



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**MAAN LUJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN
RASIALEIKKAUSKOKEEN JA
KAIRAUSVASTUKSEN PERUSTEELLA**

Iida Kinnunen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Kandidaatintyö

Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Maan lujuuden määrittäminen rasialeikkauskokeen ja kairausvastuksen perusteella

Iida Kinnunen

Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 35 s + 2 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Markus Haikola

Kandidaatintyön tavoitteena on vertailla kahdella eri menetelmällä määritettyjä maaperän lujuusparametrejä. Työssä käytetyt menetelmät ovat kairaukset ja rasialeikkauskoe. Työssä tutkitaan silttiesiintymää. Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja kokeellisesta osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi maaperän muodostuminen, maaperän lujuusominaisuudet sekä niiden määrittäminen pohjatutkimuksilla ja laboratorioskokeilla. Kokeellisessa osuudessa Oulun seudulla sijaitsevassa tutkimuskohteessa käydään tekemässä volymetrikoe. Lisäksi otetaan maanäytteet, joille tehdään rasialeikkauskokeet Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Samassa tutkimuskohteessa on tehty vuonna 2021 kairaukset, joiden tuloksia käytetään työssä.

Rasialeikkauskoe on suora leikkauskoe, jossa maanäytettä kuormitetaan normaalijännityksellä. Kokeella voidaan määrittää Mohr-Coulomb murtokriteerin mukaiset lujuusparametrit. Murtokriteerin mukaan maan lujuus muodostuu sisäisestä kitkasta ja koheesiosta. Tarkoituksena on toistaa koe eri normaalijännityksen tasoilla, jotta voidaan piirtää murtosuora. Suoran avulla määritetään lujuusparametrit. Työssä pohjatutkimuksina käytetään kairausmenetelmiä.

Tässä tutkimuskohteessa eri menetelmillä saadut tulokset eroavat osittain toisistaan. Eroavaisuuteen on useita syitä ja epävarmuustekijöitä, joita käsitellään työssä. Tutkimus on hyvin suppea, joten menetelmien välille ei voida tehdä yleisesti pätevää johtopäätöstä.

Asiasanat: geotekniikka, rasialeikkauskoe, maan lujuusparametrit

ABSTRACT

Determination of soil strength parameters based on shear box test and sounding resistance

Iida Kinnunen

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Bachelor's thesis 2023, 35 pp. + 2 Appendixes

Supervisor(s) at the university: Markus Haikola

The aim of the bachelor's thesis was to compare soil strength parameters determined by two different methods. The used methods are soundings and shear box test. The work examines the properties of silt. The work consists of a literature review and an experimental part. The literature review examines soil formation, soil strength properties, and their determination through soil investigations and laboratory tests. In the experimental part, a rubber balloon density test is performed at the investigation site. In addition, soil samples are taken for the shear box test performed in the University of Oulu geotechnical laboratory.

The shear box test is a direct shear test. The test can determinate the strength parameters according to the Mohr-Coulomb failure criterion. According to the failure criterion, the strength parameters of soil consist of internal friction and cohesion. The purpose is to repeat the experiment at different normal stress levels that failure line could be drawn. The failure line is used to determine the strength parameters.

In this study, the results obtained with different methods partially differ from each other. There are several reasons and uncertainty factors for the difference, which are discussed in the work. The study is very limited so generally valid conclusion can not be drawn between the methods.

Keywords: geotechnics, shear box test, strength parameters of soil

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 SUOMEN MAAPERÄ | 6 |
| 2.1 Maaperän muodostuminen | 6 |
| 2.2 Maalajien luokittelu | 7 |
| 3 MAAPERÄN LUJUUSOMINAISUUDET | 10 |
| 3.1 Maan lujuuden tulkitseminen | 10 |
| 3.2 Maan jännitystila | 12 |
| 3.2 Lujuusparametrit | 13 |
| 4 LUJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN | 15 |
| 4.1 Kairausmenetelmiin perustuen | 15 |
| 4.2 Laboratoriokokeisiin perustuen | 18 |
| 5 TUTKIMUSKOHTTEEN LUJUUSPARAMETRIT | 22 |
| 5.1 Tulkinta kairausvastuksen avulla taulukkotietoon | 22 |
| 5.2 Kokeellinen osuus | 23 |
| 5.2.1 Volymetri | 23 |
| 5.2.2 Rasialeikkauskoe | 24 |
| 5.2.3 Kokeiden tulokset | 27 |
| 5.3 Koetulosten vertailu | 31 |
| 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA | 32 |

LÄHDELUETTELO

LIITTEET:

Liite 1. Eurokoodin soveltamisohje geotekninen suunnittelu NCCI 7 liitteen 6 taulukko 1

Liite 2. Rasialeikkauskokeiden diagrammit

1 JOHDANTO

Maan lujuusparametrien määrittäminen on merkittävässä roolissa kaikissa maa- ja pohjarakennushankkeissa, jotta ymmärretään maaperän käyttäytymistä. Jännitykset maaperässä, maarakenteet sekä perustukset aiheuttavat maaperään leikkausjännityksiä. Kun maan leikkausjännitys ylittää maan leikkauslujuuden, tapahtuu maan murtuminen. Maan murtuessa maarakeet liikkuvat paljon toisiinsa nähden ja tapahtuu leikkausmuodonmuutoksia. Tämä maapohjan murtuminen saa aikaan perustusten ja niiden varassa olevien rakenteiden painumista, kallistumista ja jopa sortumista. Lisäksi maan murtuminen voi aiheuttaa maakaivantojen ja maaluiskien sortumista sekä penkereiden romahtamista. Näillä tapahtumilla voi olla kohtalokkaat seuraukset taloudellisesti tai jopa ihmishengille.

Suunnitteluvaiheen geotekniset laskelmat tehdään perustus- ja pohjarakenteiden mitoittamiseksi. Laskelmissa arvioidaan rakenteiden käyttäytymistä, kestävyyttä, taloudellisuutta ja ympäristövaikutuksia. Jotta laskelmat voidaan tehdä ja mahdollinen maan murtuminen estää, täytyy tuntea maaperän lujuusparametrit. Usein suunnittelu tehdään pohjatutkimuksista saatavilla lujuustiedoilla, koska se on kustannustehokasta. Kairaustulokset saattavat olla osittain epäluotettavia, jolloin kaikkia maakerrosrajoja ei pysty erottamaan kairauksen perusteella. Tähän saadaan varmuutta laboratorikokeilla.

Tutkimuksessa keskitytään hienorakeisten maiden lujuusominaisuuksien tutkimiseen. Hienorakeisten maiden lujuusominaisuudet ovat muita maalajeja heikommat, koska maan leikkauslujuus on alhaisempi. Hienorakeisille maille on tyypillistä määrältään suuri, mutta hitaasti tapahtuva konsolidaatio, eli maaperän tiivistyminen ja lujittuminen kuormituksen vaikutuksesta.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia vastaavatko kairausvastuksilla ja rasialeikkauskokeella määritetyt lujuusparametrit toisiaan. Tutkimuskohteesta otetuille maanäytteille suoritetaan rasialeikkauskokeet. Samassa tutkimuskohteessa vastaavalla syvyydellä tehdään myös kairaukset. Kairauksiin liittyvät tulkinnat tehdään perustuen eurokoodi 7 soveltamisohjeen *geotekninen suunnittelu – NCCI 7* taulukoihin. Saaduista tuloksista tehdään omat johtopäätökset. Kandidaatintyössä vertaillaan kahdella eri menetelmällä saatuja tuloksia sekä pohditaan mahdollisiin tuloksien eroihin johtaneita syitä.

2 SUOMEN MAAPERÄ

2.1 Maaperän muodostuminen

Käsite maaperä tarkoittaa kallioperää ja vesistöjen pohjaa peittävää irtomaakerrosta. Maaperän pääosa koostuu murskautuneesta ja hienontuneesta kiviaineksesta, eli kivennäismaalajeista, kuten moreenista, sorasta, hiekasta ja savesta. Lisäksi maaperään kuuluvat eloperäisestä aineksesta muodostuvat turve ja lieju sekä maaperän sisältämä vesi. Maaperä ja sen erilaiset maalajit ovat muodostuneet eri maaperän geologisen kehityksen vaiheissa. Suomen nykyisen maaperän ja maalajien muodostumisessa on ollut suuri merkitys mannerjäätiköllä ja sen sulamisvesien toiminnalla sekä Itämeren kehityksellä jääkaudesta nykyaikaan ja sitä seuranneella maankohoamisella. (GTK, 2007, s.10–11)

Mannerjäätikön toiminnan tuloksena syntyi moreenia, joka on Suomen yleisin maalaji. Jäätikön sulamisvesien toiminta koversi erilaisia uomia sekä kerrosti soraa ja hiekkaa muodostaen harjuja ja deltoja. Mannerjäätikön painon seurauksena maankuori painui alaspäin ja jäätikön hävittyä maankuori on alkanut palautumaan aikaisempaan asentoonsa. Tämä näkyy jatkuvana maanpinnan kohoamisena erityisesti Suomen länsirannikolla. (GTK, 2007, s.10)

Hienorakeiset maalajit ovat muodostuneet jääkauden muodostamasta moreeniaineksesta, mutta vain sen hienorakeisemmista osista. Hienorakeiset maalajit voidaan jakaa muodostumisajan ja -tavan perusteella glasiaalisiin ja postglasiaalisiin muodostumiin. Glasiaaliset muodostumat ovat syntyneet jääkauden aikana ja postglasiaaliset muodostumat ovat syntyneet jään sulamisen jälkeen. (Rantamäki ym., 1979, s.41–42) Hienorakeisia kerrostumia kutsutaan syvän veden kerrostumiksi, koska ne ovat muodostuneet hienorakeisen aineksen laskeutuessa meren tai järven pohjaan. (GTK, 2007, s.30)

Glasiaaliset muodostumat ovat syntyneet, kun jäätiköltä tulleet virtaavat vedet ja aallokko kuljettivat hienorakeisen aineksen jäätikön ulkopuolelle. Hienoaines kerrostui alueille, joissa oli vettä vähintään 10–20 m:n syvyydeltä (GTK, 2007, s.29). Kun veden virtaus loppui, laskeutui aines pohjaan muodostaen perääntyvän jäätikön edustalle kerrallisia jäätikkösyntyisiä sedimenttejä. Sedimenttien muodostuminen ja rakenne selittyy

sulamisvaiheen vuodenajanvaihteluilla. (Rantamäki ym., 1979, s.41–42) Sulaminen oli voimakkaampaa kesäisin, joten karkeampi aines, siltti, kulkeutui kauemmaksi ja laskeutui pohjaan. Puolestaan talvella sulamisen pysähtyessä ja virtausten hiljetessä ehti hienompikin aines, savi, laskeutua pohjalle. Näiden kerrostumisvaihteluiden seurauksena syntyi glasiaalisavi, eli lustosavi. Lustosaven rakenteessa vuorottelevat karkeammat ja paksummat kesäkerrostumat sekä hienorakeisemmat ja ohuimmat talvikerrokset. (GTK, 2007, s.29)

Postglasiaaliset kerrostumat, eli siltit ja savet ovat muodostuneet, kun jäätikön reuna perääntyi niin etäälle, ettei sulamisvesien virtaukset enää muodostaneet kerrostumia. Postglasiaalikerrostumat ovat syntyneet usein kerrallisten savien, eli glasiaalisavien päälle. Kerrostumat ovat ominaisuuksiltaan tasalaatuista ja rakenteeltaan homogeenistä. (GTK, 2007, s.34) Savikoiden pintaosassa on yleensä 0,5...2 m paksuinen kuivakuorikerros, joka on usein sisämaassa paksumpi kuin rannikkoalueella. Kuivakuorikerroksen paksuuteen vaikuttivat mm. maanpinnan vesiuomat, ojitus, kasvipeite ja ilmastolliset tekijät. (Rantamäki ym., 1979, s.42)

