



Väylävirasto
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu
61/2021

Radan eristys- ja välikerroksen luonnonmateriaalin rakeisuuden vaikutus kantavuuteen



Eero Ruhanen, Heikki Luomala

**Radan eristys- ja välikerroksen
luonnonmateriaalin rakeisuuden
vaikutus kantavuuteen**

Väyläviraston julkaisuja 61/2021

Kannen kuva: Heikki Luomala

Verkkajulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-908-0

Väylävirasto
PL 33
00521 HELSINKI
puh. 0295 343 000

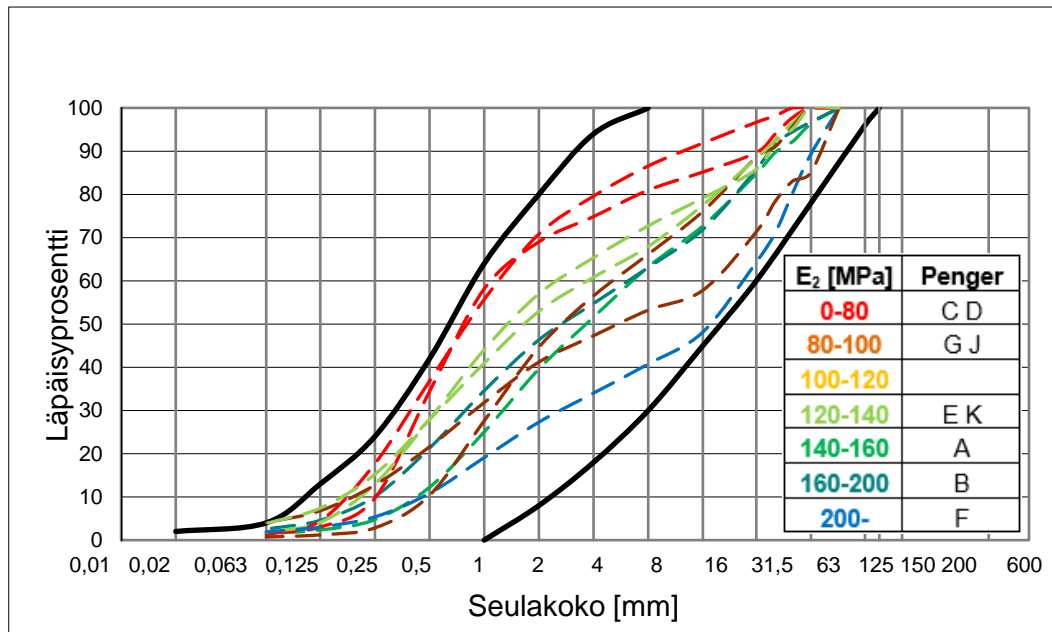
Eero Ruhanen, Heikki Luomala: Radan eristys- ja välikerroksen luonnonmateriaalin rakeisuuden vaikutus kantavuuteen. Väylävirasto Helsinki 2021. Väyläviraston julkaisuja 61/2021. 128 sivua. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-908-0.

Avainsanat: Kantavuus, luonnonmateriaalit, eristyskerros

Tiivistelmä

InfraRYL määrittelee radan eristys- ja välikerroksessa käytettävän luonnonmateriaalin rakeisuusvaatimukset sekä rakenteen kantavuus- ja tiiviysvaatimukset. Käytännön radanrakentamisessa vaaditun kantavuuden (E_2) ja tiiviyssuhteen (E_2/E_1) saavuttaminen joillakin rakeisuudeltaan vaatimusten mukaisella materiaalilla ei ole aina ollut mahdollista. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten luonnonmateriaalin rakeisuus vaikuttaa rakenteesta mitattuun kantavuuteen ja tehdä havaintojen perusteella ehdotus tarvittavista päivityksistä InfraRYLiin.

Tutkimuksen mukaan rakeisuudeltaan lähellä ohjealueen hienorakeisempaa reunaan olevat materiaalit eivät useinkaan täytä nykyistä kantavuusvaatimusta. Kantavuusvaatimus voi olla hankalaa saavuttaa myös materiaaleilla, joiden rakeisuusjakauma on epäjatkua eli rakeisuuskäyrässä on ns. hiekkapatti. Nykyiset kantavuusvaatimukset voidaan saavuttaa rakeisuudeltaan nykyisen ohjealueen karkeampaan reunaan sijoittuvilla materiaaleilla (kuva 1).



Kuva 1: Koepenkeristä levykuormituskokeella mitatut kantavuudet rakeisuusjakauman mukaan esitettynä.

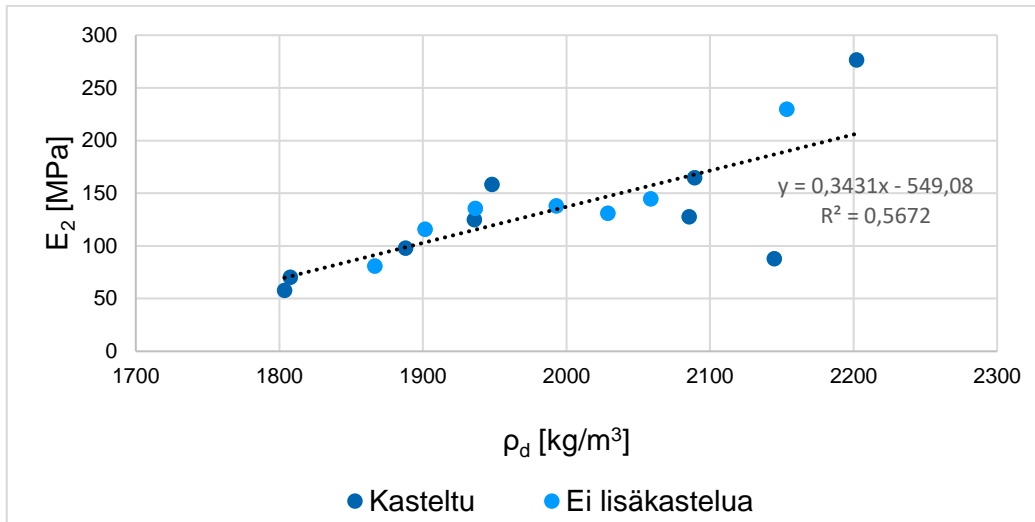
Tutkimus toteutettiin tekemällä mittauksia valmiista ratarakenteesta Luumäki–Imatra-ratahankkeella, rakentamalla koerakenteet 10 erilaisella luonnonmateriaalilla, tarkastelemalla Luumäki–Imatra-ratahankkeen laadunvalvonta-aineistoja ja hyödyntämällä aikaisemmin toteutetuissa tutkimuksissa ja opinnäytetöissä saadut havainnot. Lisäksi rakeisuuden vaikutusta kantavuuteen tutkittiin teoreettisesti pakkautumisteorian avulla. Valmiista ratarakenteesta tehdyillä pudotuspainolaitemittauksilla tutkittiin kantavuusarvojen todellista hajontaa, rakeisuuden sekä ajan

vaikutusta kantavuuteen. Rakeisuudeltaan erilaisista luonnonmateriaaleista rakennetuilla koepenkereillä tutkittiin rakeisuuden, vesipitoisuuden ja tiivistystyön vaikutusta kantavuuteen ja tiiviyteen. Koepenkereille tehtiin levykuormituskokeita, pudotuspainolaitemittauksia ja Troxler-mittauksia. Laboratoriossa tehdyllä koerakenteella tutkittiin rakeisuuden, ajan ja vesipitoisuuden vaikutusta kantavuuteen ja tiiviyteen.

Rakeisuuden vaikutusta tutkittiin tavanomaisten mittausmenetelmien lisäksi partikkelien pakkautumisteorian näkökulmasta. Työssä sovellettiin pakkautumisteoriaan perustuvaa laskentamenetelmää, jolla rakeisuusjakaumasta tunnistetaan ne lajitteet, jotka muodostavat kantavan raerungon ja lajitteet, jotka joko tukevat tai häiritsevät kantavaa raerunkoa. Materiaalin jäykkyys on suuri, kun kuormat välittyvät karkearakeisen raerungon kautta ja hienommat rakeet tukevat suurempia rakeita. Rakeisuusjakaumasta voidaan laskentamenetelmällä tunnistaa erilaisia kantavuuden kanssa korreloivia suureita. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella määritetyt empiirisiä yhtälöitä voidaan hyödyntää kantavuuden ennustamiseen rakeisuusjakauman perusteella.

Luonnonmateriaalista rakennetun rakenteen kantavuuteen vaikuttavat merkittävästi rakennettavan kerroksen alustan kantavuus ja rakennetussa kerroksessa saavutettu kuivairtoteiheyden. Alustan merkitys on suuri, jos pohjamaa häiriintyy ja menettää lujuutensa tiivistystyön seurauksena. Tällöin hyvälaatuinenkaan materiaali ei tiivisty kunnolla, koska alusta ei pysty tuottamaan riittävää tiivistymiseen vaadittavaa vastavoimaa. Toisaalta häiriintynyt alusta vaikuttaa myös kantavuusmittausten tuloksiin varsinkin alle 0,5 metrin kerrospaksuuksilla. Kantavuusmittauksia ei siksi suositella käytettäväksi laadunvalvontaan eristyskerroksen alaosassa, jossa pehmeä pohjamaa voi vaikuttaa saatuihin mittaustuloksiin. Eristyskerroksen alaosassa laadunvalvonta tulisi perustua ensisijaisesti rakeisuuteen ja materiaalin tiiviyttä mittaaviin menetelmiin.

Materiaalin kuivairtoteiheydellä havaittiin olevan kaikkein suurin vaikutus saavutettuun kantavuuteen. Materiaalin kuivairtoteiheyden kasvaessa keskirakeisuus ja raekoko-suhteen kasvaessa ja siksi karkeat sekarakeiset materiaalit tuottavat suuremman kantavuuden (kuva 2). Kuivairtoteiheyttä pystyttiin kasvattamaan useimmilla materiaaleilla 2-3 prosenttiyksikköä kastelemalla rakenne ennen tiivistystä. Vastaavasti kantavuudet myös kasvoivat tiiviyksasteen noustessa. Kantavuus kasvoi kokeissa kuivairtoteiheyden suhteessa lineaarisesti lukuun ottamatta yhtä materiaalia, jonka rakeisuusjakauma tunnistettiin epäjatkovaksi. Tasarakeiset materiaalit saavuttavat hyvin toteutetusta tiivistystyöstä huolimatta alhaisen kuivairtoteiheyden ja sen seurauksena myös kantavuudet jäävät alhaisiksi.



Kuva 2: Rakenteessa saavutetun kuivairtitiheyden vaikutus kantavuuteen.

Tasarakaiset materiaalit tiivistyvät huonosti myös vertailutiiviyttä määrittelevässä Proctor -sullonnassa (taulukko 1). Tiiviyssaste kuvaa siten ainoastaan tiivistystyön laatua, ei niinkään valmiin rakenteen mekaanisia ominaisuuksia. Siksi tiiviyssasteen käyttäminen rakenteen laadun mittarina ei ole suositeltavaa eristyskerroksen yläosassa ja välikerroksessa, joissa kantavuudella on myös rakenteen toiminnan kannalta oleellista merkitystä. Sen sijaan eristyskerroksen alaosissa, joissa liikennekuorman aiheuttamat kuormitukset ovat pieniä, tiiviyssasteen käyttäminen on yksinkertainen ja luotettava tapa tiivistystyön laadun todentamiseen.

Taulukko 1: Tiiviyssasteen vaikutus kantavuuteen.

| Penger | Kuivairtitiheys rakenteessa [kg/m ³] | Maksimikuivairtitiheys [kg/m ³] | Tiiviyssaste [%] | Levykuormituskokeen E ₂ [MPa] |
|-------------|--|---|------------------|--|
| A | 1948 | 2140 | 91,0 | 158 |
| B | 2089 | 2180 | 95,8 | 165 |
| C | 1804 | 1900 | 94,9 | 58 |
| D | 1808 | 1960 | 92,2 | 70 |
| E | 1936 | 2050 | 94,4 | 125 |
| F | 2202 | 2230 | 98,7 | 276 |
| G | 2145 | 2180 | 98,4 | 88 |
| J | 1888 | 2080 | 90,8 | 98 |
| K | 2086 | 2210 | 94,4 | 127 |
| Laboratorio | 2128 | 2190 | 97,2 | 205 |

Tiiviyssuhde E₂/E₁ osoittautui tässä tutkimuksessa erittäin hankalasti saavutettavaksi vaatimukseksi. Heti tiivistämisen jälkeen tehdyissä mittauksissa yksikään koerakenteen materiaali ei täyttänyt levykuormituskokeen tiiviyssuhdevaatimusta. Mitatut arvot olivat jopa varsin kaukana vaatimuksista. Myös raskaalla pudotuspainolaitteella mitatut tiiviyssuhteet olivat vaatimusta heikompia pian tiivistämisen jäl-

keen tehdyissä mittauksissa, ollen kuitenkin selvästi lähempänä vaatimusta levykuormituskokeisiin verrattuna. Tiiviyssuhdevaatimukset pääosin saavutettiin raskaalla pudotuspainolaitteella tehdyissä mittauksissa kuukauden kuluttua tiivistyksestä. Urakan laadunvalvonta-aineiston perusteella myös levykuormituskokeella määritetyt tiiviyssuhteet paranivat niin, että vaatimukset täyttyivät.

Tutkimuksessa havaittiin selkeästi mittausajankohdan vaikutus tiiviyssuhteen ohella myös kantavuuteen. Ratalinjalla tehtyjen raskaan pudotuspainolaitteen mittausten mukaan kantavuus kasvoi selkeästi suuremmaksi kuukauden kuluessa tiivistyksestä (Taulukko 2). Vastaava havainto tehtiin myös laboratorioissa, jossa rakenteen kantavuus kasvoi noin 1,5 kertaiseksi kolmen viikon kuivumisen jälkeen. Havaittu kantavuuden kasvu on todellinen, mutta ei välttämättä pysyvä ilmiö. Laboratorioissa rakenteen runsas kastelu heikensi kantavuuden lähelle tiivistyksen jälkeistä tilannetta. Käytännössä välikerroksen tai eristyskerroksen yläosan täysi kyllästyminen sateiden seurauksena on epätodennäköistä, mutta siitä huolimatta rakenteen kuivumisen aiheuttamaa ajan myötä lisääntyvää kantavuuden kasvua ei tulisi hyödyntää laadunvalvonnassa.

