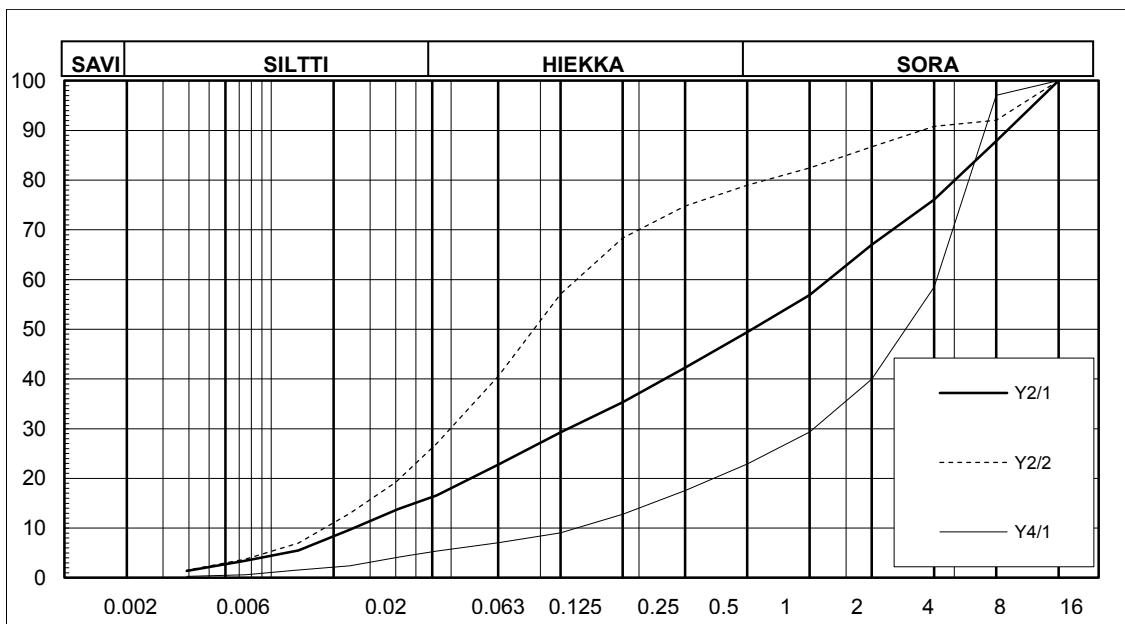
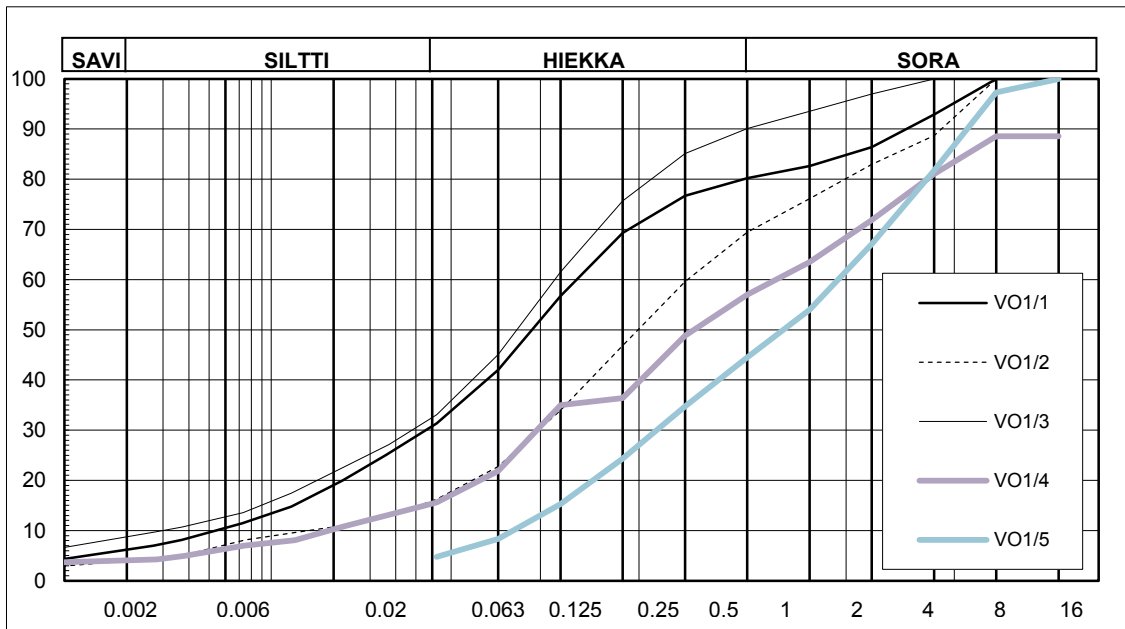
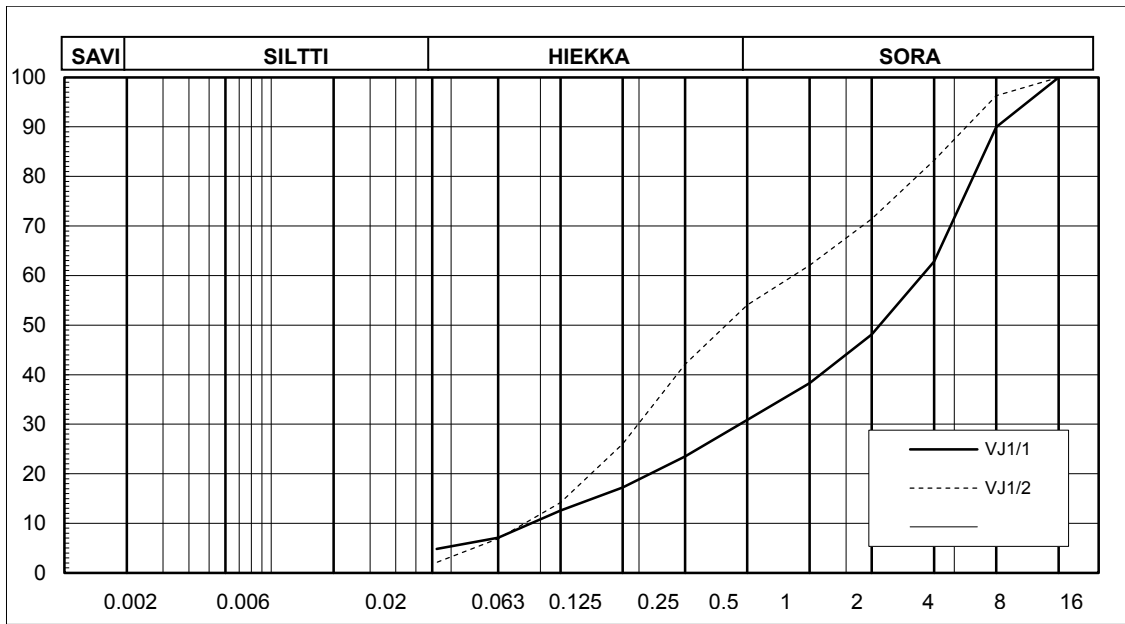
Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M., 1979. Geotekniikka. 18. muuttumaton painos. Otaniemi: Otakustantamo, 293 s. ISBN 951-672-257-1