Suomen savikerrokset ovat syntyneet monivaiheisesti varsinkin alueille, joissa rantavoimat ovat aiheuttaneet uudelleenkerrostumista. Savialueilla voi esiintyä rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan hyvinkin vaihtelevia kerroksia. Hienorakenteiset maalajit ovat muodostuneet virtaamattomaan veteen, joten niitä esiintyy alueilla, jotka ovat olleet meren tai järvien peittämiä. Tyypillisintä hienorakeisten maalajien esiintymisaluetta ovat rannikkoalueet. (Rantamäki ym., 1979, s.43–44)

2.2 Maalajien luokittelu

Maalajiluokitus on tapa erotella erilaisia maalajeja. Maalajiluokituksella ryhmitellään eri materiaalit ominaisuuksien perusteella siten, että niiden käyttäytyminen on pääteltävissä maalajinimen ja mahdollisen lisänimen perusteella. Suomessa rakennustekniikan käytössä on geotekninen maalajiluokitus – GEO-luokitus, jossa maalajiryhmät ovat muodostettu geologisen syntyävän, humuspitoisuuden ja lajitepitoisuuden, eli raekoostumuksen mukaan. Humuspitoisuus tarkoittaa eloperäisen aineksen pitoisuutta. (RIL, 1995, s.63–66; Suomen ympäristökeskus [SYKE], 2012, s.9)

Maalajin kivennäisaineksen raekoostumus on maaperämuodostuman käyttäytymisen kannalta tärkeä tekijä ja siihen maalajiluokitus pääasiassa perustuu. Maalajite on aine, jonka raekoon ylä- ja alaraja on määritetty. Rakeisuutta kuvataan rakeisuuskäyrällä, joka ilmaisee prosentteina raekoon suhteellisen osuuden maalajista. (Rantamäki ym., 1979, s.55; Jääskeläinen, 2009, s.20)

Maalajiryhmät ja niiden ominaisuudet ovat esitelty taulukossa 1. Taulukossa lajittuneilla maalajeilla tarkoitetaan veden huuhtelemia ja lajittelemia maalajeja, joissa on vallitsevana yksi tai kaksi päälajitetta. Lajittumattomat maalajit eivät ole huuhtoutuneet tai lajittuneet niin, että jokin lajite olisi selvästi vallitseva, vaan ne sisältävät useita eri lajitteita. (SYKE, 2012, s.9)

Taulukko 1. Geoteknisen maalajiluokituksen mukaiset maalajiryhmät. (Mukaihen SYKE)

| Maalajiryhmä | Lyhennys | Ominaisuudet |
|--------------------------------|-----------------|--|
| Eloperäiset maalajit | E | Maalaji koostuu pääasiassa eloperäisestä aineksesta ja sisältää eloperäistä ainesta > 20 % |
| Hienorakeiset maalajit | H | Hienoainespitoisuus >- 50 paino-% Humuspitoisuus <- 20 paino-% |
| Karkearakeiset maalajit | K | Hienoainespitoisuus < 50 % |
| Moreenimaalajit | M | Lajittumattomat, useita eri lajitteita sisältävät maalajit |

Useassa tilanteessa pelkkä maalajin nimi ei riitä kuvaamaan maalajia riittävästi. Tällöin lisänimen avulla pystytään kuvaamaan tarkemmin tarkasteltavan aineen koostumusta ja ominaisuuksia. Maalajille annetaan lisänimeksi silttinen (si), hiekkainen (hk) tai sorainen (sr), jos kyseistä lajitetta on yli 30 % maalajin nimen antavan lajitteen ohella. Lisänimiä voidaan antaa vain yksi, joten jos säännön mukaan lisänimiä olisi kaksi, valitaan hienorakeisempi vaihtoehto. Lisänimi savinen (sa) annetaan, jos savea on 10–30 %. Yli 30 % savipitoisuus tekee aineesta laihan saven. Jos humuspitoisuus on 2–6 %, saa maalaji lisänimen liejuinen (lj). Jos humuspitoisuus on yli 6 %, tulee päänimeksi lieju (Lj) ja

kivennäisaine muuttuu lisänimeksi. Kun humuspitoisuus on yli 20 %, on kyseessä lieju ja lisänimeä ei anneta. (Jääskeläinen, 2009, s.24–26; SYKE, 2012, s.11)

Taulukko 2. Geotekninen maalajiluokitus lajitepitoisuuden ja raekoon perusteella. (Mukaillen SYKE, 2012)

| Maalajiryhmä | Maalaji | Lyhennys | Lajitepitoisuus, paino-% | | | Raekoko d ₅₀ [mm] |
|--------------------------------|---------------|----------|--------------------------|------------|--------|------------------------------|
| | | | Savi | Hienoaines | Sora | |
| Eloperäiset maalajit | Turve | Tv | | | | |
| | Lieju | Lj | | | | |
| Hienorakeiset maalajit | Savi | Sa | ≥ 30 | | | |
| | Siltti | Si | < 30 | ≥ 50 | < 5 | ≤ 0,06 |
| Karkearakeiset maalajit | Hiekka | Hk | | < 50 | ≤ 50 | > 0,06...2 |
| | Sora | Sr | | < 5 | > 50 | > 2...60 |
| Moreenimaalajit | Silttimoreeni | SiMr | | ≥ 50 | ≥ 5 | ≤ 0,06 |
| | Hiekkamoreeni | HkMr | | 5...50 | 5...50 | > 0,06...2 |
| | Soramoreeni | SrMr | | ≥ 50 | > 50 | > 2 |

3 MAAPERÄN LUJUUSOMINAISUUDET

3.1 Maan lujuuden tulkitseminen

Maaperän lujuusominaisuuksia kuvailtaessa leikkauslujuus nousee merkittävimpiin asemaan. Maaperän jännitysten, maarakenteiden ja perustusten vuoksi maaperään syntyy leikkausjännityksiä. Leikkausjännitysten vuoksi maahan muodostuu pintoja, joita myöten maa pyrkii leikkautumaan murtuman tapahtuessa. Kun leikkausjännitykset kasvavat suuremmiksi kuin maan leikkauslujuus, tapahtuu murtuminen. (Rantamäki ym. 1979, s.122–123)

Maan leikkauslujuuteen vaikuttaa useita erilaisia tekijöitä ja sen takia maan lujuus ei ole vakio. Maan on materiaalina epähomogeeninen, epäjatkuva ja anisotrooppinen, eli sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Maa koostuu maa-ainepartikkeleista sekä huokosista. Huokokset ovat täyttyneet kokonaan tai osittain vedellä ja ilmalla. Maan käyttäytyminen riippuu eri olomuodoissa olevien komponenttien määrästä ja laadusta. Tällaisia tekijöitä ovat raekoon vaihtelu, rakeiden muoto ja rakeiden asento toisiinsa nähden. Nämä yhdessä mm. lämpötilan, ajan, kosteusvaihteluiden, huokospaineen, jännitystilan sekä kuormitustavan ja -ajan kanssa määräävät maan ominaisuudet. (RIL, 1985, s.77; Tielaitos, 1995, s.28)

Maakerroksen lujuus- ja kantavuusominaisuuksia voidaan arvostella käsitteellä maakerroksen tiiviys. Tiiviyttä voidaan ilmaista suhteellisilla suuruusluokkailmaisilla: löyhä, keskitiivis ja tiivis. Näiden lisäksi maakerroksen tiiviyttä voidaan kuvata suureilla, joille määritetään tarkat lukuarvot. Näitä suureita ovat mm. kiintotiheys, tilavuuspaino, huokosluku ja tiivysaste. Lisäksi maaperän pohjatutkimustuloksista saatavat erilaiset kairausvastustulokset kuvaavat ensisijaisesti maaperän tiiveyttä. (Rantamäki ym., 1979, s.82)

Irtotiheydellä tarkoitetaan maa-aineksen massan ja tilavuuden suhdetta

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

missä ρ on irtotiheys [kg/m^3]
 m_s on näytteen massa [kg]
 V_s on näytteen tilavuus [m^3]. (RIL, 1985, s.101)

Tilavuuspainolla γ tarkoitetaan näytteen painon suhdetta tilavuuteen

$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad (2)$$

missä γ on tilavuuspaino [kN/m^3]
 m on näytteen massa [kPa]
 g on maan vetovoiman kiihtyvyyys [$g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$]
 V on näytteen tilavuus [m^3]. (RIL, 1985, s.101)

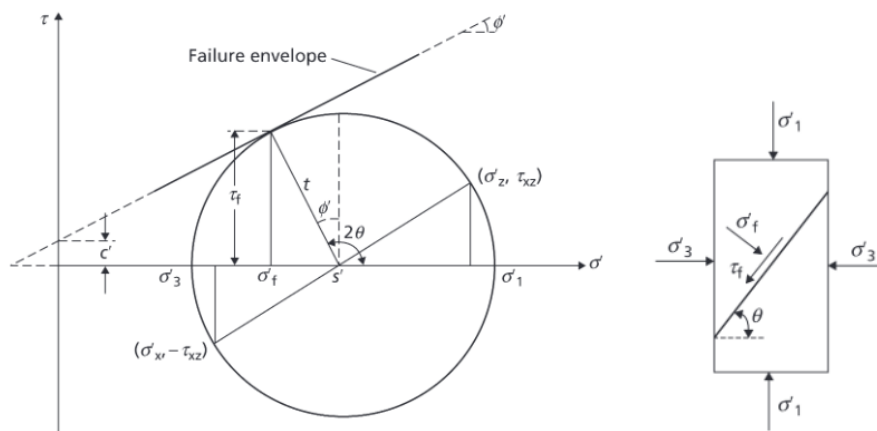
Volymetrikokeen tarkoituksena on selvittää maan tiiveys mittaamalla sen kuivatilavuuspaino ja vertaamalla saatua painoa laboratoriossa selvitettyyn maan kuivatilavuuspainon maksimiin. Volymetrikokeissa rakennekerrokseen kaivetaan kuoppa, josta otetaan talteen kaikki rakeet sekä mitataan kuopan tilavuus. Kuopan tilavuus voidaan mitata veden, hiekan tai ilman avulla. Työmaalla suoritettavassa ilmavolymetrikokeessa maasta otetaan näyte ja punnitaan sen sisältämä maa-aineksen määrä. Näytekuopasta mitataan otetun näytteen tilavuus ja näiden tietojen avulla määritetään maa-aineksen tilavuuspaino. Hiekkavolymetrissä tilavuuspaino voidaan laskea kuopasta nostetun maa-aineksen ja kuoppaan lasketun hienoaineksen määrän avulla. (Liikennevirasto, 2011, s.14–16 ja s.88–91)



Kuva 1. Ilmavolymetri.