Taulukko 2: Rakenteen tiivistyksestä kuluneen ajan vaikutus raskaan pudotuspainolaitteen mittaustuloksiin.

| Kilometriväli | Kulunut aika tiivistyksestä (vrk) | E ₂ keskiarvo [MPa] | E ₂ min [MPa] | E ₂ /E ₁ keskiarvo | E ₂ /E ₁ max |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|------------------------------------|
| 322+505 – 323+000 | n. 30 | 223,6 | 164 | 1,48 | 1,80 |
| 323+000 – 323+445 | n. 10 | 172,8 | 136 | 2,10 | 2,80 |
| 323+455 – 323+590 | 0 | 141,8 | 108 | 2,28 | 3,18 |

Ajan suhteen kasvava kantavuus liittyy kuivuvassa materiaalissa ilmenevän imupaineen eli näennäisen koheesion kasvuun. Ilmiötä voi esiintyä vain materiaaleilla, jotka ovat melko sekarakeisia ja sisältävät jonkin verran hienoainesta. Tasarakeisessa ja vähän hienoainesta sisältävässä materiaalissa imupainetta ei vastaavalla tavalla esiinny, koska partikkelien väliset huokokset ovat liian suuria. Tästä syystä myöskään kaikissa ratahankkeen mittauksissa ei havaittu ajan suhteen tapahtuvaa kantavuuden kasvua, vaikka pääosassa tapauksista näin havaittiin tapahtuvan.

Karkeiden soralajitteiden saatavuus on jo kohtalaisen heikkoa ja siksi materiaali-toimittajat pyrkivät hyödyntämään myös melko hienorakeisia esiintymiä. Usein maa-aineksen ottopaikan rintauksessa on kerroksittain tasarakeista hiekkaa ja toisaalta karkeaa soraa. Näiden kahden lajitteen sekoittaminen sopivassa suhteessa tuottaa nykyiselle ohjealueelle osuvan rakeisuuden, mutta rakeisuusjakaumasta saattaa tulla epäjatkuva, vastaten kahdesta eri esiintymästä otetun materiaalin sekoittamista, joka on ollut kiellettyä. Epäjatkuva rakeisuusjakauma tarkoittaa kahden tasarakeisen materiaalin muodostamaa seosta, jossa ns. väliraekokoja on vain vähän. Tällaisen materiaalin rakeisuuskäyrä saattaa olla keskiraekoon läheisyydessä lähes vaakasuora. Väliraekokojen puuttuminen voi katkaista materiaalin raerungon, jonka seurauksena materiaali toimii tasarakeisen hiekan ominaisuuksien kaltaisesti. Soralajitteen kivet ikään kuin kelluvat hiekan seassa muodosta-

matta kantavaa raerunkoa. Tällaisessa seoksessa karkea soralajite menee käytännössä hukkaan, sillä se ei paranna välttämättä lainkaan seosmateriaalin mekaanisia ominaisuuksia. Tarkoituksenmukaisempaa olisi hyödyntää tasarakeinen hiekka sellaisenaan sen ominaisuuksille soveltuvassa rakenteessa ja karkeampi sora sellaisenaan vaativampia ominaisuuksia edellyttävässä rakenteessa (ks. kuva 1).

Työmaaliikenne tiivistää sekarakeisesta luonnonmateriaalista rakennettua rakennetta. Valmiin rakenteen päällä tapahtunut työmaaliikenne saattaa siten helpottaa laatuvaatimusten täyttymistä. Perussääntönä voidaan pitää, että ratarakenteeksi tarkoitettun kerroksen päällä tulee pystyä ajamaan kuorma-autolla. Jos kuorma-autojen liikkuminen on hankalaa, materiaali ei todennäköisesti sovellu käytettäväksi eristyskerroksen yläosassa tai välikerroksessa. Eristyskerroksen alaosaan voidaan käyttää myös heikommin tiivistyviä luonnonmateriaaleja, vaikkakin niiden käyttäminen saattaa hankaloittaa rakentamistyötä.

Tutkimuksen aikana todettiin lukuisia yksittäisiä asioita, jotka voivat vaikuttaa vaatimuksen mukaisen laatutason osoittamiseen. Tästä syystä nähtiin tarpeelliseksi ottaa käyttöön koerakentaminen osaksi radan rakentamisprosessia. Koerakentamisen perusteella selvitetään parhaiten tiivistämiseen soveltuvat työmenetelmät ja laadunvalvontaan käytettävät mittausmenetelmät. Suurin osa mahdollisista laadun osoittamiseen liittyvistä ongelmista ilmenee jo koerakentamisen aikana ja niihin pystytään etsimään ratkaisua ennen varsinaisen rakennustyön alkamista.

Tutkimuksen perusteella InfraRYLiin esitetään tehtäväksi mm. seuraavat muutokset:

1. Eristyskerroksen yläosassa ja välikerroksessa käytettävien luonnonmateriaalien rakeisuuden ohjealuetta muutetaan nykyistä merkittävästi karkeammaksi siten, että voimassa olevat kantavuusvaatimukset voidaan saavuttaa. Eristyskerroksen alaosan kantavuusvaatimusta alennetaan vastaamaan hienorakeisempien materiaalien mahdollistamaa kantavuutta.
2. Palautetaan vaatimus raekokosuhteesta, jolla rajataan tasarakeiset, heikosti tiivistyvät materiaalit pois. Vaaditaan, että rakeisuuskäyrän tulee noudatella ohjealueen rajakäyrien muotoa. Ohjeistetaan tasarakeisen tai epäjatkuvan rakeisuusjakauman negatiivisista vaikutuksista.
3. Jatkossa sovellettavat laadunvalvontamenetelmät ovat 1. tiiviyssaste (säteilymittaus), 2. kantavuus (levykuormituskoe tai raskas pudotuspainolaite) tai 3. itsemittaava jyrä yhdistettynä pistemäisiin mittausmenetelmiin. Vain yhtä menetelmää sovelletaan kerroksittain. Suositeltavin menetelmä eristyskerroksen alaosassa on tiiviyssaste. Eristyskerroksen yläosan ja välikerroksen laadunvalvontaan suositellaan käytettäväksi kantavuutta. Tiiviyssuhdevaatimus jää ennalleen ja sitä sovelletaan yhdessä kantavuuden kanssa.
4. Vaaditaan koerakentamista, jonka avulla päätetään tiivistettävälle materiaalille soveltuvat tiivistystyö- ja laadunvalvontamenetelmät. Koerakenteen avulla määritellään itsemittaavan jyrän mittaustuloksen tavoitetaso. Koerakenne voi olla osa ratarakennetta tai erikseen esim. maa-aineksen ottopaikalla toteutettava rakenne.
5. Tihennetään näytteenottoa. Näyte otetaan joko kerran päivässä tai 2000 tonnia kohden, kumpi ensin täyttyy.

Vaikka tutkimus koski varsinaisesti eristys- ja välikerroksessa käytettäviä luonnonmateriaaleja, tarkasteltiin yhtenä osa-alueena myös eristys- ja välikerroksessa käytettävien kalliomurskeiden lujuusvaatimuksia. InfraRYL määrittelee kiviaineksen lujuusvaatimukset iskunkestävyyttä kuvaavan Los Angeles -luvun ja hiovan kulutuksen kestoja kuvaavan Micro-Deval -arvon perusteella. Nykyiset vaatimukset ovat kansainvälisesti katsoen varsin tiukat, ja ne ovat johtaneet joissakin hankkeissa kiviainesten heikkoon saatavuuteen. Väylärakenteiden valtakunnallisten kiviaines- ja geosynteettitutkimusten perusteella vaatimukset ovat kuitenkin täyttyneet eri hankkeilla varsin hyvin. Kiviainesten melko tiukat mineralogiavaatimukset rajaavat pehmeitä mineraaleja sisältävät kivilajit tehokkaasti pois valikoimasta. Valtakunnallisissa tutkimuksissa on niin ikään havaittu, että iskunkestävyys ja kulumiskestävyys kasvavat rinnakkain, mutta osalla kiviaineksista toinen koemenetelmä voi antaa selvästi parempia tuloksia. Toisen lujuusvaatimuksen täytyessä selkeästi, toisen voidaan sallia olevan suhteessa hieman heikompi. Lukuarvojen kriittisen tarkastelun perusteella vaatimukseen päätettiin esittää päivitystä siten, että Los Angeles -luku on < 30 (LA_{30}) ja Micro-Deval -arvo < 15 (M_{DE15}). Näistä toinen lukuarvo voi olla myös suurempi, kunhan summalauseke $\Sigma LA + M_{DE} < 45$ täyttyy. Uusia vaatimuksia sovelletaan koko eristys- ja välikerroksen paksuudelta. Nyt esitetty hieman väljempi vaatimus LA_{30} on sama kuin tierakenteen kantavalla kerroksella. Esitys uusista lujuusvaatimuksista perustuu pitkälti asiantuntija-arvioon vaatimustason vaikutuksesta materiaalien pitkäaikaiskestävyyteen (Kuula 2021).

Eero Ruhanen, Heikki Luomala: Isolering av banan och inverkan av mellanskiktets granularitet på bärigheten. Trafikledsverket. Helsingfors 2021. Trafikledsverkets publikationer 61/2021. 128 sidor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-908-0.

Sammanfattning

InfraRYL innehåller krav på såväl materialets granularitet som konstruktionens bärighet och täthet för isolerings- och mellanskikt på banor vilka byggs av naturmaterial. Ofta har det inte varit möjligt att uppnå de bärigheter som krävs med material som är förenliga med kraven på granulariteten. De material som är problematiska vad gäller granularitetsfördelning är sådana vars granularitetskurvor ligger nära den vänstra kanten i området mellan kurvorna eller diskontinuerliga granularitetskurvor, så kallade granularitetskurvor med sandklumpar. Syftet med arbetet har varit att utreda hur granulariteten i naturmaterial påverkar konstruktionens bärighet. Ett annat fenomen som studeras i arbetet är hur tiden och vattenhalten påverkar bärigheten. Det har observerats att bärigheten ökar med tidens gång, trots att konstruktionen inte egentligen alls rörs efter tätningen.

Med de fallviktsmätningar som gjorts på bankonstruktionen undersöktes bärighetsvärdenas faktiska spridning och tidens och granularitetens inverkan på bärigheten. Med provvallar som byggs av olika material undersöktes inverkan av granulariteten, vattenhalten och tätningsarbetet på bärigheten och tätheten. På provvallarna gjordes skivbelastningsprover, fallviktsmätningar och Troxlermätningar. Med den provkonstruktion som uppförts inomhus undersöktes inverkan av granulariteten, tiden och vattenhalten på bärigheten och tätheten.

Inverkan av granulariteten undersöktes ur ordinarie synvinklar, men också ur en synvinkel som omfattar partikelkomprimeringsteorin. I arbetet tillämpades en beräkningsmetod som baserar sig på komprimeringsteorin, med vilken de fraktioner som bildar det bärande kornskelettet identifierades från granularitetskurvan, liksom också fraktioner som stöder eller stör det bärande kornskelettet. Materialets styvhet är hög när belastningen förmedlas via ett grovkornigt kornskelett och finare korn stöder större korn. Med beräkningsmetoden är det möjligt att utifrån granularitetskurvan identifiera olika storheter som korrelerar med bärigheten. De empiriska ekvationer som fastställts utifrån resultaten av denna studie kan med användning av beräkningsmetoden utnyttjas i prognostiseringen av bärigheten utifrån granularitetskurvan.

Bärigheten påverkas stort av hur granularitetskurvan för materialet är placerad inom området mellan gränskurvorna. Med grovkorniga material uppnås bättre bärighet än med finkorniga material. Detta framgår kalkylmässigt av permeabilitetsprocenten vid en gallring på 2 mm. Bärigheten kan sänkas av att det bärande kornskelettet går av, vilket ofta framgår av en ringa mängd av en fraktion av en viss kornstorlek i granularitetsområdet på över 2 mm.

I och med att tiden går och konstruktionen torkar ökar bärigheten som en följd av sugtrycket, det vill säga en skenbar kohesion. Med naturmaterial är ökningen av bärigheten betydande. Ökningen av bärigheten kan delvis hävas av riklig bevattning, men ringa fuktning av konstruktionen sänker ännu inte bärigheten.

Eero Ruhanen, Heikki Luomala: The effect of grain size distribution in railway frost protection and subballast layers on load bearing capacity Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2021. Publications of the FTIA 61/2021. 128 pages. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-908-0.

Abstract

For railway frost protection and subballast layers, requirements are given for both the material grain size distribution and the bearing capacity and density of the structure. In many cases, the required bearing capacity has not been possible to be met with materials that fulfill the grain size distribution requirements. Materials with grain size distribution curves close to the fine end of the requirement zone and materials with excess amounts of sand grains have been noticed to be problematic. The goal of this thesis was to find out, how the grain size distribution of natural materials affects the bearing capacity. Another phenomenon studied in this thesis was the effect of time and water content on bearing capacity. Bearing capacity of a structure has been seen to increase as time passes even if the structure has remained mostly untouched.

Falling weight deflectometer tests on a railway structure were used to study the true distribution of bearing capacity values and the effect of time and grain size distribution on bearing capacity. Test embankments built from different materials were used to study the effect of grain size distribution, water content and compaction on bearing capacity and density. Tests conducted on the test embankments were plate load, falling weight deflectometer and Troxler test. The effect of grain size distribution, time and water content was also studied on a test structure indoors.

In addition to evaluating the effect of grain size distribution with traditional methods, it was studied from the point of view of particle packing theory. In this thesis, a particle packing based calculation method was applied in identifying those grain sizes, that form the load bearing, and the grain sizes, that either support or disturb the skeleton structure. The stiffness of granular material is great when loads are transferred through the skeleton of large particles and the fine materials are supporting the larger particles. The calculation method can be used to recognize parameters from the grain size distribution that correlate with bearing capacity. Empirical equations defined in this thesis can be used to estimate the bearing capacity from grain size distribution by using the calculation method.

The bearing capacity is affected greatly by the location of the grain size distribution curve inside the requirement zone. Higher bearing capacity can be reached with coarse materials than with fine materials. In the calculations, this shows up as the amount of materials that pass the 2 mm sieve. Bearing capacity can be lowered by a breaking of the skeleton structure. This shows as a low quantity of a specific grain size in the material. Bearing capacity of a structure increases as time passes due to suction i.e. apparent cohesion. This increase is significant on natural materials. Heavy watering can partly cancel this effect, but small amount of water doesn't yet lower the bearing capacity.

Esipuhe

Radan eristys- ja välikerroksessa käytettävät luonnonmateriaalit ja niistä rakennetun rakenteen laadunvalvonnan kehittäminen nousivat esiin Luumäki–Imatra -ratahankkeella, jossa rakeisuudeltaan ohjealueen täyttävällä materiaalilla ei saavutettu vaadittuja kantavuuksia. Asian selkiyttämiseksi Väylävirasto tilasi Tampereen yliopistolta tutkimuksen, jonka tavoitteena oli selvittää syyt laadunvalvonnassa ilmenneisiin ongelmiin ja tehdä tarvittavat muutosehdotukset InfraRYLiin, jotta vastaavilta ristiriitaisuuksilta vältyttäisiin jatkossa. Tämä raportti perustuu tutkimushankkeessa toteutettuun Eero Ruhasen diplomityöhön, jota on täydennetty tavallista laajemmalla tiivistelmällä. Joitakin taulukoita on myös täydennetty diplomityön jälkeen valmistuneiden laboratorikokeiden perusteella.