Reddy, K. R., Saxena, S. K., and Budiman, J. S., Development of a True Triaxial Testing Apparatus, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, June 1992, pp. 89-105.

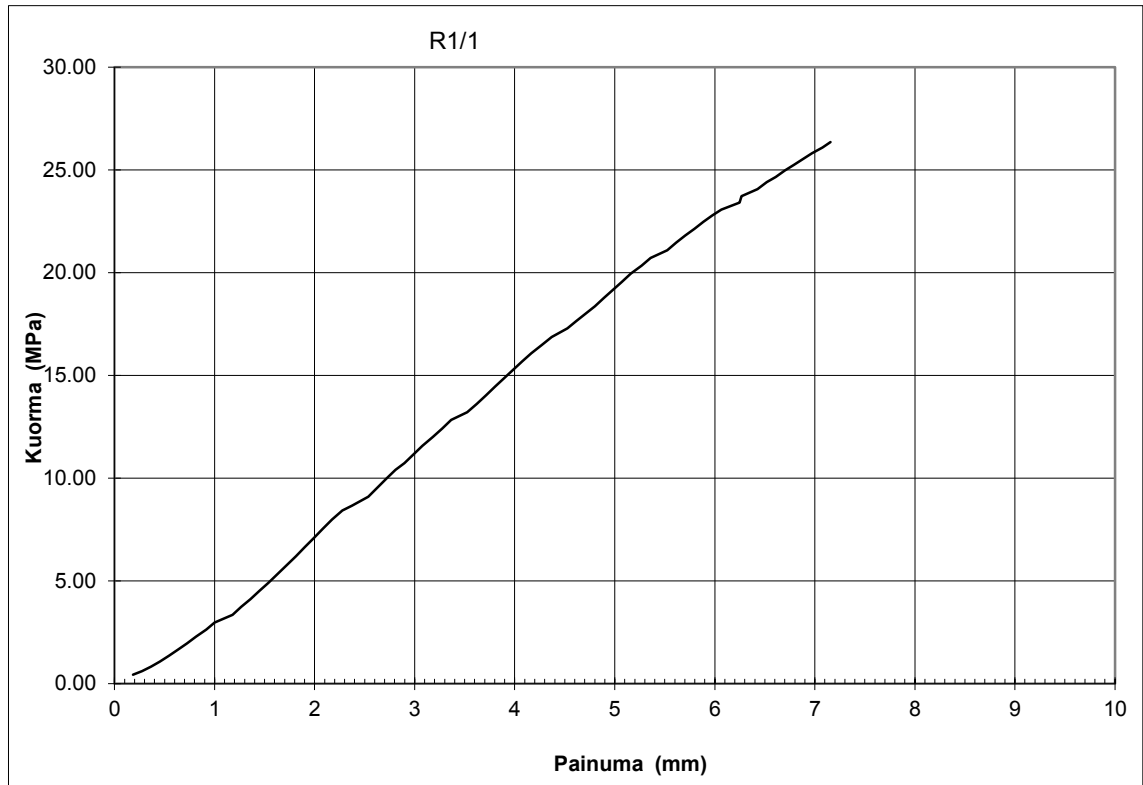
LITTEET

Liite 1. Käytännön osuudessa suoritettut rakeisuuskäyräkokeet





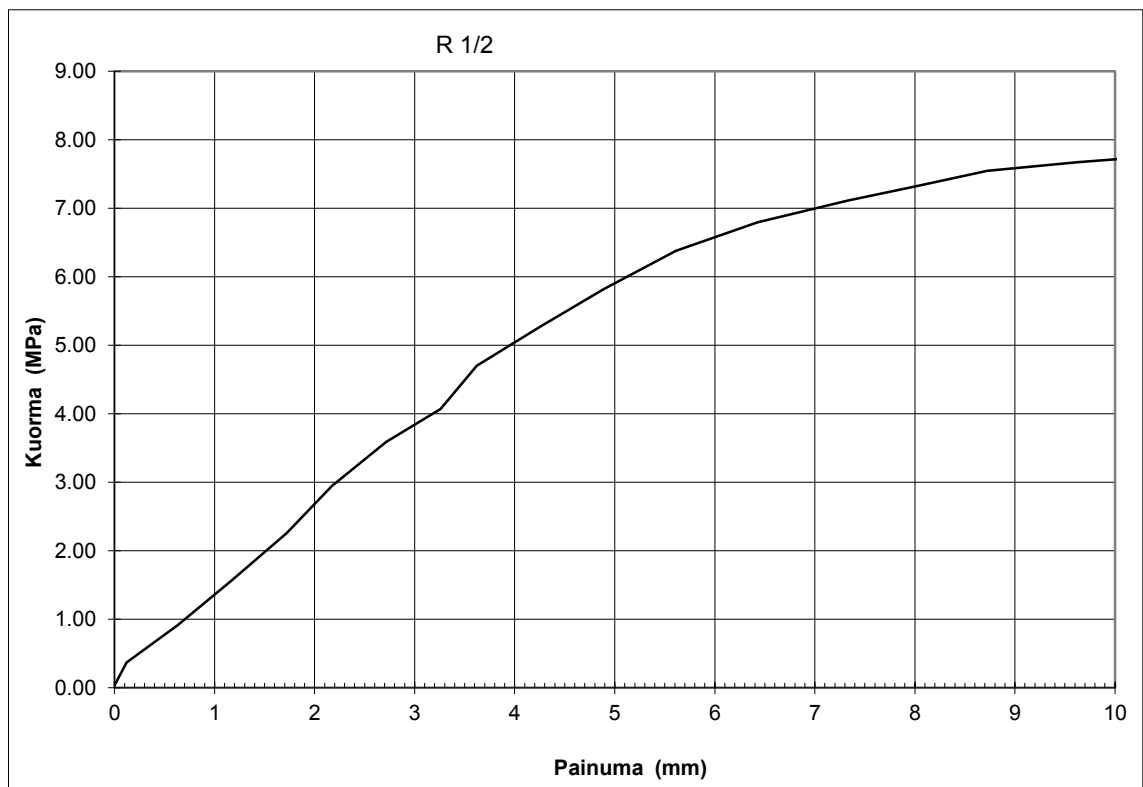
Liite 2. Käytännön osuudessa suoritettut CBR-kokeet