3.2 Maan jännitystila

Maaperään aiheutuu jännityksiä yläpuolisesta maasta, rakenteista ja ulkoisista kuormista. Maan sisäisessä jännitystilän tarkastelussa kuvataan maata kuormittavan kolme toisiaan kohtisuoraa pääjännitystä: σ'_1 , σ'_2 ja σ'_3 . Näistä σ'_1 on pystysuuntainen pääjännitys ja jännityksistä suurin. Jännitykset σ'_2 ja σ'_3 ovat yhtä suuria. Suurimman pääjännityksen tason ja murtotason välisessä kulmassa θ vaikuttaa leikkausjännitys τ_f ja sen normaalijännitys σ'_f . (Rantamäki ym., 1979, s.125–133; Knappett & Craig, 2020, s. 157–163)



Kuva 2. Mohr-Coulomb teorian mukaan kuvattu maan leikkauslujuus ja jännitystila. (Knappett & Graig, 2020, s.158)

Maan kokonaisnormaalijännitys σ jakaantuu rakeiden väliseen tehokkaaseen jännitykseen σ' ja huokosvedenpaineeseen u . Tehokasta jännitystä kutsutaan myös raepaineeksi. Raepaine tarkoittaa maarakeiden välisenä puristuksena ilmenevää jännitystä. Huokosvedenpaine tarkoittaa rakeiden välisissä huokostiloissa vallitsevaa vesipainetta. Huokosvedenpaine vaikuttaa maan huokosissa kaikkiin suuntiin yhtä suurena. Jos osa kokonaispaineesta on huokosvesipainetta, vähennetään se kokonaisjännityksestä. (Jääskeläinen, 2009, s.98-99; Knappett & Graig, 2020, s.76-77)

Normaalijännityksen, tehokkaan jännityksen ja huokosvedenpaineen suhde toisiinsa

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

missä σ' on tehokas jännitys, eli raepaine [kN/m²]
 σ on normaalijännitys [kN/m²]
 u on huokosvesipaine [kN/m²]. (Jääskeläinen, 2009, s.99)

3.2 Lujuusparametrit

Maa on rakeinen materiaali, minkä vuoksi sen lujuus poikkeaa kiinteiden aineiden lujuudesta. Maan lujuutta kuvataan leikkauslujuudella. Leikkauslujuus tarkoittaa suurinta leikkausjännitystä, jonka maa kestää murtumatta. Suomessa leikkauslujuutta kuvataan yksiköllä kilopascalit [kPa].

Maan leikkauslujuutta voidaan kuvata Mohr-Coulombin murtokriteerillä

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan(\varphi') \quad (4)$$

missä τ_f on maan leikkauslujuus [kPa]
 c' on tehokas koheesio [kPa]
 σ'_n on tehokas normaalijännitys leikkauspinnalla [kPa]
 φ' on maan sisäinen kitkakulma [°].

Mohr-Coulombin murtokriteeri käsittää maan potentiaalisten murtopintojen jännitystiloja. Mohr-Coulombin mukaan maassa tapahtuu murtuma, kun maan jännitystilaa kuvaava Mohrin ympyrä ja Coulombin kaavalla määritettävä leikkauslujuuden suora kohtaavat. Kuvassa 2 on esitettyä tämä tilanne. Kriteerin mukainen kaava 4 määrittelee leikkauslujuuden kuvaajasuoran $\sigma - \tau$ -koordinaatistossa. (Rantamäki ym., 1979, s.122–125; Knappett & Graig, 2020, s.157–163)

Murtokriteerin mukaan lujuus muodostuu sisäisestä kitkasta ja koheesiosta. Maan sisäisen kitkakulman suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat maapartikkeleiden koko, muoto ja kulma toisiinsa nähden sekä maan tiiveys. Sisäinen kitka aiheutuu maarakeiden välisestä hankauksesta ja sen suuruus ilmaistaan sisäisen kitkakulman tangenttina ilmoitettavan kitkakertoimen $\tan(\varphi')$ ja partikkelien kosketuspinoilla vaikuttavan normaalijännityksen σ'_n tulona. Koheesio muodostuu maarakeiden välisistä kiiinnevoimista, huokosvesipartikkeleiden adheesiosta ja hiukkasten välisistä sähköstaattisista voimista. Koheesioon vaikuttaa eniten maan rakeisuus ja vesipitoisuus. (Rantamäki ym., 1979, s.123–124; Knappett & Graig, 2020, s.157–160)

Saveksi määritellyt rakeet ovat kooltaan alle 0,002 mm. Savihiukkaset ovat rakenteeltaan ohuita levyjä, joiden välille syntyy tartunta. Tartuntavoimien ja saven syntyvän ansiosta saven rakenteella on aina jokin leikkauslujuus, eli koheesio. Siltin raekokoalueella rakeen muoto muuttuu levymäisestä vakioläpimittaisiin rakeisiin. Siltissä esiintyy saven tapaan tartuntavoimien aiheuttamaa koheesiota, mutta siltillä on myös kitkaominaisuuksia. Siltti on lujuusominaisuuksiltaan saven ja karkearakeisten maalajien välillä. (Jääskeläinen, 2009, s.20–22)

4 LUJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

4.1 Kairausmenetelmiin perustuen

Pohjatutkimukset ovat maa- ja kallioperän tutkimuksia, joiden tavoitteena on selvittää maa- ja kallioperän rakennetta ja ominaisuuksia. Pohjatutkimuksia tarvitaan rakennushankkeiden geoteknistä suunnittelua varten, jotta pohjarakenteet voidaan suunnitella luotettavasti ja pohjarakennustyö voidaan toteuttaa turvallisesti. Erilaisten pohjatutkimusten avulla voidaan selvittää tulevan rakennuspaikan maaperän kerrosjärjestys, kerrospaksuudet sekä kerrosten ominaisuudet. Näiden lisäksi voidaan selvittää kalliopinnan asema, kallion rakenne ja pohjavesisuhteet. Ennen pohjatutkimuksien aloittamista tarkastetaan mahdolliset aikaisemmat tutkimukset sekä tehdään kohteesta havaintoihin perustuva maastokatselmus. Siinä kiinnitetään huomioita pinnanmuotoihin, kasvipeitteisiin, avokallioihin ja kivisyyteen. Havaintojen ja geologisten karttojen perusteella tehdään päätelmiä maaperästä ja sen rakenteesta. Näiden tietojen perusteella tehdään pohjatutkimusohjelma, jossa määritetään käytettävät menetelmät sekä pohjatutkimusten laajuus. (Rantamäki ym., 1979, s.257; RIL, 1985, s.127; Jääskeläinen, 2009, s.238–240)

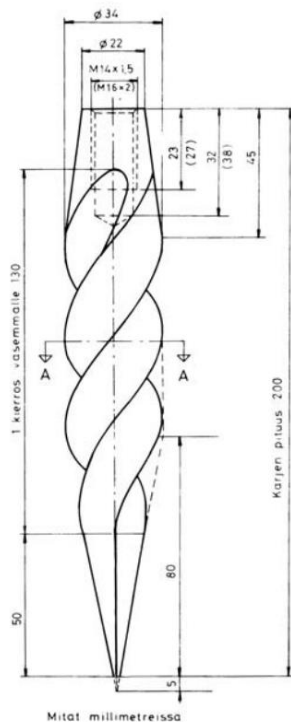
Kairaukset ovat pohjatutkimuksia, joissa maaperään tungetaan kairaustangon tai -putken avulla kairan kärkikappaletta. Kairausmenetelmät eroavat toisistaan kairojen rakenteen ja kairan maahantunkemismenetelmien osalta. Menetelmät voivat olla dynaamisia, staattisia tai näiden yhdistelmiä. Dynaamisissa menetelmissä kairaa tungetaan maahan iskemällä tai täryttämällä. Staattisissa menetelmissä kairan maahantunkeminen tapahtuu painojen tai hydraulisen puristimen avulla. Suomessa nykyään useampi kairaus tehdään telaketjuilla liikkuvilla monitoimikairoilla (Rantamäki ym., 1979, s.258; Jääskeläinen, 2009, s.244)

Pohjatutkimusten maastotutkimukset suoritetaan yleisesti luotettavaksi osoitetuilla välineillä ja menetelmillä (RIL, 1985, s.127). Menetelmiä ovat esimerkiksi erilaiset standardit, Väyläviraston oppaat ja Suomen geoteknillisen yhdistyksen (SGY) oppaat.

Tässä työssä perehdytään tarkemmin paino-, puristin-heijari- ja siipikairaukseen. Suomessa painokairaus on yleisimmin käytetty kairausmenetelmä (Jääskeläinen, 2009, s.243). Lisäksi työn tutkimuskohteessa oli tehty painokairaus. Kuitenkin viime vuosina

puristin-heijarikairaus on selkeästi yleistynyt. Verrattuna painokairaukseen, on puristin-heijarikairauksen etuna tiheämpi havainnointi, minkä vuoksi saadaan tarkempi maalajirajaus. Lisäksi heijarikairausvaiheen ansiosta saadaan arviota paalupituuksista. (SGY, 2001, s.79–80). Koska työn tavoitteena on päästä tutkimaan hienorakeista maata, on oleellista perehtyä siipikairaukseen, joka on lähtökohtaisesti hienorakeisten maalajien leikkauslujuuden määrittämiseen tarkoitettu kairausmenetelmä.

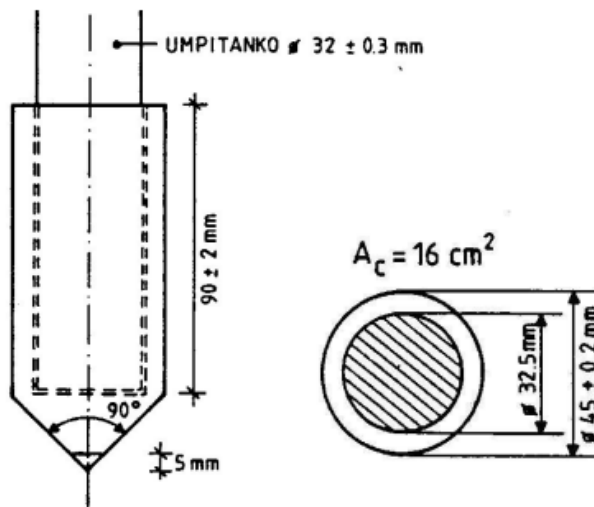
Painokairaus on kuormitustavaltaan staattinen kairausmenetelmä, jossa kaira tungetaan maahan kuormittamalla sitä erisuuruisilla painoilla sekä kierittämällä. Tarvittaessa kairaa lyödään. Kairausvastus saadaan kairan tunkeutumiseen tarvittavasta voimasta ja kierrettäessä painuman syntymiseen tarvittavien puolikierrosten lukumäärästä. Painokairausten avulla saadaan maaperätutkimuksen perusaineisto, jossa ilmenee maakerrosten arvioidut kerrosrajat ja kitkamaakerrosten suhteellinen tiiveys. Arvioitujen maakerrosten ominaisuudet täytyy selvittää näytteenotolla ja laboratoriotutkimuksella sekä muilla kairausmenetelmillä kuten siipikairauksella. (SGY, 1980, s.4–6)



Kuva 3. Painokairan kärki. (SGY, 1980, liite 2)