Tämän raportin on kirjoittanut Tkk Eero Ruhanen ja raporttia on täydentänyt TkT Heikki Luomala, joka on toiminut tutkimushankkeen projektipäällikkönä. Työtä ovat ohjanneet Joonas Hämäläinen ja Panu Tolla Väylävirastosta apunaan LuIma-hankkeen projektiorganisaatio, johon kuului rakennuttajia ja valvojia Welado Oy:stä. Työtä ohjasi myös Prof. Pauli Kolisoja Tampereen yliopistosta. Kiitokset hyvästä yhteistyöstä kuuluvat urakoitsijoille GRK Infra Oy:lle ja NRC Group Finlandille ja heidän aliurakoitsijoilleen sekä Swerock Oy:lle ja Destia Oy:lle, joiden soraottopaikoilla saimme tehdä koerakenteita. Kiitokset myös Tampereen yliopiston Tutkimuskeskus Terran henkilökunnalle, josta useampi henkilö osallistui koesarjojen toteuttamiseen.

Helsingissä lokakuussa 2021

Väylävirasto
Tekniikka- ja ympäristösasto

Sisältö

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 17 |
| 2 | LUONNONMATERIAALIT RADAN ERISTYS- JA VÄLKERROKSESSA | 18 |
| 2.1 | Ratarakenne | 18 |
| 2.2 | Ratarakenteeseen kohdistuvat kuormitukset | 19 |
| 2.3 | Luonnonmateriaalien rakeisuus ja raemuoto | 21 |
| 2.4 | Tiiviys ja tiivistyminen..... | 24 |
| 2.4.1 | Tiiviyn määrittely..... | 24 |
| 2.4.2 | Vesipitoisuuden vaikutus tiiviyteen | 24 |
| 2.4.3 | Rakeisuusjakautuman ja raemuodon vaikutus tiiviyteen | 26 |
| 2.4.4 | Tiivistystyö..... | 29 |
| 2.5 | Tiiviyksmittaukset | 31 |
| 2.5.1 | Säteilymittauslaite | 31 |
| 2.5.2 | Volymetrikoe..... | 31 |
| 2.5.3 | Itsemittaava jyrä | 32 |
| 2.6 | Luonnonmateriaalien mekaaninen käyttäytyminen | 33 |
| 2.6.1 | Kantavuus käsitteenä..... | 33 |
| 2.6.2 | Palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen..... | 34 |
| 2.6.3 | Palautumaton muodonmuutoskäyttäytyminen | 36 |
| 2.6.4 | Jännitystilän vaikutus materiaalin jäykkyyteen..... | 37 |
| 2.6.5 | Tiiviyn vaikutus materiaalin jäykkyyteen..... | 37 |
| 2.6.6 | Raekokojakautuman vaikutus materiaalin jäykkyyteen | 38 |
| 2.6.7 | Kosteustilan vaikutus materiaalin jäykkyyteen | 39 |
| 2.6.8 | Muita materiaalin jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä | 41 |
| 2.6.9 | Luiskin läheisyyden vaikutus kantavuuteen | 41 |
| 2.6.10 | Kantavuusarvojen laskennallinen käsittely..... | 42 |
| 2.7 | Materiaalin jäykkyyden mittaaminen laboratorioissa | 42 |
| 2.7.1 | Kolmiakselialkoe | 42 |
| 2.7.2 | California Bearing Ratio (CBR) | 43 |
| 2.7.3 | Kiertotiivistyskoe | 45 |
| 3 | PARTIKKELIEN PAKKAUTUMINEN | 47 |
| 3.1 | Partikkelien pakkautumisteoria | 47 |
| 3.2 | Kantavuuden määrittäminen pakkautumisteorian perusteella | 49 |
| 4 | KANTAVUUDEN MITTAUS JA KANTAVUUSVAATIMUKSET..... | 55 |
| 4.1 | Kantavuuden kenttämittausmenetelmät | 55 |
| 4.1.1 | Kantavuuden mittaaminen levykuormituskokeella | 55 |
| 4.1.2 | Kantavuuden mittaaminen pudotuspainolaitteella | 56 |
| 4.2 | Eristys- ja välikerrosten laatuvaatimukset | 57 |
| 4.2.1 | InfraRYLin mukaiset materiaali vaatimukset..... | 57 |
| 4.2.2 | InfraRYLin mukaiset kantavuus- ja tiiviyksvaatimukset | 59 |
| 4.2.3 | Vaatimukset työmenetelmille | 61 |
| 4.2.4 | Ulkomaisia vaatimuksia | 61 |
| 5 | AIEMPIEN TUTKIMUSTEN KANTAVUUSMITTAUSHAVAINTOJA..... | 65 |
| 5.1 | Luumäki-Imatra RU2 koekentät, kevät 2020 | 65 |
| 5.1.1 | Rauhan asema 1 | 65 |
| 5.1.2 | Rauhan asema 2 | 66 |
| 5.1.3 | Rauhan asema 3 | 66 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.2 | Hipin koepenkereet | 68 |
| 5.3 | Kaitjärven liikennepaikka..... | 71 |
| 6 | KANTAVUUSMITTAUKSET KOERAKENTEISTA | 75 |
| 6.1 | Pudotuspainolaitemittaukset ratarakenteesta | 75 |
| 6.2 | Koepenkereet | 79 |
| 6.3 | Mittaukset ajouralta..... | 91 |
| 6.4 | Koerakenne Tampereen yliopiston rakennushallissa..... | 91 |
| 6.5 | Kiertotiivistyskokeet laboratoriossa | 95 |
| 7 | TULOSTEN ANALYSOINTI | 98 |
| 7.1 | Kantavuuteen vaikuttavat tekijät yleisesti | 98 |
| 7.2 | Rakeisuusparametrien vaikutus | 102 |
| 7.3 | Yidetin esittämän laskentamenetelmän soveltaminen | 106 |
| 7.4 | Kantavuuden arviointi laskentamenetelmällä..... | 115 |
| 7.5 | Laskentamenetelmän arviointi | 117 |
| 8 | YHTEENVETO | 119 |
| | LÄHDELUETTELO | 122 |

Lyhenteet ja merkinnät

| | |
|-------------|--|
| CBR | California Bearing Ratio |
| CMV | Compaction Meter Value, jäykkyyttä kuvaava suure mittaavalla jyrällä |
| DM | Disruptive Materials |
| DP | Disruption Potential |
| PS | Primary Structure |
| SS | Secondary Structure |
| VCA | Void Ratio of Coarse Aggregates, huokoisuus |
| a | kuormituslevyn säde |
| C_c | rakeisuuskäyrän muotoparametri |
| C_u | raekokosuhte |
| cn_{PS} | primäärirakenteen koordinaatioluku |
| D | tiiviyysaste |
| D_i | seulakoko |
| D_{max} | maksimiraekoko |
| D_r | suhteellinen tiiviyys |
| $D_{w,avg}$ | kahden peräkkäisen lajitteen raekoon painotettu keskiarvo |
| d_{50} | keskiraekoko |
| d | raekoko |
| d_n | läpäisyprosenttia n vastaava raekoko |
| d_r | painuma mittauspisteessä |
| $d_{w,avg}$ | huokosten läpimitan painotettu keskiarvo |
| E_i | kantavuus |
| E_{vib} | jäykkyyttä kuvaava suure mittaavalla jyrällä |
| e | huokosluku |
| e_{max} | löyhintä tilaa vastaava huokosluku |
| e_{min} | tiiveintä tilaa vastaava huokosluku |
| e_s | raerungon huokoisuus |
| h | kerrospaksuus |
| K_i | materiaaliparametri |

| | |
|-----------------|--|
| k_b | jäykkyyttä kuvaava suure mittaavalla jyrällä |
| M_r | jäykkysmoduuli eli resilient-moduuli |
| N | työkierrosten lukumäärä |
| n | rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametri, huokoisuus |
| n_{PS} | primäärirakenteen huokoisuus |
| Omega | jäykkyyttä kuvaava suure mittaavalla jyrällä |
| P | läpäisyprosentti (Fullerin yhtälö) |
| p | akσιαalinen paine, kosketuspaine |
| q | deviatorinen jännitys |
| R | rakeiden pyöreyttä kuvaava suure |
| R_{ij} | raekokojen suhde |
| r | kuormituslevyn jäykkyskerroin, etäisyys |
| s | levyn keskipisteen painuma |
| V_{agg} | kiintoaineksen osuus tilavuudesta |
| $V_{>PS}$ | ylisuurten rakeiden osuus tilavuudesta |
| V_{DM}^{SS} | disruptiivisten materiaalien osuus |
| V_{PS} | primäärirakenteen rakeiden osuus tilavuudesta |
| V_{free}^{PS} | primäärirakenteen sisäinen huokostilavuus |
| V_{SS} | sekundäärirakenteen rakeiden osuus tilavuudesta |
| V_{free}^{SS} | sekundäärirakenteen vapaa huokostilavuus |
| V_T | koko rakenteen tilavuus |
| V_{voids} | koko rakenteen huokostilavuus |
| w | vesipitoisuus |
| w_{opt} | optimivesipitoisuus |
| α | liikekulma |
| γ_d | kuivatilavuuspaino |
| γ_{dmax} | maksimikuivatilavuuspaino |
| ϵ_1 | akσιαalinen muodonmuutos |
| ϵ^e | palautuva muodonmuutos |
| θ | pääjännitysten summa |
| θ_0 | vertailujännitys |

| | |
|-------------|-----------------------------|
| ρ_d | kuivairtoteiheys |
| ρ_s | kiintoteiheys |
| ρ_w | märkäirtoteiheys |
| σ | jännitys |
| σ_g | geometrinen normaalijakauma |
| ν | Poissonin luku |
| φ_i | lajitteen tilavuusosuus |

1 Johdanto

Radan alusrakenteen toimivuus on edellytyksenä sujuvalle ja turvalliselle rautatie- liikenteelle, minkä takia alusrakenteen on täytettävä erilaisia laatuksiteereitä. Ratarakenteen eristys- ja välikerroksen tehtävänä on olla kantavana alustana päällysrakenteelle ja jakaa tukikerrokselta välittyvät kuormat maapohjalle. Eristyskerroksen tehtävänä on lisäksi estää rakennetta routimasta.

Eristys- ja välikerrokset voidaan rakentaa joko kalliomurskeesta tai luonnon maa- materiaaleista, hiekasta tai sorasta. Materiaaleille on InfraRYLissä esitetty rakei- suusvaatimuksia. Eristys- ja välikerroksille on esitetty myös tiiviys- ja kantavuus- vaatimuksia. Useiden ratakankkeiden yhteydessä on havaittu, että rakeisuusvaati- musten mukaisilla materiaaleilla ei ole oikein toteutetusta tiivistystyöstä huolimatta saavutettu kantavuusvaatimuksia. Puutteellinen kantavuus aiheuttaa sen, että riski rakenteen muodonmuutoksille päällysrakenteelta välittyvien junakuormien vaiku- tuksesta kasvaa. Kantavuuteen vaikuttaa materiaalin rakeisuuden lisäksi myös muita tekijöitä, kuten tiivistystyö ja vesipitoisuus. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia, millä luonnonmateriaalien rakeisuusjakautumilla nykyiset kantavuusvaa- timukset on mahdollista täyttää. Työssä tutkitaan myös rakeisuuden vaikutusta kantavuuteen partikkelien pakkautumisteorian näkökulmasta ja sovelletaan pak- kautumisteoriaan perustuvaa laskentamallia kantavuuden arviointiin. Lisäksi tutkit- tavana kysymyksenä on, miten aika ja vesipitoisuus vaikuttavat luonnonmateriaa- lista tehdyn rakenteen kantavuuteen.

Työn teoriaosuudessa käsitellään ensin radan rakennetta ja eristys- ja välikerrok- sen toimintaa, jonka jälkeen käsitellään keskeisimmät luonnonmateriaalien ominai- suudet. Keskeisiä teoriaosuudessa käsiteltäviä asioita ovat tiiviys, sen mittaaminen ja siihen vaikuttavat tekijät. Tämän jälkeen käsitellään luonnonmateriaalien me- kaaniseen käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ja materiaalin jäykkyyden mittaa- mista laboratoriossa. Luvun kaksi perusteoriaosuuden jälkeen luvussa kolme esi- tellään lyhyesti partikkelien pakkautumisteoria sekä siihen perustuva laskentame- netelmä. Neljännessä luvussa esitellään eristys- ja välikerrosten materiaaleille ase- tetut vaatimukset sekä eristys- ja välikerroksille asetetut kantavuus- ja tiiviysvaa- timukset. Lisäksi esitellään lyhyesti erilaisia ulkomaalaisia vaatimuksia.

Viidennessä luvussa käydään läpi aiempia tutkimuksia, joista on saatavilla tämän tutkimuksen kannalta hyödyllisiä koetuloksia. Tämän työn yhteydessä tehtiin mit- tauksia valmiista ratarakenteesta, koepenkereistä ja sisätiloissa tehdystä koera- kenteesta. Kuudennessa luvussa esitellään tämän työn yhteydessä saadut koetu- lokset.

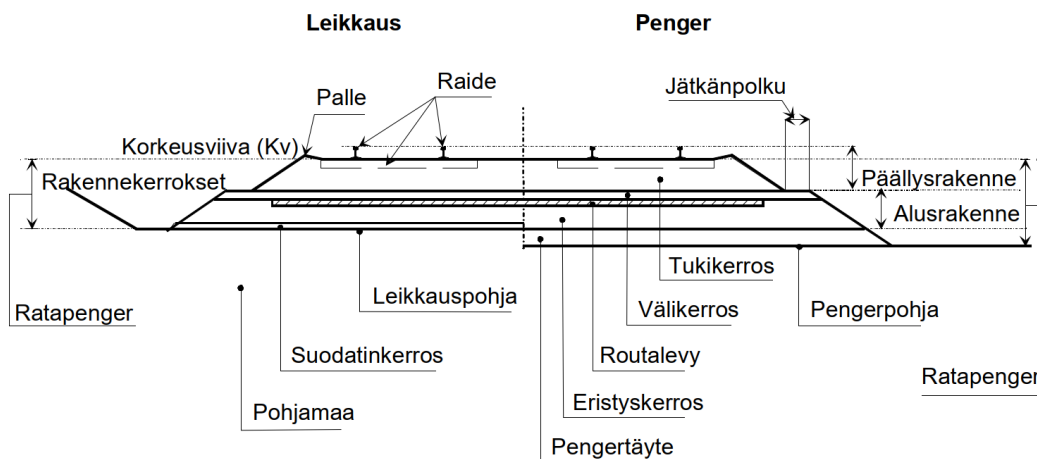
Seitsemännessä luvussa analysoidaan tämän ja aiempien tutkimusten tuloksia ja arvioidaan erilaisten tekijöiden vaikutusta kantavuuteen ja tiiviyteen. Tämän jäl- keen pakkautumisteoriaan perustuvaa laskentamenetelmää sovelletaan kantavuu- den arviointiin sekä arvioidaan menetelmän toimivuutta ja käyttökelpoisuutta.