Kuorma_{2,5} = 8,654 MPa Kuorma₅ = 19,166 MPa

CBR_{2,5} = 126

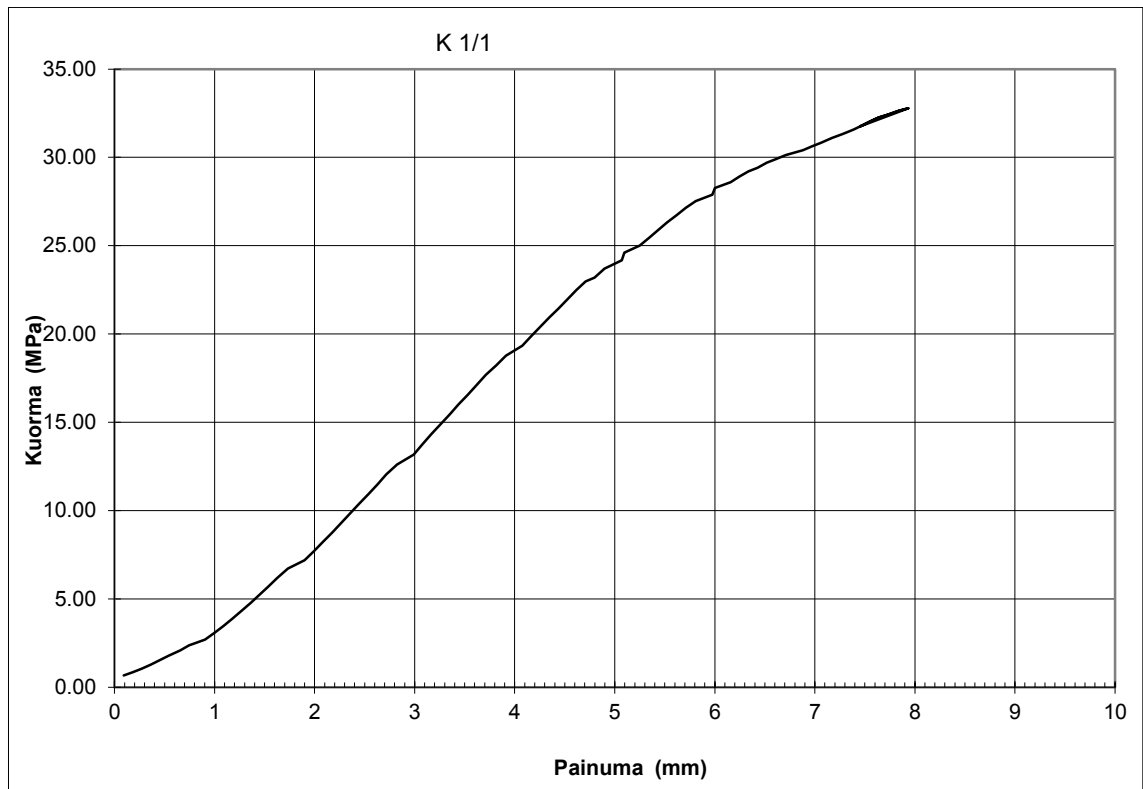
CBR₅ = 185



Kuorma_{2,5} = 3,35 MPa Kuorma₅ = 5,90 MPa

CBR_{2,5} = 47

CBR₅ = 57



Kuorma_{2.5} = 10,376 MPa Kuorma₅ = 23,703 MPa

CBR_{2.5} = 151

CBR₅ = 229