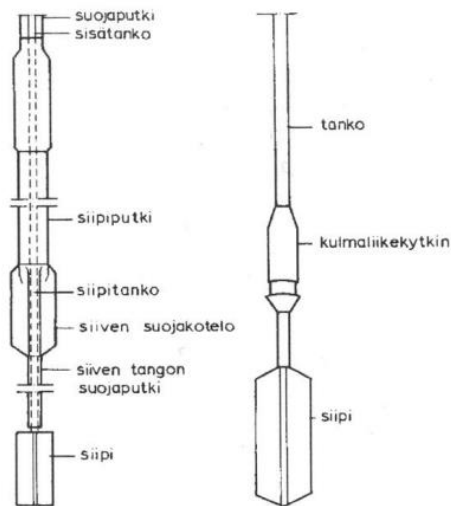
Puristin-heijarikairaus on yhdistelmä-kairaus, jossa yhdistyy mekaaninen puristinkairaus ja vapaapudotusheijarikairaus. Kairaaminen aloitetaan puristinkairauksena, jossa kairatankoja puristetaan ja pyöritetään tasaisella nopeudella samanaikaisesti, kunnes saavutetaan maksimipuristusvoima. Tämän jälkeen siirrytään heijarikairausvaiheeseen,

jossa kairatankoja pyöritetään edelleen vakionopeudella. Sen lisäksi heijaria pudotetaan vakiotaajuudella. Mikäli kesken heijarikairauksen maaperä pehmenee oleellisesti, voidaan siirtyä takaisin puristinkairaukseen. Puristin-heijarikairauksella mitataan puristusvoimaa, vääntömomenttia, lyöntien määrää ja kairaussyvyyttä. Näiden tietojen avulla saadaan tietoa kokonaiskärkivastuksesta, maalajien kerroksista sekä voidaan arvioida geoteknisiä parametreja, kuten kitkakulma ja suhteellinen tiiveys. Näitä arvioituja parametreja ei saa käyttää suunnittelun ja mitoituksen lähtöarvoina, vaan niiden tarkoitus on olla ohjeistavia ja suuntaa antavia. (SGY, 2001, s.59–61 ja s.78)



Kuva 4. Puristin-heijarikairan kärki. (SGY, 2001, s.62)

Siipikairaus, eli siipileikkauskoe on lähtökohtaisesti hienorakeisten maalajien leikkauslujuuden määrittämiseen tarkoitettu kairausmenetelmä. Kairauksessa maahan upotetaan kairatankon ja sitä ympäröivän suojaputken avulla metallinen siipi, jota kierretään maaperässä vakionopeudella. Siipi koostuu neljästä kohtisuoraan olevasta terälevystä. Siiven kärjen kiertämiseen vaadittavasta vääntömomentista saadaan määritettyä suljettu leikkauslujuus. Tällöin maan tilavuuden ja vesipitoisuuden oletetaan pysyvän muuttumattomina kokeen ajan. (SGY, 2022, s.10)



Kuva 5. Siipikairan suojaputkisto ja kulmaliikekytkin. (Jääskeläinen, 2009, s.258)

Kairausmenetelmiin on muodostettu omat taulukot, joiden avulla pystytään arvioimaan maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. Taulukoiden parametrit ja ominaisuudet pyrkivät edustamaan varovaisia arvioita, ja täten ne ovat suuntaa antavia, joten niiden käyttämisessä tulee tarpeen mukaan tehdä tarkasteluja. Tässä työssä käytetään Eurokoodin soveltamisohjetta *Geotekninen suunnittelu – NCCI 7*. Ohjeesta käytetään liitteen 6 taulukkoa 1, joka on karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella. Taulukon tiedot perustuvat rakennetuista silloista tehtyihin jälkiarviointeihin. (Väylävirasto, 2023)

4.2 Laboratoriokokeisiin perustuen

Kairausmenetelmien tueksi tehdään laboratoriokokeita, joissa pohjatutkimuksissa otetut maanäytteet tutkitaan. Näytteiden määrä, laajuus ja laatu riippuvat kohteen olosuhteista sekä suunniteltavasta rakenteesta. Laboratoriokokeissa tutkitaan näytteen rakeisuutta, vesi- ja humuspitoisuutta. Lisäksi kohteen mukaan määritetään vedenläpäisevyyttä tai lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. Näytteestä pyritään saamaan luonnonolosuhteita vastaavia tuloksia, mutta näytteenottomenetelmästä ja maaperäolosuhteista riippuen maanäytteen ominaisuudet voivat muuttua ja koostumus poiketa. Tätä kutsutaan näytteen häiriintymiseksi. (Rantamäki ym., 1979, s.280; SGY, 2023, s.1)

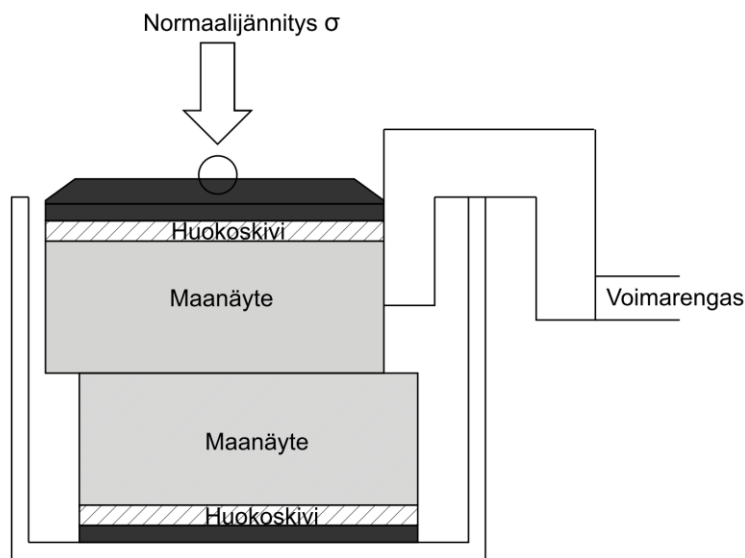
Näytteen häiriintymiselle tyypillisiä seuraamuksia ovat maanäytteen sisällä vallitsevan jännitystilän purkautuminen, maarakeiden välisten sidosten rikkoutuminen sekä maarakeiden uudelleenjärjestäytyminen. Muutosten laajuus määrää maanäytteen laatuluokan. Tarvittava laatuluokka riippuu siitä, mitä ominaisuuksia halutaan määrittää laboratorioissa. Luokat jaetaan näytteenottokategorioihin A-E. Kategorioiden A ja B näytteissä maan kerroksellisuus, rakenne ja koostumus ovat pysyneet muuttumattomia. Lisäksi kategorian A näytteessä myös vallitseva jännitystila on pysynyt muuttumattomana. Kategorian C näytteessä tulee kerroksellisuuden ja rakenteen pysyä muuttumattomana. Kategorian D maan kerroksellisuus, eli maakerrokset ovat pysyneet muuttumattomina. Kategoriassa E on sellaisia maanäytteitä, joissa kaikki luonnontilaista vastaavat ominaisuudet ovat muuttuneet. Näytteestä voidaan erottaa osittain tai kokonaan jokin lajite. (SGY, 2023, s.7–10)

Kuormitusnopeus ja vedenpoistumisolosuhteet maaperässä vaikuttavat olennaisesti maan leikkauslujuuteen. Tämä on myös huomioitava maan lujuuskokeissa. Lujuuskokeet voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: avoin koe, konsolidoimaton suljettu koe sekä konsolidoitu suljettu koe. Avoimessa kokeessa huokosveden ylipainetta ei pääse kehittymään ollenkaan, koska maan kuormitus ja leikkaus toteutetaan niin hitaasti, että maanäyte ehtii kokoonpuristua täydellisesti. Konsolidoimattomassa suljetussa kokeessa kuormitus ja leikkaus toteutetaan niin nopeasti, että näyte ei ehdi ollenkaan konsolidoitua. Konsolidoidussa suljetussa kokeessa annetaan näytteen ottaa painumansa käytetyn kuormituksen alla. Maanäytteen kuormitus työntää ajan kanssa liian veden pois rakeiden välistä. Tällöin rakeet painuvat tiukemmin toisiaan vastaan ja maa lujittuu, eli konsolidoituu. Kokeesta saatuja lujuusparametrejä nimitetään tehokkaiksi lujuusparametreiksi. (Rantamäki ym. 1979, s.133; Jääskeläinen, 2009, s.99–100)

Leikkauslujuuden määrittämiseen on useita tapoja: rasialeikkauskoe, puristuskoe, kolmiaksiaaliko, kartiokoe, siipikairaus sekä kitkakulman likimääräinen määrittely (Jääskeläinen, 2009, s.104). Tässä työssä perehdytään leikkauslujuuden määrittämiseen rasialeikkauskokeella.

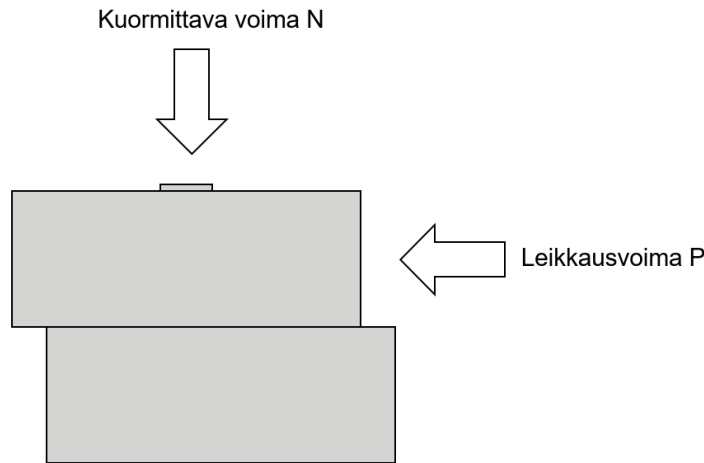
Rasialeikkauskoe, toiselta nimeltään suora leikkauskoe on laboratoriokoe, jossa maanäyte murtuu tasaista pakkopintaa pitkin. Rasialeikkauskokeen suoritusvaiheessa maanäyte, jonka poikkipinta-ala on A , suljetaan metalliseen laatikkoon, jota kutsutaan rasialeikkaimeksi. Näytteen ala- ja yläpuolelle sijoitetaan huokoslevyt sekä

huokospaperit ja leikkain lukitaan paikalleen metallisilla tapeilla tai ruuveilla. Tämän jälkeen maanäytettä kuormitetaan pystysuoralla kuormituksella N , josta pinta-alan A suhteen tulee normaalijännitys. Rasialeikkain koostuu kahdesta osasta, joten kuormituksen aikana näitä kahta osaa voidaan liikuttaa vastakkaisiin suuntiin. Leikkaussiirtymään tarvittava leikkausvoima P saadaan, kun laatikkoon kohdistettu vaakasuora voima aiheuttaa laatikon kahden puoliskon liikkumisen niin, että maanäyte pettää, eli murtuu. Tämä leikkausvoima P aiheuttaa leikkauslujuuden τ . (Rantamäki ym., 1979, s.137–138; Knappett & Craig, 2020, s.161–163).



Kuva 6. Rasialeikkauskokeen poikkileikkaus.

Kokeessa leikkaavaa voimaa P lisätään tasaisesti rasian yläosaan. Välissä oleva voimarengas kertoo leikkaavan voiman suuruuden. Voimarengas supistuu voiman kasvaessa. Supistumat on etukäteen kalibroitu osoittamaan mikä voima sen kautta vaikuttaa, eli voimarenkaan mittakellosta saadut lukemat tulee kalibroida oikeiden tulosten saamiseksi. Ylärasian siirtymää alarasian suhteen mitataan, jotta nähdään, miten leikkausjännitys ja murtotila kehittyvät muodonmuutoksiin verrattuna. (Jääskeläinen, 2009, s.106)



Kuva 7. Rasialeikkauskokeessa vallitsevat voimat.