2 Luonnonmateriaalit radan eristys- ja välikerroksessa

2.1 Ratarakenne

Ratarakenne voidaan jakaa kahteen pääosaan, päällysrakenteeseen ja alusrakenteeseen. Päällysrakenne koostuu raiteesta ja tukikerroksesta. Tukikerroksen materiaalina on joko raidesepele tai -sora ja sen tehtävänä on toimia raiteen kantavana alustana ja pitää raidetta halutussa asennossa. Raiteeseen kuuluvat kiskot ja niitä paikallaan pitävät ratapölkkyt sekä niiden jatkos- ja kiinnitysosat. Raiteeseen kuuluvat myös vaihteet ja muut erikoisrakenteet. (Liikennevirasto 2018a)

Alusrakenteeseen kuuluvat väli- ja eristyskerrokset sekä tarvittaessa routasuojaus ja suodatinkerros. Alusrakenteen ylin osa on 300 mm paksuinen välikerros, joka toimii tukikerroksen kantavana alustana, välittää kuormat eristyskerrokselle ja estää tukikerroksen materiaalin sekoittumisen alempien kerrosten materiaaleihin. Välikerroksen alla on eristyskerros, jonka tehtävänä on estää alapuolista maata routimasta, välittää kuormat pohjamaalle ja estää veden kapillaarinen nousu ylempiin kerroksiin. Eristyskerroksen paksuus määräytyy routamitoituksen perusteella. Suodatinkerroksen tarkoituksena on estää eristyskerroksen materiaalin ja pohjamaan sekoittuminen. Hiekasta rakennettavan suodatinkerroksen sijaan nykyään käytetään usein suodatinkangasta. Routalevy parantaa rakenteen lämmöneristävyttä ja siten routimisesta aiheutuvia ongelmia. Routalevyn materiaalina on XPS-eristelevy ja se voi sijaita välikerroksen ylä- tai alapuolella. (Liikennevirasto 2018a) Kuvassa 2.1 on esitetty radan rakenneosat ja niiden nimitykset tyyppillisessä ratapölkkykileikkauksessa.



Kuva 2.1: Radan rakenneosat ja niiden nimitykset (Liikennevirasto 2018a)

Ratapenkereellä tarkoitetaan kokonaisuutta pengertäytteen alapinnasta tukikerroksen yläpintaan.

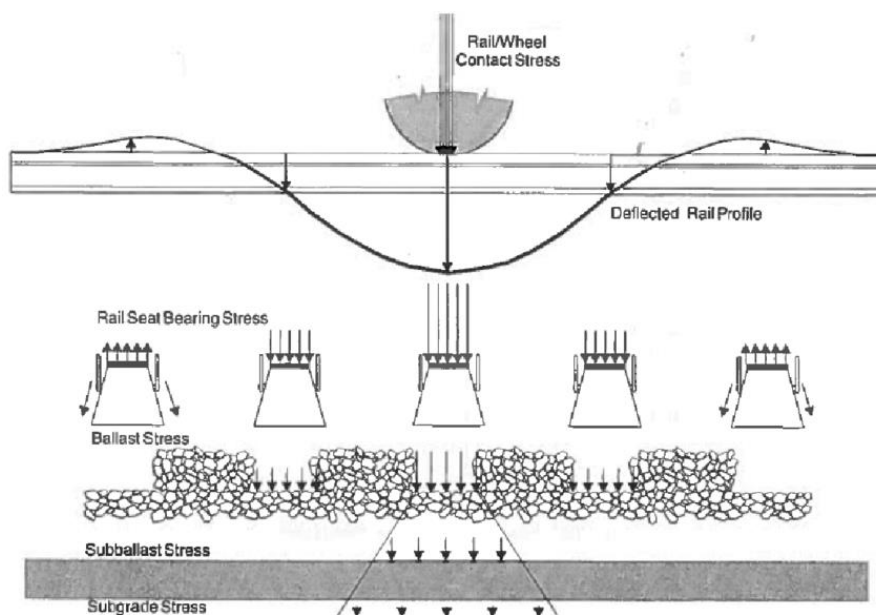
2.2 Ratarakenteeseen kohdistuvat kuormitukset

Merkittävin ratarakennetta kuormittava tekijä on kiskoilla liikkuva kalusto, josta aiheutuvat kuormitukset voivat olla radan pysty-, vaaka- tai pituussuuntaisia. Näiden kuormitusten lisäksi ratarakenteeseen kohdistuu ilmasto- ja ympäristökuormituksia. Suomen olosuhteissa roudan merkitys kuormittavana tekijänä on suuri. Routa voi kasvattaa alusrakenteen jäykkyyttä ja siten aiheuttaa sen, että päällysrakenteen komponenttien kautta välittyy rakenteelle suurempia jännityksiä. Roudan sulamisvaiheessa rakenteet ovat veden kyllästävässä tilassa, jolloin ne ovat alttiina pysyville muodonmuutoksille. (Kalliainen et al. 2014)

Liikkuvan kaluston aiheuttamien pystysuuntaisten kuormitusten lisäksi radan päällysy- ja alusrakenteet kuormittavat niiden alapuolisia rakenteita ja pohjamaata. Liikkuvan kaluston aiheuttamat kuormat ovat sekä staattisia että dynaamisia. Pyörän kautta välittyvät pystysuuntaiset kokonaisvoimat koostuvat puolikkaan akselipainon aiheuttamasta voimasta, kaarteessa keskihakuvoiman pyörän kautta välittyvästä komponentista, tuulen aiheuttamasta voimasta ja dynaamisesta voimalisästä. Kvasistaattisiksi voimiksi kutsutaan akselipainon, keskihakuvoiman ja tuulen aiheuttamia voimia ilman dynaamista lisää. (Esveld 2001, Kalliainen et al. 2014 mukaan)

Dynaamista kuormituslisää arvioidaan laskennassa kertoimella, jota sanotaan syysäytlisäksi ja siihen vaikuttavat mm. junan nopeus, staattinen akselipaino, pyörän halkaisija, kaluston jousittamaton massa, kaluston kunto, radan kunto, rataluokka ja radan rakennekerrosten kunto (Indraratna et al. 2011, Kalliainen et al. 2014 mukaan)

Kuvassa 2.2 on havainnollistettu pyörältä välittyvän kuorman jakautumista kiskolle, ratapölkkyille, tukikerrokselle, alusrakenteelle ja pohjamaalle.



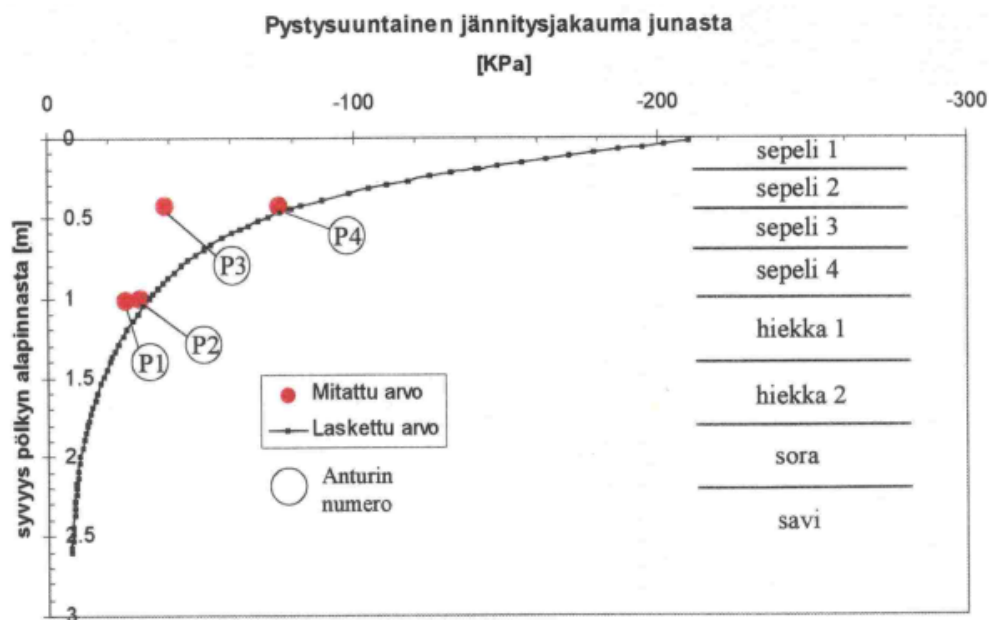
Kuva 2.2: Junakuormien jakautuminen (Selig & Waters 1994)

Suurin osa kuormista välittyy välittömästi pyörän alla olevan pölkyn kautta. Tämän kuorman osuus on noin puolet kokonaiskuormasta. Pystysuuntaista kuormaa välittyy myös viereisten pölkkyjen kautta. Kauempana sijaitseville pölkkyille välittyy kiskojen kautta kuvan 2.2 periaatteen mukaisesti pystysuuntainen nostava voima, joka pyrkii nostamaan pölkkyjä tukikerroksesta irti ja aiheuttaa siten tukikerrosta kuluttavan pumppausilmiön. (Selig & Waters, 1994, Kalliainen et al. 2014 mukaan)

Tukikerroksen kunto vaikuttaa merkittävästi jännitysten välittymiseen alapuolisille kerroksille. Huonokuntoisella raidesepelillä, jonka kitkakulma on hyväkuntoista pienempi, ratapölkyn alle muodostuva jännityspyramidi on jyrkempi ja jännitykset jakautuvat tukikerroksen alaosassa pienemmälle pinta-alalle. (Jernbaneverket 1998, Kolisoja et al. 1999 mukaan)

Todellisuudessa kuormat jakautuvat tukikerroksessa epätasaisesti. Tukikerroksen sepelissä kuormat välittyvät jännitysketjuja pitkin, minkä takia myös välikerrokselle kohdistuva kuormitus on mahdollisesti epätasaisesti jakautunutta. Tästä seurauksena voi olla tukikerroksen sepelin tunkeutuminen välikerrokseen, välikerroksen painuminen tai materiaalin jauhautuminen. (Kolisoja et al. 1999)

Suurimmat pystyjännitykset ratapenkereessä muodostuvat tukikerroksen yläpintaan. Kolisoja et al. (2000) tutkimuksessa mitattiin ratapenkereeseen muodostuvia pystyjännityksiä akselipainoltaan 250 kN olevien junavaunujen kulkiessa mittauskohteen yli. Mittaustuloksia verrattiin BISAR -kerrosrakennepohjelmistolla laskettuihin teoreettisiin jännitysten arvoihin mittauskohdetta vastaavalla rakennepoikkileikkauksella. Kuvassa 2.3 on esitetty tutkimuksessa mitatut jännitysten arvot sekä laskentaohjelmalla saadut jännitykset eri syvyyksillä.



Kuva 2.3: Mitattujen ja laskettujen pystyjännitysten vertailu (Kolisoja et al. 2000)

Pisteessä P3, joka sijaitsee rakenteessa 0,5 m syvyydellä sepelikerroksessa, mitattu pystyjännityksen arvo ei vastaa kerroslaskentaohjelmalla saatua arvoa samalla syvyydellä. Tämä johtuu siitä, että paineanturi on suurimpien sepelirakeiden

kanssa samaa kokoluokkaa, mikä johtaa mittausteknisiin ongelmiin. Muissa pisteissä mitatut arvot vastaavat hyvin laskennallista jännitysjakamaa. (Kolisoja et al. 2000)

Pystykuormien lisäksi ratarakenteeseen kohdistuu poikki- ja pituussuuntaisia kuormituksia. Poikkisuuntaiset kuormat koostuvat pystykuormien kanssa osittain vastaavalla tavalla kaarteissa pyörän laipan ja ulkokiskon kontaktista, keskihakuvoimasta, tuulen vaikutuksesta ja dynaamisesta voimalisästä. Pituussuuntaisia kuormituksia aiheuttaa liikkuvan kaluston kiihdytys- ja jarrutusvoimista sekä lämpötilan muutoksista johtuvista kiskojen veto- ja puristusjäännityksistä. (Kalliainen et al. 2014)

2.3 Luonnonmateriaalien rakeisuus ja raemuoto

Maalajien rakeisuutta kuvataan rakeisuuskäyrällä, joka kertoo, kuinka paljon materiaalissa on massaprosentteina tiettyä raekokoja pienempiä rakeita. Rakeisuuskäyrä esitetään puolilogaritmisessa koordinaatistossa, jossa logaritmisella vaak akselilla on raekoko millimetreinä ja pystyakselilla prosentit lineaarisella asteikolla. Rakeisuuskäyrä määritetään karkearakeisille materiaaleille kuivaseulonnalla. Seulonnalla määritetään kullekin seulalle jääneiden lajitteiden osuudet koko materiaalista. Näin saadaan tietää, mikä osuus rakeista on tiettyä raekoko suurempaa ja pienempää. Hienoaineksen, eli alle 0,063 mm läpimitaltaan olevien rakeiden osuuden tarkka määrittäminen ei onnistu kuivaseulonnalla. Pienillä, noin alle 10% hienoainepitoisuuksilla, voidaan hienoainemäärän mittaamiseen käyttää pesuseulontaa. Hienoaineksen sisäisen raekokojakautuman määrittämiseen käytetään useimmiten areometrikoetta. (Rantamäki et al. 2009)

Rakeisuuskäyrästä voidaan määrittää materiaalille erilaisia materiaalin raekokojakautumaa kuvaavia tunnuslukuja, joista usein käytettyjä ovat esimerkiksi hienoainepitoisuus, keskiraekoko d_{50} , raekokosuhde C_u , ja rakeisuuskäyrän muotoparametri C_c . Tunnuslukujen määrittämistä varten rakeisuuskäyrästä täytyy määrittää seulakoko, joka vastaa haluttua läpäisyprosenttia. InfraRYL (2020) liitteen 1 ohjeen mukaan läpäisyprosenttia n vastaava seulakoko d_n lasketaan kaavalla 1

$$d_n = 10^{\left(\log(a) + (n-c) \frac{\log(b) - \log(a)}{f-c}\right)}, \quad (1)$$

missä a suurin on seulakoko millimetreinä, jonka läpäisyprosentti on alle halutun läpäisyprosentin n , ja b on pienin seulakoko, jonka läpäisyprosentti on enemmän kuin läpäisyprosentti n . Kaavassa c on seulan a läpäisyprosentti ja f on seulan b läpäisyprosentti. (InfraRYL 2020)

Rakeisuuden jakautumisen arviointiin käytetään raekokosuhdetta C_u , joka määritellään kaavalla 2

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad (2)$$

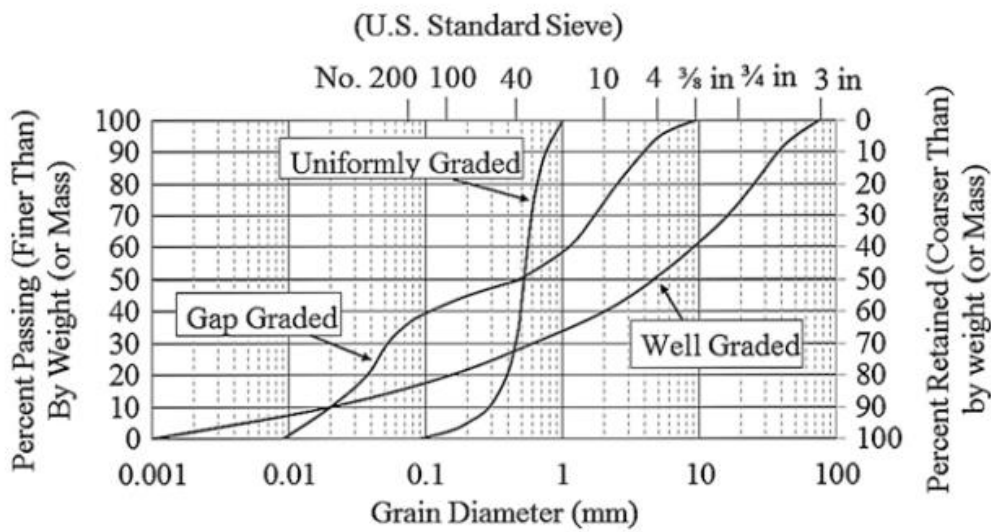
missä d_{60} on maanäytteen raekoko 60% läpäisyn kohdalla ja d_{10} raekoko 10% läpäisyn kohdalla. Materiaalia, jonka C_u on alle 5, kutsutaan tasarakeiseksi ja materiaalia, jonka C_u on välillä 5–15 sanotaan sekarakeiseksi. Kun C_u on yli 15, materiaali on suhteistunutta. (Rantamäki et al. 2009)

Rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametri C_c lasketaan kaavalla 3.