Leikkausvoiman kasvaessa kokeen edetessä, tapahtuu näytteessä leikkaantuminen. Leikkaantumisen hetkellä vallitseva leikkausjännitys on samalla maan leikkauslujuus. Kun koe on toistettu vähintään kolmella eri normaalijännityksen arvolla, saadaan vähintään kolme havaintoparia. Näiden avulla piirretään kuvaajasuora, josta pystytään määrittämään kitkakulma ja koheesio. (Rantamäki ym. 1979, s.137; Jääskeläinen, 2009, s.107)

Normaalijännitys saadaan kuormittavan voiman ja näytteen pinta-alan suhteesta

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (5)$$

missä τ_f on maan murtoleikkausjännitys [kPa]
 A on näytteen vaakasuuntainen pinta-ala [kPa]
 N on pystysuora kuormittava voima [kPa] (Knappett & Craig, 2020, s163).

Leikkausjännitys saadaan leikkausvoiman ja näytteen pinta-alan suhteesta

$$\tau_f = \frac{P}{A} \quad (6)$$

missä τ_f on maan murtoleikkausjännitys [kPa]
 A on näytteen vaakasuuntainen pinta-ala [kPa]
 P on vaakasuuntainen leikkausvoima [kPa] (Knappett & Craig, 2020, s163).

5 TUTKIMUSKOHTTEEN LUJUUSPARAMETRIT

Työssä tutkimuskohteena oli Oulaisissa sijaitsevan vesipumppaamon alue. Alueella oli tehty pohjatutkimukset vuonna 2021. Tutkimuskohteessa käytetään korkeusjärjestelmää N2000 ja koordinaattijärjestelmää ETRS89-GK25FIN. Tavoitteena on tehdä koekuoppa mahdollisimman lähelle jo tehtyä kairausta. Tarkoituksena on päästä kaivamaan ensin noin 1,5 m syvyyteen ja sen jälkeen 3–3,5 m syvyyteen. Kohteessa on mahdollista, että vesi ja kaivannon syvyys aiheuttavat rajoitteita, ettei kokeen tekeminen onnistu enää 3 m syvyydestä. Koekuopan pohjalla tehdään volymetrikoe ja otetaan maanäytteet laboratoriokokeita varten.

5.1 Tulkinta kairausvastuksen avulla taulukkotietoon

Tässä työssä käytetään Eurokoodin soveltamisohjetta *Geotekninen suunnittelu – NCCI 7*. Ohjeesta käytetään liitteen 6 taulukkoa 1, joka on karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointiin puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella.

Kohteessa päästiin tekemään koekuoppaa lähimmäksi kairauspistettä 4, jossa oli tehty painokairaus. Kuvan 8 diagrammista nähdään, että alussa kairaus etenee kiertämällä ja puolesta välistä alkaen painolla. Tässä välissä on hetkellinen painon puolella käyminen. Loppupuolella kairaus vaihtuu takaisin kiertämiseen ja loppuu lyöntiin.

Näyte 1 on otettu reilusti pohjavedenpinnan yläpuolelta. Kairaus on painon puolella, joten taulukkoon perustuvaa luotettavaa tietoa ei ole. Koska kairaus on painon puolella, voidaan kairauksesta päätellä ainoastaan, että maaperä on löyhää. Näyte 2 on otettu pohjavedenpinnan yläpinnasta. Näytteen 2 kohdalla puolikierrosten määrä on noin 16. Tällöin NCCI 7 liitteen 6 taulukon 1 mukaan näytteen lujuusominaisuudet ovat seuraavat: kitkakulma on 28 astetta ja tilavuuspaino sijaitsee välillä 14...16 kN/m³.



Kuva 9. Ilmavolymetrin pohjalevy ja tehty kuoppa.

5.2.2 Rasialeikkauskoe

Rasialeikkauskoe suoritettiin standardia SFS-EN ISO 17892-10:2019 noudattaen. Laitteiston lisäksi kokeessa käytetään painokiekkoja ja kelloa, jolla seurataan kokeen kulkua.

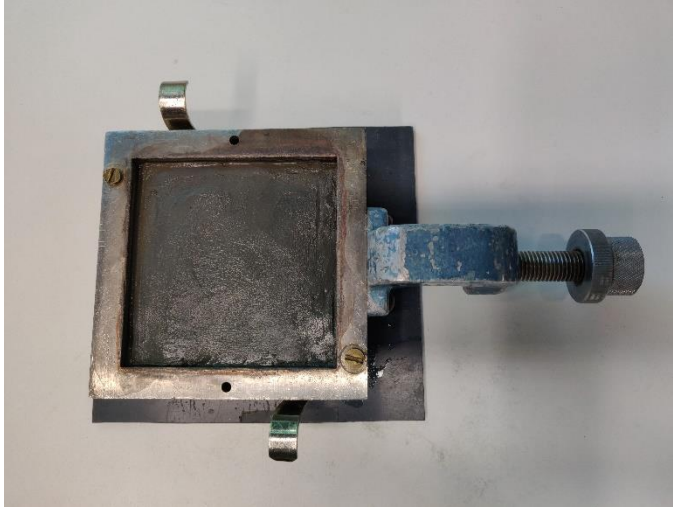


Kuva 10. Rasialeikkauskoje Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa.

Näytteen valmistelu

Rasialeikkauskojeen rasian mitat ovat 100 mm x 100 mm x 50 mm. Volymetrikokeen ja kaavojen 1 ja 2 avulla laskettiin maanäytteiden tiiveydet. Tavoitteena on asettaa ja

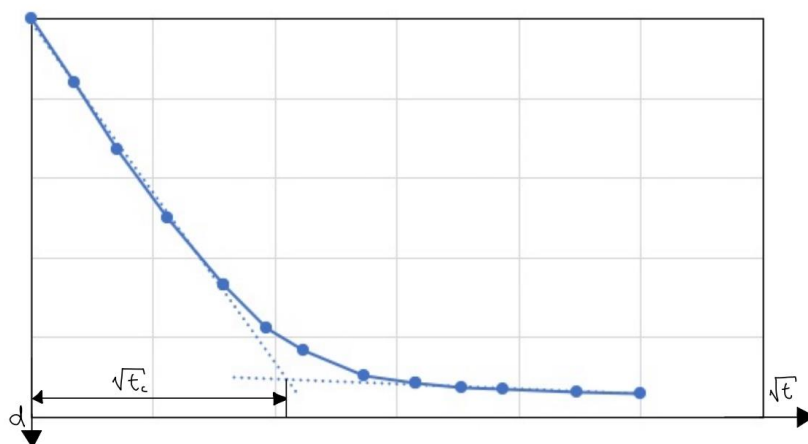
tiivistää näyte samaan tiiviyteen huokos kivien väliin kolmessa kerroksessa. Näytteestä mitattiin korkeus ja massa ennen koetta.



Kuva 11. Rasialeikkauskokeen näyte rasiassa.

Konsolidaation huomioiminen

Standardin mukaan näytteessä tulee huomioida konsolidaatio ennen varsinaista kokeen suorittamista. Hyvin kokoonpuristuvia maita kuormittaessa, voidaan pystyjännitystä kasvattaa portaittain. Tällä estetään näytteen purskahtaminen pois rasiasta. Kuorman lisäämisen jälkeen seurataan näytteen kokoonpuristumista ajan suhteen niin kauan, että konsolidaatio vaikuttaa päättyneen. Tämä voidaan todeta kuvaajan perusteella, jossa kokoonpuristuma on pysty akselilla ja ajan neliöjuuri on vaaka-akselilla. Konsolidaatio on päättynyt, kun kuvaaja kääntyy selvästi alkuosaa loivemmaksi.



Kuva 12. Kokoonpuristuman eteneminen ajan neliöjuuren suhteen. (Mukaiillen SFS-EN ISO 17892-10:2019)

Kuvaajasta saadaan määritettyä konsolidaatioon kuluva aika, joka on kuvaajan alku- ja loppuosille sovitettujen suorien leikkauspiste $\sqrt{t_c}$. Tämän jälkeen määritetään kokeeseen sopiva leikkausnopeus. Näytteen murtorajatila saadaan saavuttaa nopeimmillaan ajassa, joka on 13 kertainen konsolidaatioaikaan nähden. Murtotilan siirtymä arvioidaan hienorakeisilla mailla olevan noin 2 % sivun mitasta. Tässä tapauksessa 100 mm rasiolla siirtymä on 2 mm.

Suurin sallittu leikkausnopeus saadaan jakamalla siirtymä konsolidaatioajalla

$$v_{max} = \frac{s_f}{t_f} = \frac{s_f}{13t_c} \quad (7)$$

missä v_{max} on suurin sallittu leikkausnopeus [mm/min]
 s_f on näytteen siirtymä [mm]
 t_c on sovitettujen suorien leikkauspiste [min]
 t_f on näytteen murtorajatilan aika [min]. (SFS-EN ISO 17892-10:2019)

Kokeen suorittaminen

Kokeessa käytettävä mittakello tarkistettiin ja nollattiin tulosten todenmukaisuuden takaamiseksi. Rasialeikkain asetettiin rasialeikkauskojeeseen, jonka jälkeen asetettiin ennalta määritelty painokuorma. Kuormituskoetehtiin yhtäjaksoisesti vakionopeudella noudattaen standardin asettamia vaatimuksia. Koetta toistettiin, kunnes havaittiin selkeä hidastuminen tai pysähtyminen mittakellon lukemassa. Mittakellon lukeman hidastuminen tai pysähtyminen indikoi murron tapahtumista.

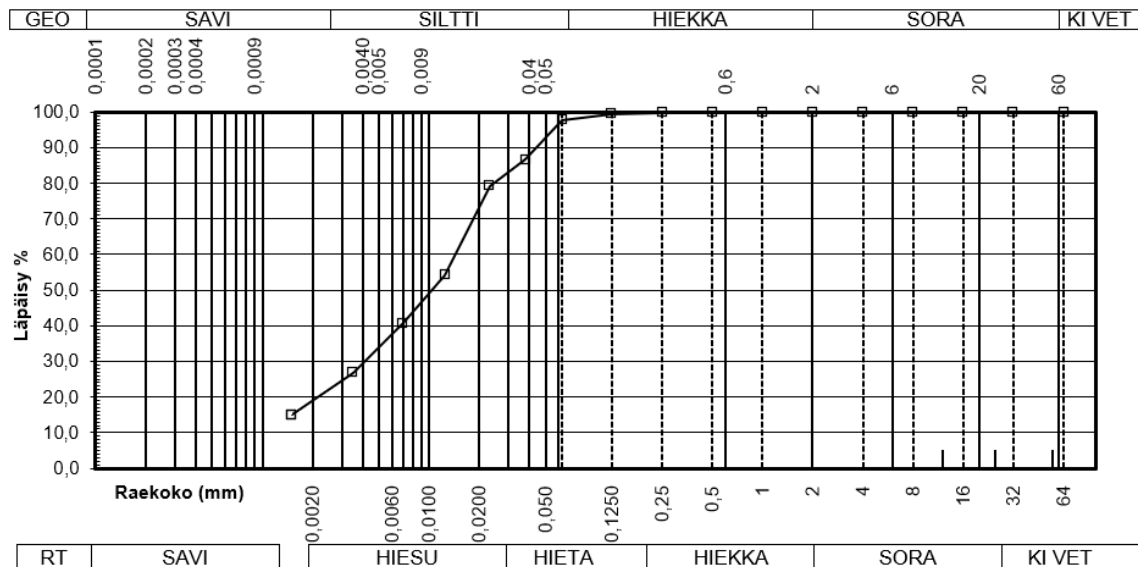
Kokeen jälkeen

Kokeen jälkeen painot purettiin pois. Näytteestä mitattiin korkeus ja massa kokeen jälkeen. Koenäyterasia purettiin varovasti ottaen näyte erilliseen astiaan. Näyte laitettiin uuniin, jotta saadaan vesipitoisuus kokeen jälkeen.

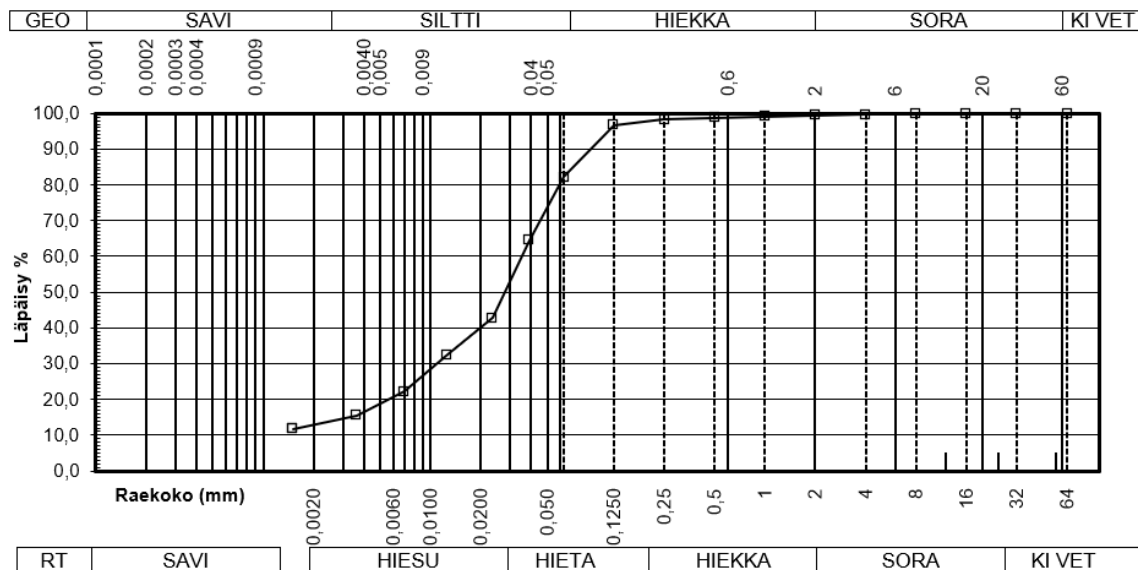
5.2.3 Kokeiden tulokset

Maanäytteet

Maanäytteille tehtiin rakeisuuden määrittäminen seulonnalla ja areometrikokeella. Lisäksi tehtiin vesipitoisuuden määrittäminen ja humuspitoisuuden määrittäminen humuspolttomenetelmällä. Ensimmäinen näyte oli maalajiltaan liejuinen siltti (ljSi) ja vesipitoisuus w oli 70,6 %. Toinen näyte oli maalajiltaan savinen siltti (saSi) ja vesipitoisuus w oli 32,3 %.



Kuva 13. Maanäytteen 1 rakeisuuskäyrä. Maalajina on liejuinen siltti.



Kuva 14. Maanäytteen 2 rakeisuuskäyrä. Maalajina on savinen siltti.

Ilmavolymetri

Taulukossa 3 on koottuna ilmavolymetrin mittaustulokset. Näytteen 2 kuopan kohdalla viimeinen mittaus epäonnistui, koska laitteeseen ei saatu riittävää 0,2 bar painetta. Näytteiden tilavuudet saadaan vähentämällä kuopan tilavuudesta lähtötilanteen tilavuus.

Taulukko 3. Ilmavolymetrin mittaustulokset.

| Mittaus | Näyte 1 lähtötilanne | Näyte 1 kuoppa | Näyte 2 lähtötilanne | Näyte 2 kuoppa |
|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| 1. | 1860 | 2720 | 1990 | 2895 |
| 2. | 1880 | 2785 | 1990 | 2960 |
| 3. | 1880 | 2840 | 2010 | 2960 |
| 4. | 1900 | 2865 | 1990 | 2970 |
| 5. | 1870 | 2870 | 2010 | - |
| Keskiarvo: | 1878 | 2816 | 1998 | 2946 |

Volymetrimittauksien sekä kaavojen 1 ja 2 avulla määritetään näytteiden 1 ja 2 kuoppien tiheys ja tilavuuspaino.

Taulukko 4. Ilmavolymetrin avulla määritetyt parametrit.

| Ilmavolymetri | Näyte 1 | Näyte 2 |
|------------------------------------|---------|---------|
| Tilavuus [cm ³] | 938 | 948 |
| Massa [g] | 1153,8 | 1489,0 |
| Tiheys [kg/m ³] | 1230,06 | 1570,67 |
| Tilavuuspaino [kN/m ³] | 12,06 | 15,41 |

Hiekkavolymetri

Kuoppaan 1 menneen hiekan avulla kuopan tilavuudeksi saatiin: 820 cm³. Puolestaan kuoppaan 2 menneen hiekan avulla kuopan tilavuudeksi saatiin 935 cm³.

Taulukko 5. Hiekkavolymetrin avulla määritetyt parametrit.

| Hiekkavolymetri | Näyte 1 | Näyte 2 |
|------------------------------------|---------|---------|
| Tilavuus [cm ³] | 820 | 935 |
| Massa [g] | 1153,8 | 1489,0 |
| Tiheys [kg/m ³] | 1407,07 | 1592,51 |
| Tilavuuspaino [kN/m ³] | 13,80 | 15,62 |

Rasialeikkauskoe

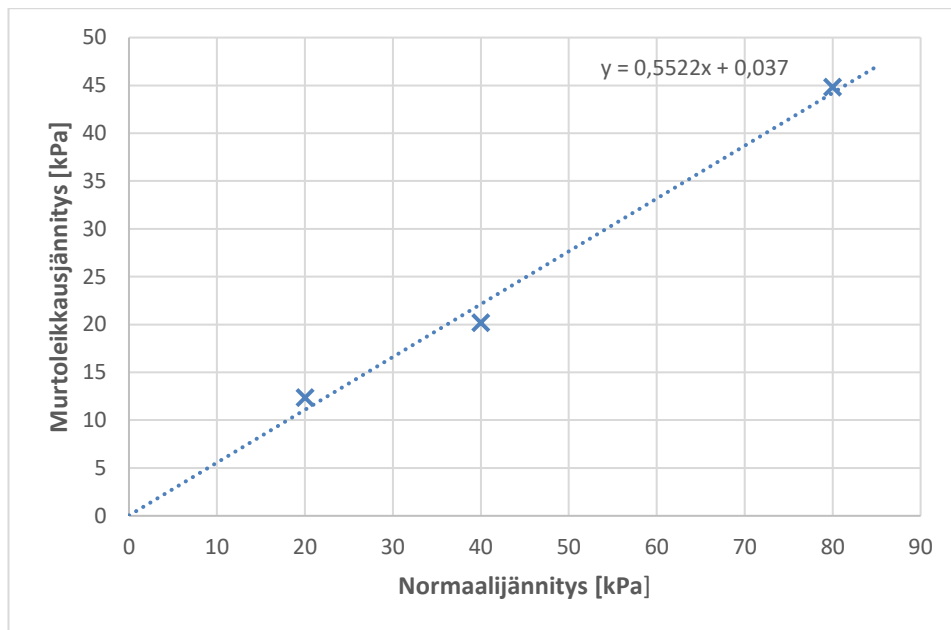
Rasialeikkauskoe toistettiin normaalijännityksen arvoilla 20, 40 ja 80 kPa. Jokaisen yksittäisen rasialeikkauskokeen kuvaajat löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 6. Rasialeikkauskokeiden näytteiden konsolidaatioaika, tilavuuspaino ja vesipitoisuus kokeen jälkeen.

| Rasialeikkauskoe | Näyte 1 20 kPa | Näyte 1 40 kPa | Näyte 1 80 kPa | Näyte 2 20 kPa | Näyte 2 40 kPa | Näyte 2 80 kPa |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Konsolidaatioaika [min] | 485 | 395 | 215 | 38 | 25 | 21 |
| Tilavuuspaino [kN/m ³] | 13,9 | 14,3 | 14,1 | 16,0 | 16,3 | 15,9 |
| Kokeen jälkeinen vesipitoisuus [%] | 14,84 | 15,60 | 15,23 | 18,76 | 18,96 | 19,12 |

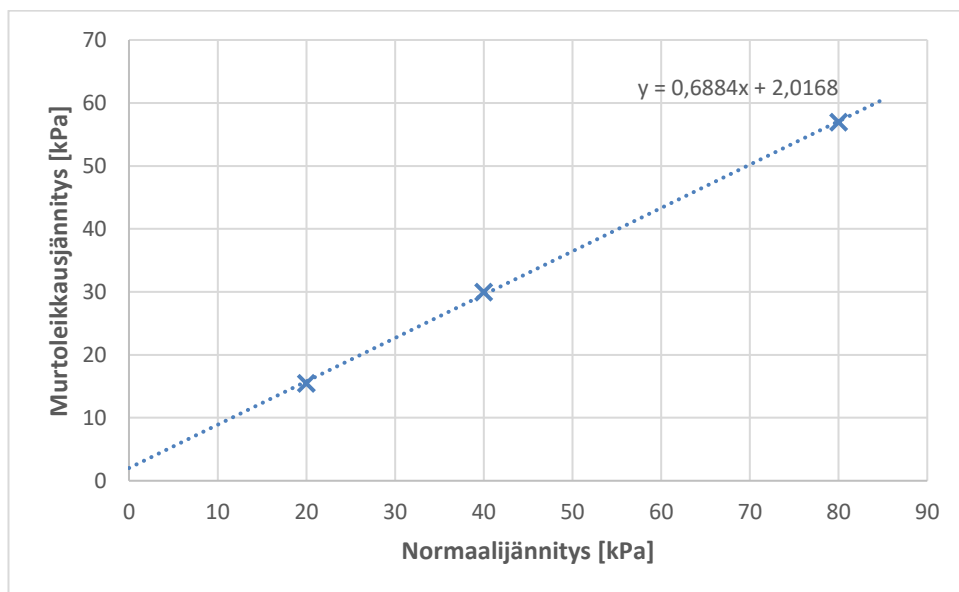
Tavoitteena oli tiivistää kokeessa käytettävät näytteet samaan tiiviyteen, mitä volymetrikokeissa luonnonmukaisessa tilassa oli saatu. Tällöin näytteellä 1 tuli saavuttaa tilavuuspainoksi 13,8 kN/m³ ja näytteellä 2 vastaavasti 15,6 kN/m³. Taulukosta 6 nähdään, että kokeissa olleiden näytteiden tilavuuspaino oli hieman suurempi, mitä tavoiteltu. Kaavan 7 avulla näytteen yksi leikkausnopeudeksi saatiin 0,0604 mm/min. Puolestaan näytteen kaksi leikkausnopeudeksi saatiin 0,3019 mm/min.

Kaavojen 5 ja 6 avulla määritetään normaalijännitys ja leikkausjännitys. Kolmella eri normaalijännityksen suuruudella saaduista havaintopareista piirretään Mohr-Coulombin murtokriteerin mukainen kuvaajasuora. Seuraavissa kuvissa on näytteiden 1 ja 2 lineaarinen kuvaajasuora.



Kuva 15. Näytteen 1 rasialeikkauskokeen tuloksen mukainen leikkauslujuuden kuvaajasuora.

Kuvan 15 kuvaajasta saadaan kaavan 4 avulla näytteen 1 koheesioksi $c' = 0,037$ ja kitkakulmaksi 25,22 astetta.