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}}, \quad (3)$$

Hyvin suhteistuneella materiaalilla C_c on välillä 1–3. (Craig 2004) Mitä pienempi materiaalin C_c on, sitä kuperampi rakeisuuskäyrä on muodoltaan. Vastaavasti, mitä suurempi C_c , sitä roikkuvampi rakeisuuskäyrä on.

Jos materiaalista puuttuu paljon tiettyjen raekokojen lajitteita, kyseessä on rakeisuuskäyrältään epäjatkua (gap graded) materiaali. Kuvassa 2.4 on esitetty esimerkkirakeisuuskäyrät suhteistuneesta (well graded), tasarakeisesta (uniformly graded) ja rakeisuuskäyrältään epäjatkuvasta materiaalista. (Shakoor 2018)

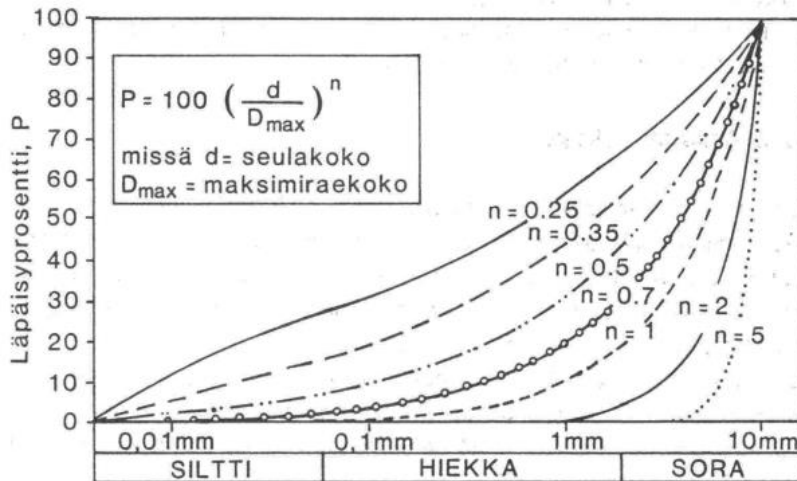


Kuva 2.4: Suhteistunut, tasarakeinen ja epäjatkua rakeisuuskäyrä (Shakoor 2018)

Rakeisuuskäyrän muodon arvioinnissa voidaan hyödyntää Fullerin yhtälöä (kaava 4)

$$P = 100 \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n, \quad (4)$$

missä P on läpäisyprosentti, d raekoko, D_{max} materiaalin maksimiraekoko ja n rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametri. Parametrin n ollessa pieni, materiaali on suhteistunutta ja kun n on arvoltaan suuri, materiaali on tasarakeista. (Kolisjoja 1996) Kuvassa 2.5 on esitetty rakeisuuskäyriä parametrin n eri arvoilla.



Kuva 2.5: Rakeisuuskäyriä eri Fullerin yhtälön parametrin n arvoilla (Thom 1988, Kolisoja 1993 mukaan)

Maamateriaalien keskeinen ominaisuus rakeisuuskäyrän lisäksi on raemuoto. Rakeet voivat olla karkeasti jaoteltuna joko vakio­läpimittaisia, litteitä tai neulamaisia. Karkearakeisilla maalajeilla rakeet ovat usein vakio­läpimittaisia, kun taas hienorakeisilla maalajeilla rakeet ovat usein litteitä. Neulamaiset rakeet ovat kahta muuta raemuotoa harvinaisempia. (Rantamäki et al. 2009) Kuvassa 2.6 on esitetty kolme eri raemuototyyppiä.



Kuva 2.6: Vakio­läpimittainen, litteä ja neulamainen raemuoto (Rantamäki et al. 2009)

Raemuodon lisäksi rakeet voidaan jaotella niiden särmikkyyden perusteella. Kuvassa 2.7 on esitetty kolme eri särmikkyyden raemuotoa.



Kuva 2.7: Rakeiden jaottelu särmikkyyden perusteella (Rantamäki et al. 2009)

Särmikkäitä rakeita esiintyy tyypillisesti moreenikerrostumissa. Pyörästyneet rakeet ovat tyypillisiä harju- ja rantamuodostumissa olevissa hiekka- ja sora­materiaaleissa. (Rantamäki et al. 2009) Radan eristys- ja välikerroksessa käytettävät luonnonmateriaalit kuuluvat useimmiten jälkimmäiseen kategoriaan.

2.4 Tiiviys ja tiivistyminen

2.4.1 Tiiviiden määritelmä

Karkearakeisen maan lujuus- ja kantavuusominaisuuksia voidaan epäsuorasti arvioida sen tiiviiden perusteella. Maa koostuu kiinteästä maa-aineksesta sekä veden tai ilman täyttämästä huokostilavuudesta. Tiiviyteen vaikuttaa maan huokosluku e , jolla tarkoitetaan tutkittavan maan huokostilavuutta jaettuna kiinteän maa-aineksen tilavuudella. (Rantamäki et al. 2009)

Rakenteen tiiviyttä voidaan kuvata tiiviyssasteella D , joka kertoo mitattavan kohteen maan kuivatilavuuspainon suhteen materiaalin tiiveimmän mahdollisen tilan kuivatilavuuspainoon prosentteina (Rantamäki et al 2009). Materiaalin maksimikuivatilavuuspaino määritetään standardin SFS-EN 13286-2 mukaisella parannetulla Proctor-kokeella. InfraRYLin mukaisena yhtenä maarakenteiden laatuvaatimuksena on rakenteen riittävä tiiviyssaste, jota mitataan esimerkiksi säteilymittauksella. Eri rakenteille on olemassa erilaisia tiiviyssvaatimuksia. (InfraRYL 2020)

Toinen tapa arvioida tiiviyttä on suhteellinen tiiviyys D_r , joka määritetään kaavalla 5

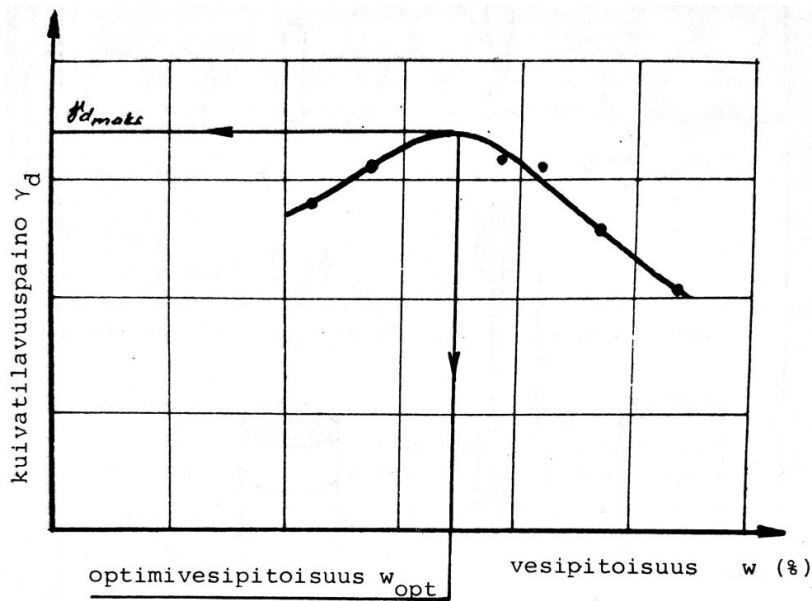
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}, \quad (5)$$

missä e_{max} on materiaalin löyhintä tilaa vastaava huokosluku, e_{min} tiiveintä tilaa vastaava huokosluku ja e on tutkittavan materiaalin huokosluku. Suhteellinen tiiviyys voi vaihdella välillä 0 – 1, missä arvolla 0 maa on löyhimmässä mahdollisessa ja arvolla 1 tiiveimmässä mahdollisessa tilassa. Mitä pienempi huokosluku on, eli mitä vähemmän huokostilaa massa on verrattuna kiinteän maa-aineksen määrään, sitä tiiviimmässä tilassa maa on. (Rantamäki et al. 2009) Tärkeimmät maarakenteen tiiviyteen vaikuttavat tekijät ovat maalaji, vesipitoisuus, tiivistysmenetelmä, tiivistystyön määrä ja pohjamaan kantavuus (Forsblad 2000).

Kiintotiheys ρ_s on maamateriaalin huokosettoman aineen tiheys, joka määräytyy kiviaineksen tiheyden mukaan. Kiintotiheys suomalaisilla kivennäismaalajeilla on tyypillisesti noin 2600–2800 kg/m³, mutta tyypillisin moreenimaalajien kiintotiheys on 2650 kg/m³. Tätä arvoa voidaan käyttää suomalaisen kivennäismaalajin kiintotiheyden vakioarvona. (Rantamäki et al. 2009)

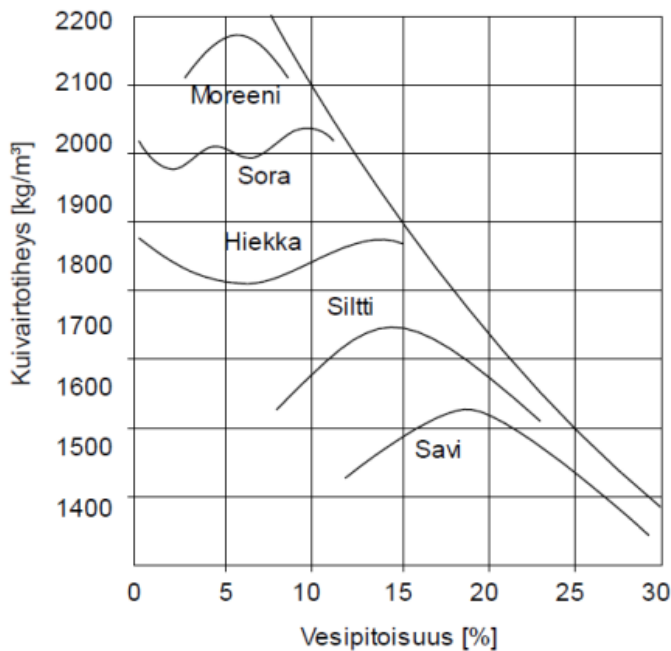
2.4.2 Vesipitoisuuden vaikutus tiiviyteen

Materiaalin tiivistymiseen vaikuttaa olennaisesti sen vesipitoisuus. Täysin vettyneellä tai kuivalla materiaalilla ei voida saavuttaa korkeimpia mahdollisia tiiviyssasteita. Veden on ajateltu toimivan rakeiden välisenä "voiteluaineena". Proctor-kokeessa maamateriaalia tiivistetään muotissa vakiotyömäärällä eri vesipitoisuuksissa, jolloin saadaan selville se vesipitoisuus, jolla suurin mahdollinen kuivatilavuuspaino saavutetaan. Tätä vesipitoisuutta kutsutaan optimivesipitoisuudeksi. (Rantamäki et al. 2009) Suurilla vesipitoisuuksilla vesi alkaa viedä suurempaa osaa kokonaistilavuudesta, jolloin kuivairtotiheyden arvo pienenee (Craig 2004). Optimivesipitoisuuden ja maksimikuivatilavuuspainon määrittäminen Proctor-kokeen tulosten perusteella on esitetty kuvassa 2.8.



Kuva 2.8: Proctor-kokeen tulokset (Rantamäki et al. 2009)

Vesipitoisuudella on Proctor-kokeen lisäksi olennainen merkitys käytännön rakentamisessa. Maarakenteen riittävän kantavuuden saavuttamiseksi tiivistystyö on tehtävä mahdollisimman lähellä optimivesipitoisuutta. (Rantamäki et al. 2009) Optimivesipitoisuuden arvo on matalampi ja kuivairtoisuuden maksimiarvo on korkeampi suuremmalla tiivistystyömäärällä (Hartikainen 2000). Kuvassa 2.9 on esitetty vesipitoisuuden tyypillinen vaikutus eri materiaalien tiivistymiseen.



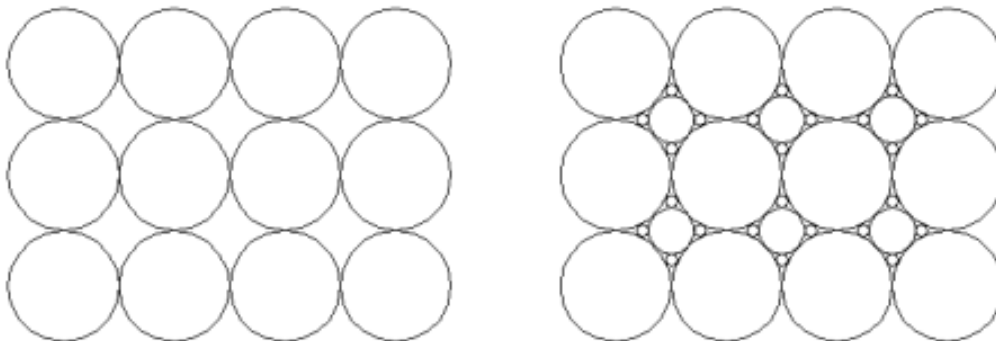
Kuva 2.9: Vesipitoisuuden vaikutus kuivairtoisuuteen eri materiaaleilla (Kalliainen et al. 2011)

Kuvasta nähdään, että hienorakeisemmilla maalajeilla optimivesipitoisuus on korkeampi ja kuivairtoteiheyden maksimiarvot ovat pienempiä. Kuvassa oikealla oleva käyrä kuvaa kyllästymispistettä, eli tilannetta, jossa kaikki huokokset ovat vedellä täyttyneitä.

Hiekka- ja soramateriaalit voidaan tiivistää melko korkeaan tiivyyteen millä vain vesipitoisuudella kuivan ja veden kyllästämisen tilan välissä, koska niillä kuvan 2.9 mukainen kuivairtoteiheyden kuvaaja on melko tasainen verrattuna moreeni-, siltti- ja savimateriaaleihin, joilla vesipitoisuus vaikuttaa suuresti tiivistyvyyteen. Kaikilla materiaaleilla, mutta erityisesti hienorakeisia lajitteita sisältävillä, huokosvesi sitoo kapillaarisesti partikkeleita toisiinsa, mikä vaikeuttaa niiden uudelleenjärjestäytymistä. Nämä voimat eivät vaikuta materiaalin ollessa veden kyllästämää tai täysin kuivaa. Hiekka- ja soramateriaaleilla on mahdollista saavuttaa korkea kuivairtoteiheyden jopa täysin kuivassa tilassa. (Forssblad 2000)

2.4.3 Rakeisuusjakautuman ja raemuodon vaikutus tiivyyteen

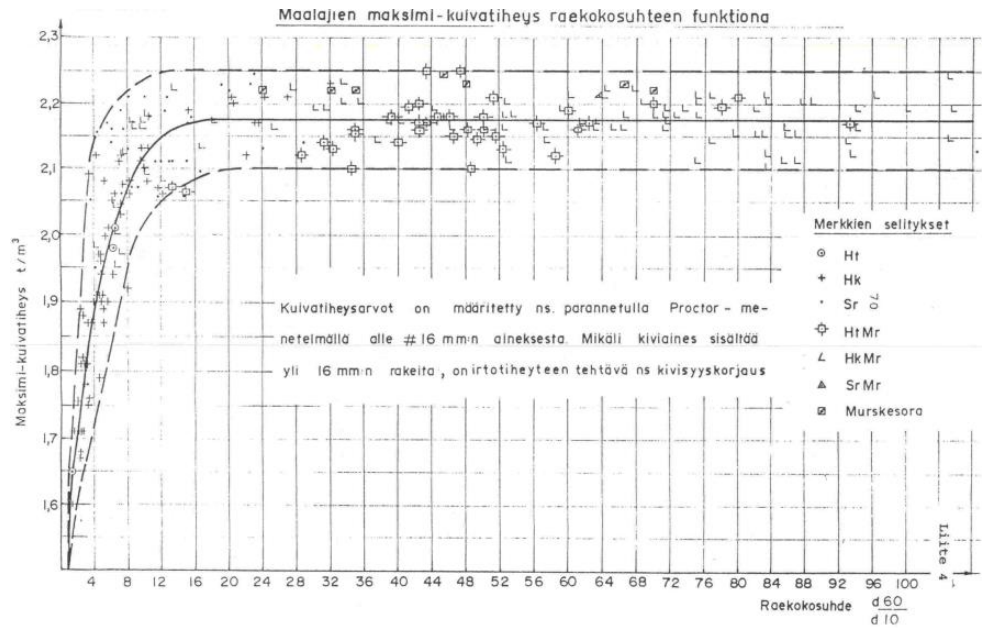
Sekarakeisella materiaalilla pienemmät rakeet täyttävät isojen rakeiden väliin jäävät raot paremmin, jolloin tyhjätilat (huokosia) on vähemmän ja kuivatilavuuspaino on suurempi. Tasarakeisilla materiaaleilla huokostilaa jää aina rakeiden väliin. Kuvassa 2.10 on havainnollistettu raekokojakauman vaikutusta huokoslukuun. (Rantamäki et al. 2009)



Kuva 2.10: Tasa- ja sekarakeisen materiaalin tiiviyden vaikutus huokoslukuun (Kalliainen et al. 2011)

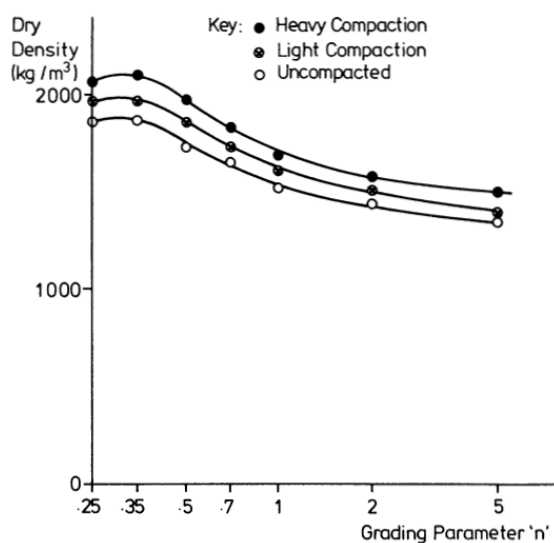
Kuvasta 2.10 nähdään kuinka pienemmät rakeet täyttävät suurempien väleihin jäävät raot ja siten pienentävät huokoslukua, vaikka suuremmat rakeet ovatkin järjestyneet kummassakin tapauksessa samalla tavalla.

Raekokosuhteen vaikutus parannetulla Proctor-kokeella saatavaan maksimikuivairtoteiheyteen eri materiaaleilla on esitetty kuvassa 2.11.



Kuva 2.11: Raekokosuhteen vaikutus eri maalajien maksimikuivairtoteiheyteen (Kuskelin et al. 1994)

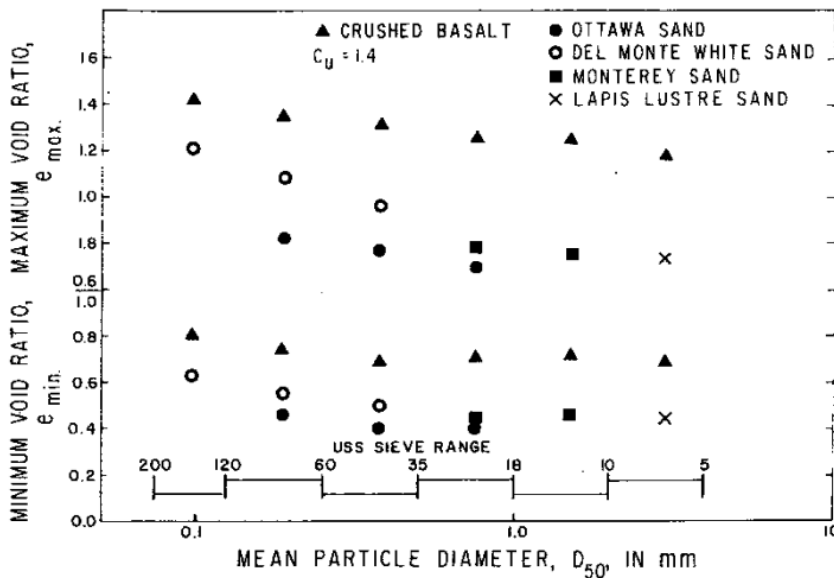
Kuvasta nähdään, että kun materiaalin raekokosuhte kasvaa ja materiaali muuttuu sekarakeisemmaksi, materiaalin huokoisuus pienenee. Kun raekokosuhte on suurempi kuin noin 16, sillä ei enää ole suurta vaikutusta tiiviyteen. Vastaava havainto on esitetty Thomin (1988) väitöskirjassa, missä tutkimusmateriaalina on ollut kuiva, maksimiraekooltaan 10 mm dolomiittikalkkikivimurske. Suurimmat kuivairtoteiheyden arvot saavutettiin materiaaleilla, joiden Fullerin parametrin n arvo on ollut noin 0,3. Kuvassa 2.12 on esitetty kuivairtoteiheyden riippuvuus tiivistystyön määrästä ja parametrissa n .



Kuva 2.12: Fullerin yhtälön parametrin n vaikutus dolomiittikalkkikivimurskeen tiiviyteen (Thom 1988)

Yleisesti ottaen sekarakeisemmilla materiaaleilla on päästy suurempiin kuivairtoteiheyksiin. Kuitenkin hyvin pienillä parametrin n arvoilla saavutettu kuivairtoteiheyks on hieman maksimiarvoa pienempi.

Keskiraekoko d_{50} vaikuttaa jossain määrin materiaalin tiivyyteen (Rantamäki et al. 2009). Kuvassa 2.13 on esitetty keskiraekoon vaikutus erilaisten hiekkamateriaalien tiiveintä ja löyhintä tilaa vastaaviin huokoslukuihin raekokosuhteen ollessa vakio.



Kuva 2.13: Keskiraekoon vaikutus tiivyyteen eri materiaaleilla (Youd 1973)

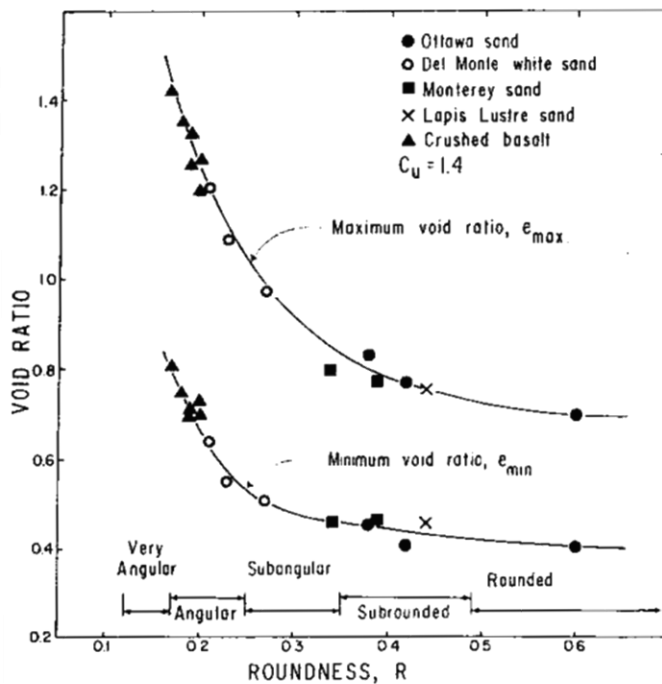
Kuvasta nähdään, että keskiraekoon vaikutus huokoisuuden ääriarvoihin on vähäinen, mutta joillakin materiaaleilla suurempi keskiraekoko johtaa hieman pienempiin huokoisuuksiin. Tämä oletettavasti johtuu siitä, että koemateriaalien karkeat rakeet olivat muodoltaan hieman hienoja rakeita pyöreämpiä.

Hiekan, hiekkaisen soran ja hiekkamoreenin tiivyyden arvioinnille on esitetty koellinen kaava 6

$$\gamma_{dmax} = 16,94 + 0,714 \ln d_{80} + 0,9124 \ln C_U, \quad (6)$$

missä Proctor-kokeella saavutettavaan maksimikuivatilavuuspainoon γ_{dmax} (kN/m^3) vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin raekokosuhte C_U ja 80% läpäisyä vastaava raekoko d_{80} millimetreinä. (Tammirinne 1972, Rantamäki et al. 2009 mukaan) Yhtälö vastaa melko hyvin kuvassa 2.11 esitettyä raekokosuhteen ja kuivairtoteiheyden riippuvuutta.

Raemuodolla on keskeinen vaikutus materiaalin huokoisuuteen ja tiivyyteen. Kuvassa 2.14 on esitetty rakeiden pyöreäyden vaikutus huokosluvun ääriarvoihin hiekkamateriaaleilla, joiden kaikkien raekokosuhte C_U on 1,4.



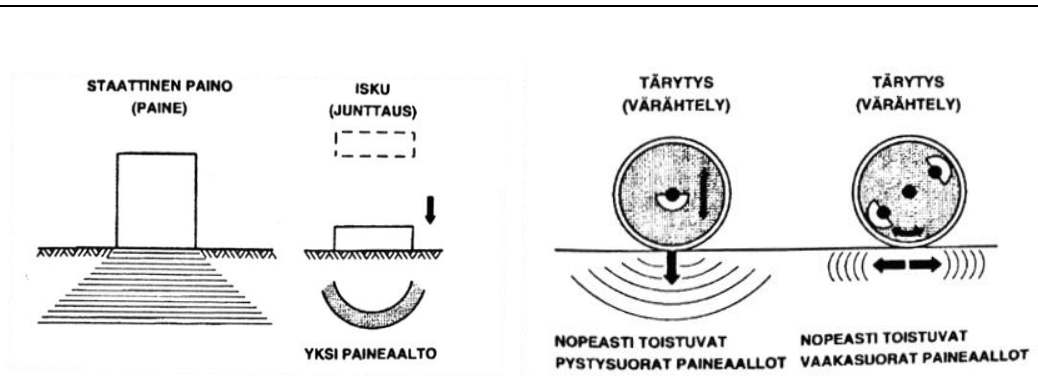
Kuva 2.14: Rakeiden pyöreiden vaikutus huokosluvun ääriarvoihin (Youd 1973)

Rakeiden pyöreyttä on Youdin (1973) tutkimuksessa kuvattu suurella R , jonka arvot ovat välillä 0–1. Arvolla 1 rakeet ovat lähes täysin pyöreitä ja arvolla 0 hyvin särmikkäitä. Kuvasta 2.14 nähdään, että hyvin särmikkäillä rakeilla huokosluku on kaikkein suurin ja se laskee rakeiden pyöreiden kasvaessa. Selkeimmin raemuoto vaikuttaa särmikkäillä ja hyvin särmikkäillä rakeilla, missä pienellä pyöreysarvon R kasvulla huokosluku pienenee selvästi. Pyöreäsärmäisillä ja pyöreillä rakeilla pyöreysarvon muutoksella on pienempi vaikutus huokoslukuun.

2.4.4 Tiivistystyö

Tiivistystyömenetelmän ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden valinta on riippuvainen tiivistettävän materiaalin rakeisuudesta. Karkearakeisilla materiaaleilla riittää pienempi tiivistystyömäärä kuin hienorakeisilla, joilla veden poistuminen huokosista on hitaampaa. Hienorakeiset materiaalit on tiivistettävä ohuemmissa kerroksissa tai suuremmalla staattisella paineella. Tiivistettävän kerroksen alustan kantavuus vaikuttaa tiivistystyön onnistumiseen. Heikolla kantavuudella tiivistysenergia kohdistuu osittain alusrakenteeseen eikä tiivistä rakennettavaa kerrosta. Alusrakenteen vaurioiden välttämiseksi tiivistystehoa olisi heikolla pohjamaalla vähennettävä. (Hartikainen 2007)

Tiivistysmenetelmät ovat joko staattisia tai dynaamisia. Kuvassa 2.15 on esitetty neljä eri tiivistysvaikutusta, joista ensimmäinen on staattinen ja kolme muuta dynaamisia.