Kuva 16. Näytteen 2 rasialeikkauskokeen tuloksen mukainen leikkauslujuuden kuvaajasuora.

Kuvan 16 kuvaajasta saadaan kaavan 4 avulla näytteen 2 koheesioksi $c' = 2,0168$ ja kitkakulmaksi 34,54 astetta.

5.3 Koetulosten vertailu

Taulukko 7. Näytteiden 1 ja 2 kitkakulmat ja tilavuuspainot määritettynä kairausvastuksiin perustuvan taulukkotiedon ja laboratoriokokeiden avulla. (*) Ei taulukkotietoon perustuvaa luotettavaa tietoa.

| | Näyte 1 taulukko | Näyte 1 laboratorio | Näyte 2 taulukko | Näyte 2 laboratorio |
|---|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Kitkakulma [aste] | (*) | 25,22 | 28 | 34,54 |
| Tilavuuspaino [kN/m³] | (*) | 12,06 ja 13,80 | 14–16 | 15,41 ja 15,62 |

Taulukosta 7 nähdään, että näytteessä 1 ei ole luotettavaa vertailtavaa tietoa. Tämä johtuu siitä, että näytteen kohdalla kairaus oli painon puolella. Tilavuuspaino on ollut ilmavolyometrillä 12,06 ja hiekkavolyometrillä 13,80. Arvoissa on selkeä ero.

Taulukon 7 mukaan näytteessä 2 sekä ilma- että hiekkavolyometrillä saadut tilavuuspainot ovat hyvin lähellä toisiaan. Molemmat tilavuuspainot vastaavat taulukosta saatua tilavuuspainoa. Näytteessä 2 taulukon mukainen kitkakulma on 28 astetta. Puolestaan rasialeikkauskokeen perusteella kitkakulma on yli 6 astetta isompi sen ollessa 34,54 astetta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Näytteestä 1 volymetrimittauksesta saaduissa tuloksissa on selkeä ero, joka voi johtua mahdollisesta mittavirheestä. Puolestaan näytteestä 2 saadut tilavuuspainot ovat melkein samat, eli molemmilla menetelmillä saadut tulokset vastaavat toisiaan. Rasialeikkauskokeissa käytettyjen näytteiden tilavuuspainot olivat hieman suuremmat verrattuna volymetrikokeista saatuihin tilavuuspainoihin. Ero ei kuitenkaan ole merkittävä tulosten kannalta.

Suurin ero, joka ilmenee tutkimuksessa, on näytteen 2 kitkakulman arvo eri menetelmillä. Mahdollinen syy näytteen 2 suurelle erolle kitkakulmassa on varmuustekijät. Suunnitteluohjeen taulukoiden parametreissa on valmiiksi varmuutta mukana, koska annetut arvot ovat arvioita ja täten suuntaa antavia. Tämän perusteella voidaan todeta, että rasialeikkauskokeen mukainen kitkakulma vastaa paremmin todellista luonnonmukaista maaperää verrattuna taulukossa annettuun arvoon.

Tutkimuksessa maanäytteidenotto tapahtui kolmen metrin päästä verrattavasta kairauspisteestä. Koska maaperä on epähomogeeninen, vaihtelevat kerrosrajat. Tämän vuoksi kerrosrajat eivät välttämättä ole täysin samat maanäytteiden ja kairauksen kohdissa. Tämä aiheuttaa lisää epävarmuustekijöitä ja hankaloittaa tulosten tulkintaa. Tutkittavan painokairauspisteen kairausdiagrammi vaihteli painon ja kierron puolella. Näytteenotto tapahtui maakerrosten rajapintojen tuntumassa. Täten olisi ollut kuvaavampaa saada näytteet kohdasta, jossa kairausvastus olisi ollut vakio. Lisäksi toinen näyte saatiin juuri pohjaveden yläpinnan tuntumasta. Jotta olisi voitu tarkemmin vertailla NCCI 7 liitteen 6 taulukon 1 pohjavedenpinnan alapuolisiin tilavuuspainon arvoihin, olisi näyte pitänyt ottaa syvemmmältä.

Yleensä maaperän vesipitoisuus kasvaa alaspäin mennessä, mutta tässä kohteessa ylemmässä näytteessä oli huomattavasti suurempi vesipitoisuus. Tämä todennäköisesti johtuu korkeasta humuspitoisuudesta, koska humus lisää maalajin luonnollista vesipitoisuutta. Tällöin myös maalajin leikkauslujuus ja vedenläpäisevyys alenee ja kokoonpuristuvuus lisääntyy. Toinen mahdollinen selitys näytteen 1 korkealle vesipitoisuudelle voisi olla orsivesiesiintymä näytteenoton kohdalla. Orsivesi tarkoittaa hienorakeisten, huonosti vettä läpäisemättömien maakerrosten päälle jäänyttä vesikerrosta. Tällainen orsivesiesiintymä nostaa paikallisesti maaperän vesipitoisuutta. Näytteen 1 rasialeikkauskokeiden konsolidaatioaika oli neljästä kahdeksaan tuntia.

Puolestaan näytteen 2 konsolidaatioaika oli vain noin 30 minuuttia. Tässä ilmenee suuri ero, joka selittyy vesipitoisuuksien erolla.

Tässä tutkimuskohteessa rasialeikkauskokeen ja kairausvastuksen perusteella saadut tulokset eroavat osittain toisistaan. Osan eroavaisuudesta voivat selittää kokeiden suorittamiseen liittyvät epävarmuustekijät. Jotta olisi saatu varmempia tuloksia, olisi pitänyt tutkimuskohteesta ottaa näytteet useammasta pisteestä. Kuitenkin johtopäätökseksi tässä tutkimuskohteessa voidaan todeta, että laboratoriokokeiden perusteella maan lujuus on suurempi verrattuna kairausvastuksella saatavaan tulokseen. Tutkimus on hyvin suppea, joten sen perusteella ei voida tehdä yleistä johtopäätöstä käytettyjen menetelmien välille.

LÄHDELUETTELO

Geologian tutkimuskeskus, 2007. *Maaperän käyttöopas* [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/gtk_maaperakartan_kayttoopas.pdf [viitattu 20.2.23].

Jääskeläinen, R., 2009. *Geotekniikan perusteet*. Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy. ISBN 978-952-5491-50-0

Knappet, J. & Craig, R., 2020. *Craig's soil mechanics*. Ninth edition. CRC Press Taylor & Francis Group

Liikennevirasto, 2011. *Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/39980767.pdf> [viitattu 17.2.23].

Rantala, J., 1995. *Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. Tielaitoksen selvityksiä 45/1995* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/146442/rhk189.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 3.6.2023].

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M., 1979. *Geotekniikka*. 18. muuttumaton painos. Oy Yliopistokustannus / Otatieto. ISBN 951-672-257-1

SFS-EN ISO 17892-10:2019 *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 10: Direct shear tests*. Suomen standardisoimisliitto SFS: 29 s.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y, 1980. *Kairausopas I: Painokairaus, Tärykairaus, Heijarikairaus* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-1-painokairaus-taerykairaus-heijarikairaus.pdf> [viitattu 6.2.23].

Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y, 2001. *Kairausopas V: CPTU/Puristinkairaus Puristin-heijarikairaus* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-6-cptu-puristinkairaus-puristin-heijarikairaus.pdf> [viitattu 8.2.23].

Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y, 2022. *Kairausopas II: Siipileikkauskoe* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2022/12/kairausopas-2-siipileikkauskoe-2022-12-07.pdf> [viitattu 8.2.23].

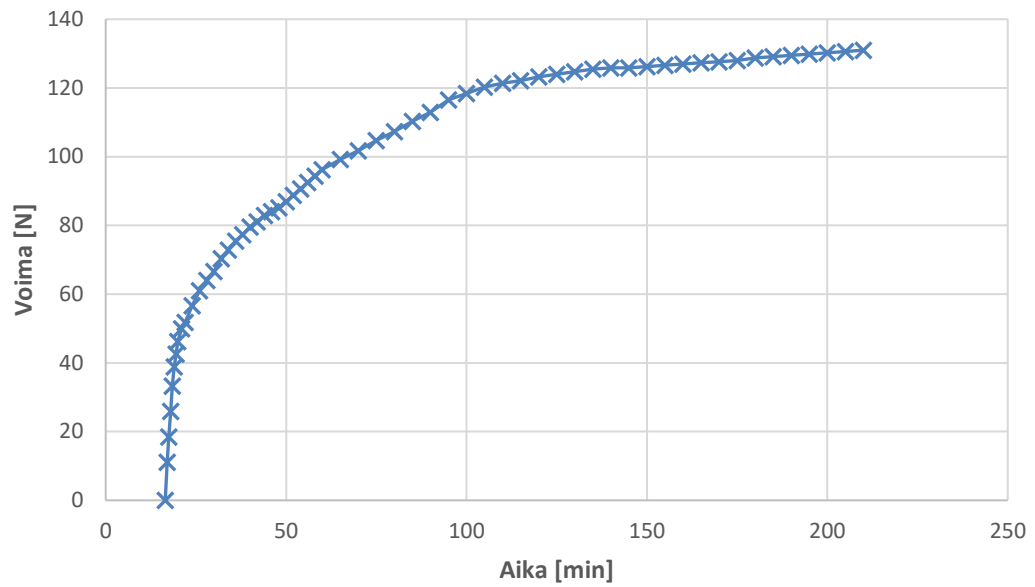
Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y, 2023. *Kairausopas III: Näytteenotto geoteknisiä tutkimuksia varten* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2023/06/kairausopas-iii-naytteenotto-geoteknisia-tutkimuksia-varten-2023-06-05.pdf> [viitattu 12.6.2023].

Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 1985. *RIL-157-1 Geomekaniikka I*. ISBN 951-758-086-X

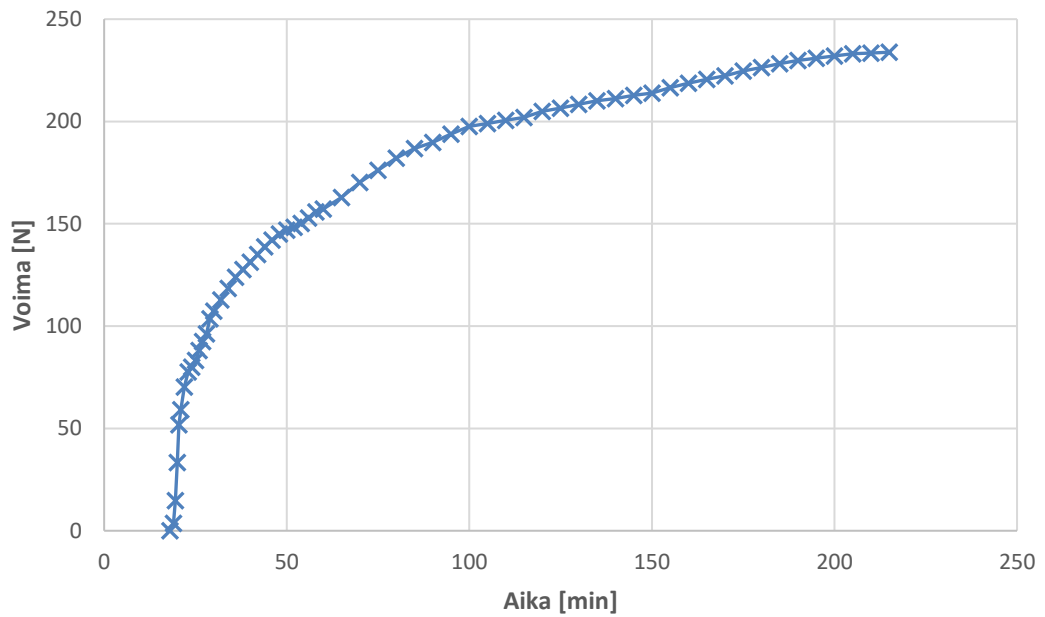
Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 1995. *RIL 156 Maarakennus*. ISBN 951-758-343-5

Suomen ympäristökeskus, 2012. *Suomen maalajien ominaisuuksia* [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/14927376.pdf> [viitattu 3.6.2023].