Kuva 2.15: Neljä erilaista tiivistysvaikutusta (Hartikainen 2007)

Staattisilla tiivistysmenetelmillä tarkoitetaan rakenteen tiivistämistä tiivistyskoneen oman painon avulla. Staattisia tiivistyskoneita ovat sileävalssi-, kumipyörä- ja sorkkajyrät. Tavallista täryjyriä voidaan käyttää ilman täryä staattisena menetelmänä. Staattinen sileävalssi-jyriä tiivistää maata pystysuoralla puristusvaikutuksella. Se soveltuu ohuiden, noin 150–300 mm kitkamaakerrosten tiivistämiseen ja päällysteiden viimeistelyjyriä. Kumipyörä-jyriä tiivistää maata joustavalla puristuksella ja sullonnalla ja se aiheuttaa tiivistettävään kerrokseen pysty- ja vaakavoimia, jotka liikuttelevat kivrakeita sivusuunnassa. Suurten pyöräkuormien takia syvyysvaikutus on kumipyörä-jyriä sileävalssi-jyriä isompi. Kumipyörä-jyriä soveltuvat hyvin hienorakeisten materiaalien tiivistämiseen ja jossain määrin myös hiekan ja soran tiivistämiseen. Niitä käytetään joskus myös asfalttipäällysteen tiivistämiseen. Sorkkajyrän tiivistysvaikutus perustuu sorkkapiikkien päissä vaikuttaviin suuriin pintapaineisiin. Sorkkajyriä tiivistetään lähinnä savien ja muiden hienorakeisten materiaalien tiivistämiseen. Sileävalssi-, kumipyörä- ja sorkkajyrät voivat olla joko itsekulkevia tai vedettäviä. (Hartikainen 2007)

Dynaamiset tiivistyskoneet tiivistävät maata staattisen vaikutuksen lisäksi värähtelyä tai iskujen avulla. Tiivistyskoneen värähtely saadaan aikaan joko pyörivien epäkeskomassojen tai jaksollisesti värähtelevän massan vaikutuksesta. Pyörivän epäkeskon aiheuttaman voiman suuntautuessa ylöspäin kone irtaana osittain maasta ja sen suuntautuessa alaspäin koneen paino muuttuu moninkertaiseksi. Värähtelyn vaikutuksesta maarakkeiden väliset normaali- ja kitkavoimat pienenevät, jolloin rakeet järjestäytyvät uudelleen tiiviimpään tilaan. Dynaamisen tiivistyksen syvyysvaikutus on staattisia menetelmiä parempi. (Hartikainen 2007)

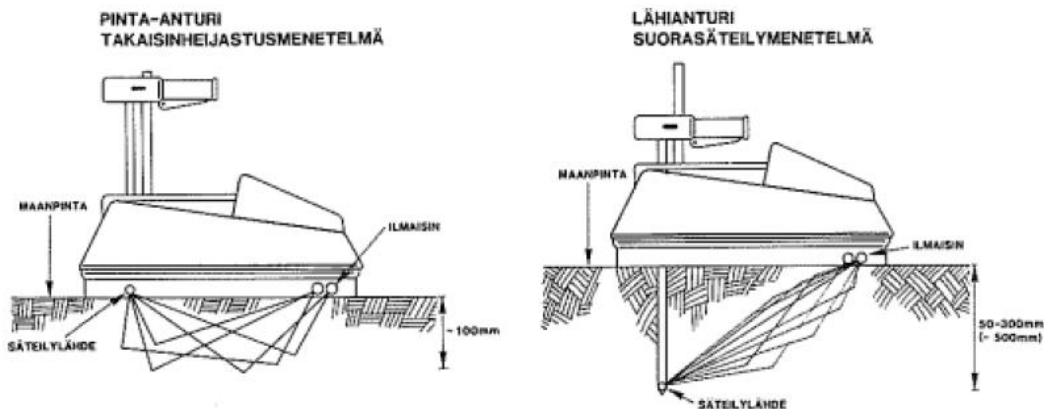
Värähtelyä kuvaavia suureita ovat taajuus ja amplitudi, joilla on kummallakin vaikutusta tiivistystyön onnistumiseen. Taajuus dynaamisissa tiivistysmenetelmissä on pieni, yleensä noin 25–60 Hz. Varsinkin kitkamaat tiivistyvät parhaiten, kun tiivistystyön taajuus on vähintään materiaalin ominaistaajuuden suuruinen, joka on noin 18–28 Hz. Suuremmalla amplitudilla saavutetaan suurempi tiivistysteho ja syvyysvaikutus, mutta se voi löyhdyttää tiivistettävän kerroksen pintaa. Hiekalle ja soralle sopiva amplitudi on usein 0,8–1,2 mm. Jos tiivistyksessä käytetään suurta amplitudia, taajuus jää silloin pieneksi. Vastaavasti taajuuden ollessa suuri, amplitudi jää pieneksi. Oskilloivassa tiivistyksessä tärytys suunnataan vaakasuorassa koneen kulkusuunnan suuntaisesti, jolloin värähtely vaikuttaa tiivistettävään kerrokseen tehokkaasti ja tiivistäen sitä tasaisesti. Myös haitalliset vaikutukset ympäristöön ja energiankulutus ovat pienempiä, kun käytetään oskilloivaa tiivistystä. (Hartikainen 2007)

Sileävalssitärjyrät soveltuvat karkearakeisten materiaalien tiivistämiseen hyvin ja niiden syvyysvaikutus voi jyrän painosta riippuen olla noin 0,5–0,6 m, mutta ras-kaimmilla jyrillä jopa 1,0 m. Tärysorkkajyrää voidaan käyttää saven tiivistämiseen sekä mahdollisesti myös talviolosuhteissa karkearakeisten maalajien tiivistämiseen. Tärylevyt soveltuvat ahtaampien kohteiden tiivistämiseen ja ne ovat massaltaan pienimmillään alle 120 kg ja enimmillään jopa 800 kg. (Hartikainen 2007)

2.5 Tiiviydsmittaukset

2.5.1 Säteilymittauslaite

Säteilymittauslaite lähettää radioaktiivista säteilyä tutkittavan kerroksen läpi laitteen säteilyn voimakkuutta mittaavaan vastaanottimeen, minkä perusteella voidaan määrittää väliaineen tiheys. Mittaus voidaan tehdä suoramittauksena työntämällä mittaustangon päässä sijaitseva säteilylähde rakenteen sisälle tai pintamittauksena, jolloin mittaustankoa ei työnnetä rakenteen sisälle. (Kalliainen et al. 2011) Säteilymittauslaite mittaa tiheyden lisäksi myös vesipitoisuutta, mutta pintamittauksella saatu arvo kuvaa ainoastaan pinnan vesipitoisuutta (InfraRYL 2020). Säteilymittauslaitteen toiminta pinta- ja suoramittauksessa on esitetty kuvassa 2.16.



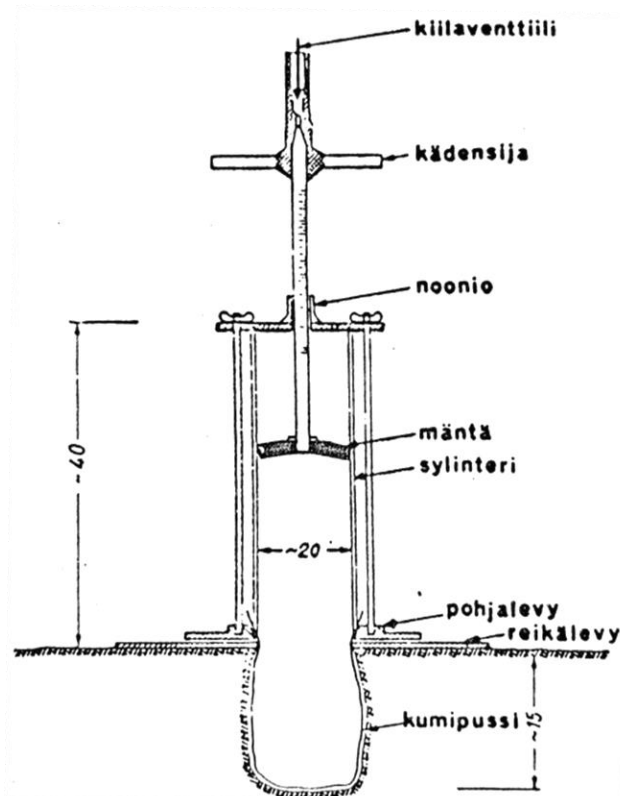
Kuva 2.16: Säteilymittauksen periaate pinta- ja suoramittauksessa (Hartikainen 2007)

InfraRYLin (2020) ohjeen mukaan säteilymittaukset tulisi tehdä mittauspisteestä 100 mm ja 250 mm syvyyksiltä, joiden tuloksista laskettu keskiarvo on sen pisteen mittaustulos. Mitattavan kohdan tiiviytenä käytetään metrin välein sijaitsevien viiden mittauspisteen kolmen keskimmäisen tuloksen keskiarvoa. Menetelmä soveltuu materiaaleille, joiden maksimirakekoko on alle 63 mm.

2.5.2 Volymetrikoe

Vesivolymetri on tiiviyden kenttämittausmenetelmä. Kokeessa rakenteen pintaan kaivetaan kuoppa, jonka tilavuus mitataan asettamalla kuoppaan kumista tehty pussi, joka täytetään vedellä. Kuopan täyttämiseen vaaditun veden määrää verrataan kuopasta kaivetun maa-aineksen massaun, jolloin saadaan maan kuivairtitiheys. Koe suoritetaan asettamalla reiällinen pohjalevy rakenteen tasaiselle pinnalle, jonka jälkeen sen päälle asetetaan kumipussi ja volymetri. Volymetrillä luodaan pussiin 0,2 barin suuruinen paine ja mitataan volymetrin alkulukema. Tämän

jälkeen reiän kohdalle kaivetaan kuoppa, jonka sisältämä maa-aines kuivataan ja punnitaan ja jonka tilavuus mitataan luomalla volymetrilla uudestaan 0,2 barin paine. Tästä lukemasta vähennetään alkulukema, jolloin saadaan kuopan tilavuus. Vesivolymetri ei sovellu hyvin karkearakeisten materiaalien tiiviiden mittaamiseen pienen näytteen ja jäykän kumikalvon takia. (Kalliainen et al. 2011) Vesivolymetrikokeen suorittamiseen käytettävän laitteiston periaatekuva on esitetty kuvassa 2.17.



Kuva 2.17: Vesivolymetrikokeen periaate (Rantamäki et al. 2009)

Vesivolymetrikokeen kaltainen koe on hiekkavolymetrikoe, jossa kaivettu kuoppa täytetään tasarakeisella hiekalla, jonka tilavuuspaino on tunnettu. Kuopan tilavuus saadaan käytetyn hiekkamäärän perusteella. Hiekkavolymetrikoe sopii vesivolymetria paremmin karkeiden materiaalien tiiviiden tutkimiseen. Riskinä siinä on kuitenkin hiekan karkaaminen tutkittavan materiaalin avonaiseen huokosiin, jolloin mitattu tiheys on todellista pienempi. (Kalliainen et al. 2011) InfraRYLin (2020) mukaan joko vesi- tai hiekkavolymetrimittausta voidaan käyttää materiaaleille, joiden enimmäisraekoko on 16 mm.

2.5.3 Itsemittaava jyrä

Itsemittaavaa jyrää voidaan käyttää sekä rakenteen tiivistämiseen että tiiviiden jatkuvatoimiseen tarkkailuun. Eri laitevalmistajilla rakenteen jäykkyyttä kuvaava suure on erilainen, mutta kaikki perustuvat valssin kiihtyvyyden mittaamiseen. Arvot kasvavat rakenteen jäykkyyden ja tiivistilän kasvaessa. Suureita ovat mm. CMV, Omega, E_{vib} ja k_b . Valssin kaksoishyppy voi aiheuttaa virheellisen mittaustuloksen rakenteen jäykkyyden ollessa suuri. Tämä tapahtuu silloin, kun valssi alkaa irrota maasta kaksoishyppynä, jolloin joka toinen hyppy on suurempi. (Kalliainen et al. 2011)

Itsemittaavien jyrien mittausdata on paikkatietoon sidottua, joten se voidaan tulostaa suunnitelmakartalle. Mittaustulokset voidaan kalibroida vastaamaan kohdeessa mitattuja pistemäisiä kantavuusarvoja, jolloin jyrämittarin tuloksista saadaan arvio koko rakenteen kantavuudesta. Toinen menetelmä hyödyntää jatkuva-toimista mittausa tiivistystyössä on jatkaa tiivistystyötä niin kauan, että mittausarvot eivät enää kasva. Mittarin mukaan heikoimmista kohdista voidaan mitata sitten kantavuudet muulla menetelmällä. Jos kantavuus heikoimmassa kohdassa on riittävä, voidaan koko rakenteen kantavuuden olettaa olevan myös riittävä. (Laukkanen et al. 2012)

2.6 Luonnonmateriaalien mekaaninen käyttäytyminen

2.6.1 Kantavuus käsitteenä

Rakenteen kuormituskestävyyttä arvioidaan etenkin tierakenteiden tapauksessa epäsuorasti kantavuuden kautta. Kantavuudella tarkoitetaan rakenteen kokonaisjäykkyyttä, jota mitataan joko levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Kantavuuden lukuarvona käytetään muodonmuutosmoduulia eli E-moduulia, jonka yksikkönä on MPa. Kantavuutta arvioidaan ja mitataan palautuvien muodonmuutosten perusteella, mutta sitä käytetään silti epäsuorasti kuvaamaan rakenteen kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Menetelmä on havaittu toimivaksi arvioimaan luonnonmateriaaleista tehdyn rakenteen toimivuutta. (Kalliainen et al. 2011)

Kantavuuden lukuarvon määrittäminen perustuu levykuormituskokeessa käytettävän ympyränmuotoisen levyn keskipisteen painumaan. Kantavuus E saadaan laskettua levykuormituskokeesta kaavalla 7

$$E = r(1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot a}{s}, \quad (7)$$

missä r on kuormituslevyn jäykkyydestä riippuva kerroin (jäykälle levylle $r = \pi/2$ ja taipuisalle levylle $r = 2$), ν on Poissonin luku, p on kosketuspaine, a kuormituslevyn säde ja s levyn keskipisteen painuma. Kaavan alkuosa $r(1 - \nu^2)$ voidaan ilmaista kertoimena k , joka käytännön mitoituksessa on yleensä 1,5. (Kalliainen et al. 2011) Levykuormituskokeita on tarkemmin käsitelty kohdassa 4.1.1 Kantavuuden mittaus levykuormituskokeella.