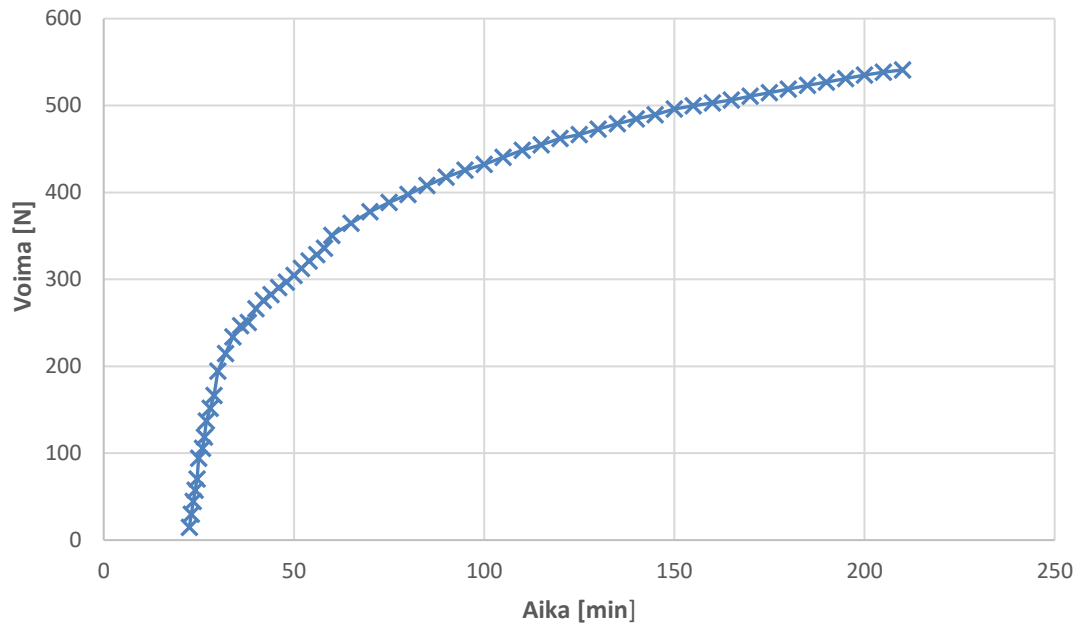
Väylävirasto, 2023. Eurokoodin soveltamisohje *Geotekninen suunnittelu – NCCI 7* [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-14_NCCI_7_web.pdf [viitattu 30.5.2023].



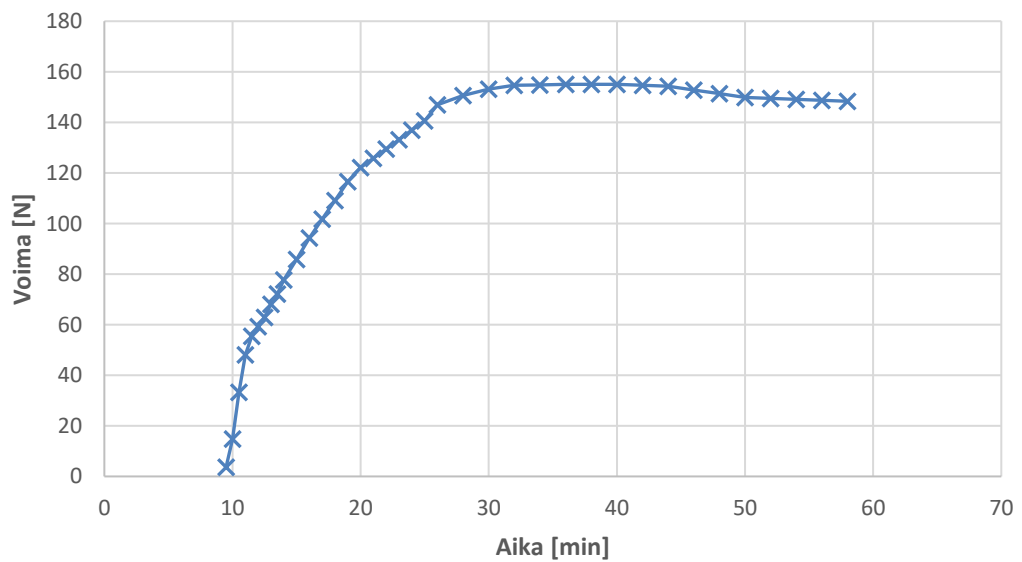
Kuva 17. Näytteen 1 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 20 kPa kuormituksella.



Kuva 18. Näytteen 1 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 40 kPa kuormituksella.

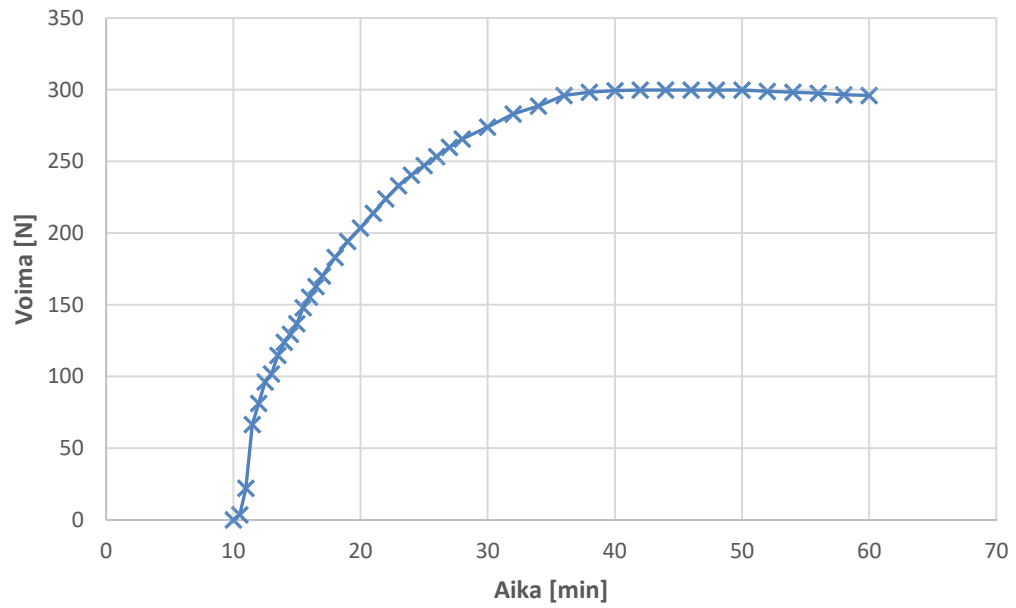


Kuva 19. Näytteen 1 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 80 kPa kuormituksella.

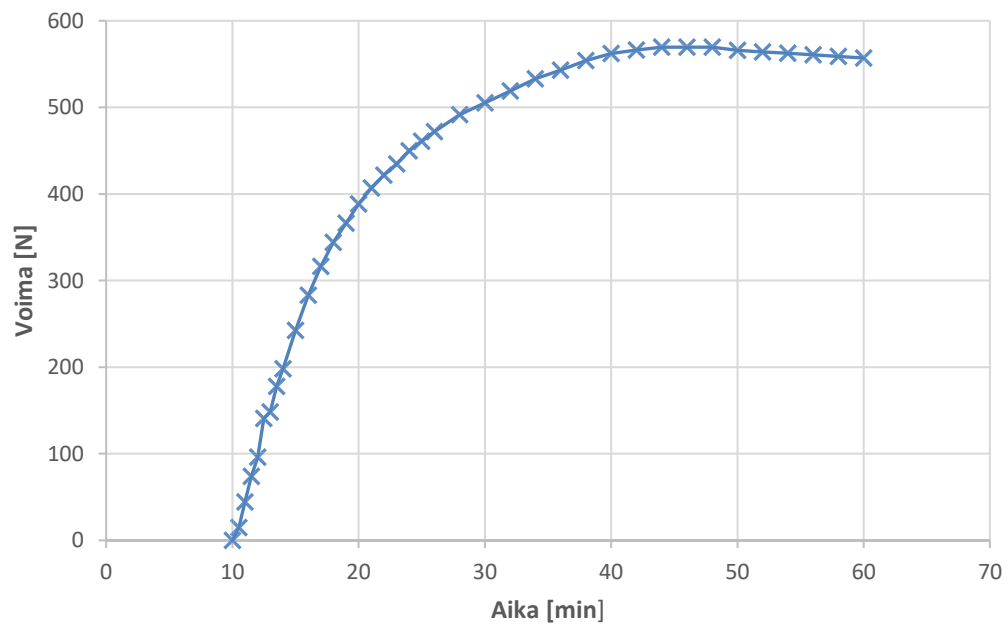


Kuva 20. Näytteen 2 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 20 kPa kuormituksella.

1(3/3)



Kuva 21. Näytteen 2 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 40 kPa kuormituksella.



Kuva 22. Näytteen 2 rasialeikkauskokeen tuloksen kuvaaja 80 kPa kuormituksella.

Liite 2. Eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnitteluohje - NCCI 7* liitteen 6 taulukko 1.

Taulukko 8. Kuvastaa karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointia puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella.

| Maalaji | | Tilavuuspaino (kN/m ³) pohjavedenpinnan | | Kitkakulma (°) | Janbun yhtälön muodonmuutosparametri | | Kairausvastus | | |
|------------------------------|-------------|---|-------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | Yläpuolella | Alapuolella | | Moduulilukum | Jännitys-eksponentti β | Puristin-kairaus q_c (MPa) | Paino-kairaus $P_k/0,2$ m | Heijarikairaus $L/0,2$ m |
| Karkea siltti | Löyhä | 14 ... 16 | 9 ... | 28 | 30 ... 100 | 0,3 | < 7 | < 40 | < 8 |
| | Keskitiivis | | | 30 | 70 ... 150 | 0,3 | 7 ... 15 | 40 ... 100 | 8 ... 25 |
| | Tiivis | 16 ... 18 | 11 | 32 | 100 ... 300 | 0,3 | > 15 | > 100 | > 25 |
| Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$ | Löyhä | 15 ... 17 | 9 ... | 30 | 50 ... 150 | 0,5 | < 10 | 20 ... 50 | 5 ... 15 |
| | Keskitiivis | | | 33 | 100 ... 200 | 0,5 | 10 ... 20 | 50 ... 100 | 15 ... 30 |
| | Tiivis | 16 ... 18 | 11 | 36 | 150 ... 300 | 0,5 | > 20 | > 100 | > 30 |
| Hiekka $d_{10} > 0,06$ | Löyhä | 16 ... 18 | 10 ... | 32 | 150 ... 300 | 0,5 | < 6 | 10 ... 30 | 5 ... 12 |
| | Keskitiivis | | | 35 | 200 ... 400 | 0,5 | 6 ... 14 | 30 ... 60 | 12 ... 25 |
| | Tiivis | 18 ... 20 | 12 | 38 | 300 ... 600 | 0,5 | > 14 | > 60 | > 25 |