Kantavuutta voidaan mitata ratarakenteissa eristys- tai välikerroksen pinnalta, jolloin pystytään tarkastelemaan koko alusrakenteen laatua. Kantavuusarvo riippuu koko rakenteen jäykkyydestä ja siihen vaikuttaa myös pohjamaan ominaisuudet. Paksuilla rakenteilla pohjamaan merkitys kantavuudelle on pienempi. Kantavuuden mittauksessa levykuormituskokeen ja pudotuspainolaitemittausten vaikutus ulottuu noin metrin syvyydelle. Ratarakennetta ei Suomessa mitoiteta kantavuuteen vaan routaan perustuen. Routamitoitus johtaa Suomen olosuhteissa aina suuriin rakennepaksuuksiin. Eristys- ja välikerrosten kantavuuksille on InfraRYLissä kuitenkin annettu vaatimuksia, jotka liittyvät rakentamisen aikaiseen laadunvarmistukseen. (Kalliainen et al. 2011)

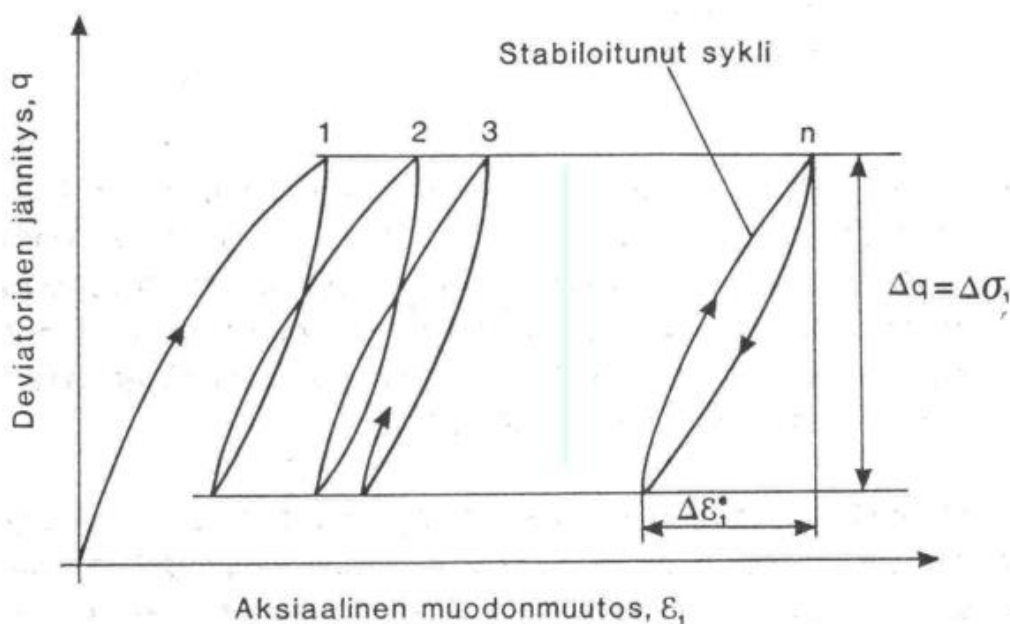
Maan mekaanisen käyttäytymisen mallinnuksessa maa ajatellaan homogeeniseksi kappaleeksi, jonka rakeista ominaisuutta ei oteta huomioon. Jännitysten ajatellaan jakautuvan tasaisesti materiaalissa. Todellisuudessa rakeiden välisissä kontaktikohdissa vaikuttaa keskimääräistä jännitystä selvästi suurempi jännitys. Jotkut rakeet saattavat olla myös täysin kuormittamattomia. Karkearakeisella maalla jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat rakeiden kontaktikohdissa vaikuttavasta kitka, partikkelien kimmo-ominaisuudet ja niiden lujuus. Rakeiden kimmoiset muodonmuutokset ovat rakenteessa palautuvia. Rakeiden välisestä liukumista ja rakeiden murtumisesta johtuvat muodonmuutokset ovat palautumattomia. (Kolisoja 1996)

Maarakenteen jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat jännitystila maassa, tiiviystila, kosteustila, raekokojakauma, maksimiraekoko, hienoainesmäärä, rakeisuuskäyrän muoto, raemuoto, rakeiden pinnan karkeus, kiviaineksen kimmomoduuli ja lämpötila. (Kolisoja 1996)

2.6.2 Palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen

Linearisesti kimmoisan materiaalin palautuvia muodonmuutoksia voi laskea Hooeken lakiin perustuvalla mallilla. Sitomattomien materiaalien käyttäytyminen on kuitenkin todellisuudessa epälineaarista. Jos rakennekerroksien jäykkyyttä halutaan kuitenkin arvioida lineaarisen mallin mukaan, tulisi materiaalin E-moduuli määrittää todellista kuormitusta vastaavalle jännitysvälille. (Kolisoja 1993)

Resilient-moduulin M_r avulla voidaan paremmin arvioida sitomattoman materiaalin palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä. Sen arvo voidaan määrittää syklisellä kolmiaksaalikokeella, jonka periaate on tarkemmin kuvattu kohdassa 2.7.1. Kolmiaksaalikoe. Kokeessa syklisen kuormituksen edetessä materiaalin käyttäytyminen muuttuu kimmoiseksi, kun siihen ei enää muodostu pysyviä muodonmuutoksia. Tästä stabiloituneesta syklistä määritetään resilient-moduulin arvo kuvan 2.18 mukaisesti.



Kuva 2.18: Resilient-moduulin määrittäminen toistokuormituskokeesta (Kolisoja 1993)

Sykliisessä kolmiakiaalikokeessa määritetty resilient-moduulin arvo määritetään kaavalla 8

$$M_r = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon^e}, \quad (8)$$

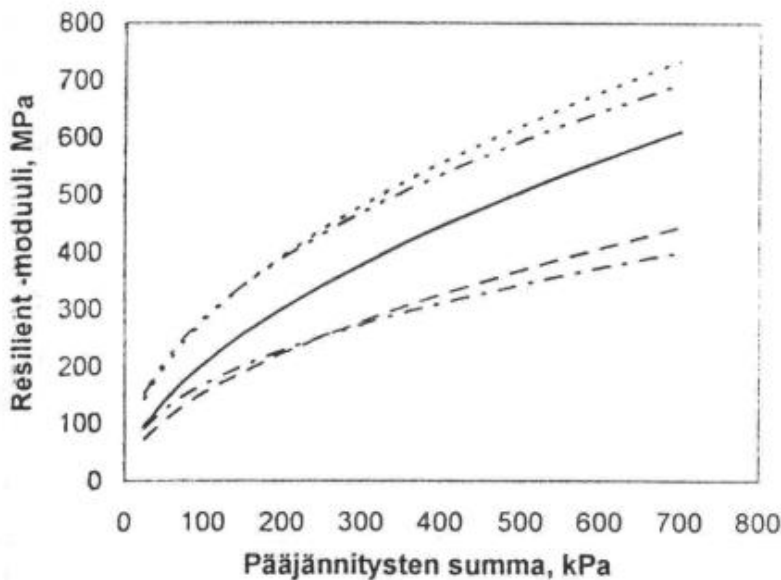
missä Δq on deviatorisen jännityksen vaihteluväli ja $\Delta \varepsilon^e$ on tätä vastaava palautuva suhteellinen muodonmuutos. Resilient-moduulin suuruus riippuu kuitenkin myös pääjännitysten suuruudesta. Pääjännitysten vaikutus resilient-moduuliin voidaan huomioida esimerkiksi K- θ -mallin mukaisella kaavalla 9

$$M_r = K_1 \theta^{K_2}, \quad (9)$$

missä K_1 ja K_2 ovat materiaaliparametreja ja θ on pääjännitysten summa silloin, kun deviatorisen jännityksen q arvo on maksimissaan. Kaavan 9 mukainen yhtälö saadaan yksiköiltään toimivaksi käyttämällä vertailujännitystä θ_0 kaavan 10 mukaisesti.

$$M_r = K_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (10)$$

Vertailujännityksen θ_0 suuruutena käytetään yleensä arvoa 100 kPa. (Kolisjoja 1993) Kuvassa 2.19 on esitetty pääjännitysten summan ja resilient-moduulin välinen yhteys tierakenteen eräillä kantavan kerroksen materiaaleilla.

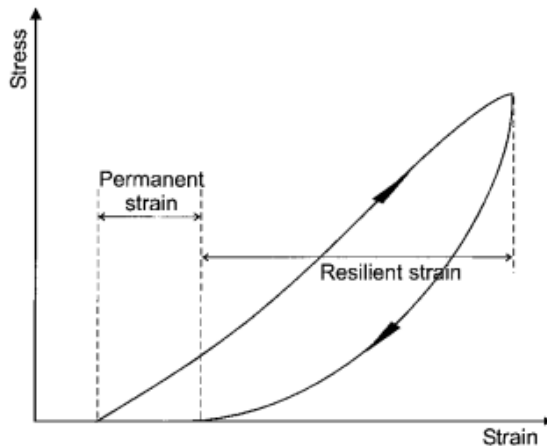


Kuva 2.19: Pääjännitysten ja resilient-moduulin yhteys tierakenteen eräillä kantavan kerroksen materiaaleilla (Kolisjoja 1996)

Kuvasta havaitaan, että jännitystilän vaikutus resilient-moduuliin on suuri. Jännitystila ei kuitenkaan ole ainoa vaikuttava tekijä. Jännitystilaa ja muita sitomattoman materiaalin jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä käsitellään tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.

2.6.3 Palautumaton muodonmuutuskäyttäytyminen

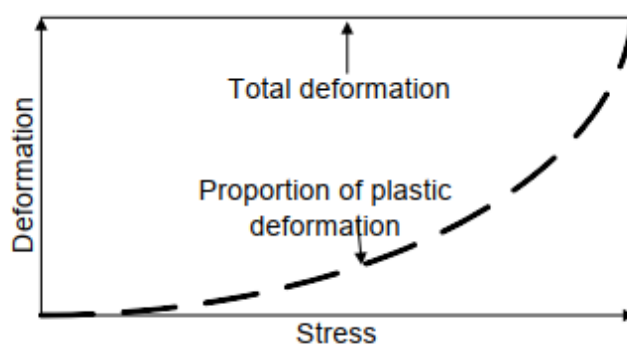
Rakenteen muodonmuutokset kuormituksen alla jakautuvat pysyviin (plastinen) ja palautuviin (elastinen) muodonmuutoksiin. Pysyvät muodonmuutokset voivat johtua materiaalin tiivistymisestä, leikkausmuodonmuutoksista, pohjamaan muodonmuutoksista tai rakeiden rikkoutumisesta. Tyypillisesti pysyvät muodonmuutokset koostuvat näiden eri mekanismien yhteisvaikutuksesta. (Korkiala-Tanttu 2008) Kuvassa 2.20 on esitetty periaatekuva rakenteen muodonmuutoksista yhden kuormituskerran aikana.



Kuva 2.20: Yhden kuormituskerran aikana syntyvät pysyvät ja elastiset muodonmuutokset (Lekarp et al. 2000)

Kuvasta nähdään kuinka kuormituksen aiheuttama muodonmuutos ei täysin palaudu takaisin. Alku- ja lopputilojen erotuksena saadaan pysyvä muodonmuutos.

Matalilla jännitystasoilla materiaalin käyttäytyminen on pääosin elastista ja pysyvät muodonmuutokset ovat vähäisiä. Jännitystason kasvaessa pysyvien muodonmuutosten osuus kokonaismuodonmuutoksista kasvaa kuvan 2.21 havainnollistamalla tavalla. (Korkiala-Tanttu 2008)



Kuva 2.21: Pysyvien ja palautuvien muodonmuutosten osuus jännitystason mukaan (Korkiala-Tanttu 2008)

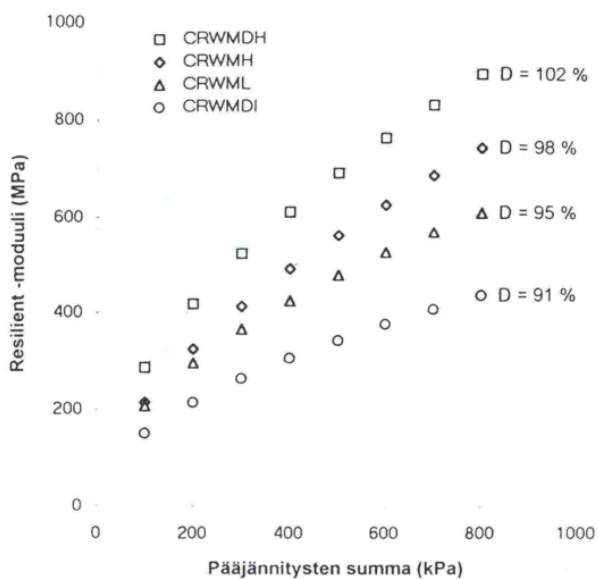
2.6.4 Jännitystilän vaikutus materiaalin jäykkyyteen

Suurin jäykkyyteen vaikuttava tekijä on tarkastelukohdassa vaikuttava jännitystila. Muodonmuutosmoduuli kasvaa pääjännitysten kasvaessa ja pienenee deviatorisen jännityksen kasvaessa. Jännitystilän vaikutusta resilient-moduuliin käsiteltiin kohdassa 2.6.2. Jännitystilän kasvu aiheuttaa partikkelien kontaktikohdissa olevien voimien kasvun, ja samalla myös partikkelien väliset kosketuspinta-alat kasvavat, mikä taas johtaa pienempiin muodonmuutoksiin. Partikkelien välinen kitkavoima voidaan määrittää kontaktikohdassa vaikuttavan normaalivoiman ja kitkakulman tangentin tulona. Jännitystilän kasvu johtaa normaalivoimien kasvuun, jolloin myös liukumista vastustava kitkavoima kasvaa. (Kolisoja 1996)

Kun deviatorisen jännityksen kasvun seurauksena jännitys raekontaktissa ylittää tietyn raja-arvon, tapahtuu liukuma, jolloin rakenteessa tapahtuu uudelleenjärjestymistä eli pysyvä muodonmuutos. Uudelleenjärjestymisen seurauksena rakeiden välille muodostuu uusia kontaktipintoja, joissa deviatorinen jännitys voi aiheuttaa edelleen rakeiden liukumia, kunnes saavutetaan uusi tasapainotila, jossa liukumia ei enää tapahdu. Jos tasapainotilaa ei saavuteta vaan muodonmuutokset jatkavat kasvuaan vakiokuormituksella, rakenne murtuu. (Kolisoja 1996)

2.6.5 Tiiviyyden vaikutus materiaalin jäykkyyteen

Tiivistila on jännitystilän ohella tärkein muodonmuutosmoduuliin vaikuttava tekijä. Mitä tiiviimmässä tilassa rakenne on, sitä enemmän kontaktikohtia kullakin rakeella on ja voimat yksittäisissä kontaktipisteissä ovat pienempiä. Alhaisemmilla kontaktivoimilla rakeiden kimmoiset muodonmuutokset ovat pienempiä. Tiiviissä rakenteessa maapartikkeleilla on löyhää rakennetta vähemmän tilaa liikkuu toistensa suhteen, jolloin uudelleenjärjestymistä ei pääse tapahtumaan yhtä helposti. (Kolisoja 1996) Kuvassa 2.22 on esitetty resilient-moduulin riippuvuus jännitystilasta eri tiivystiloissa olevalla kalliomurskeella.



Kuva 2.22: Tiivystilän vaikutus resilient-moduuliin eräällä kalliomurskeella (Kolisoja 1996)

Kuvan tutkimuksen koemateriaalilla tiivysteen kasvattaminen 91 %:sta 102 %:iin johti resilient-moduulin kaksinkertaistumiseen.

2.6.6 Raekokojakauman vaikutus materiaalin jäykkyyteen

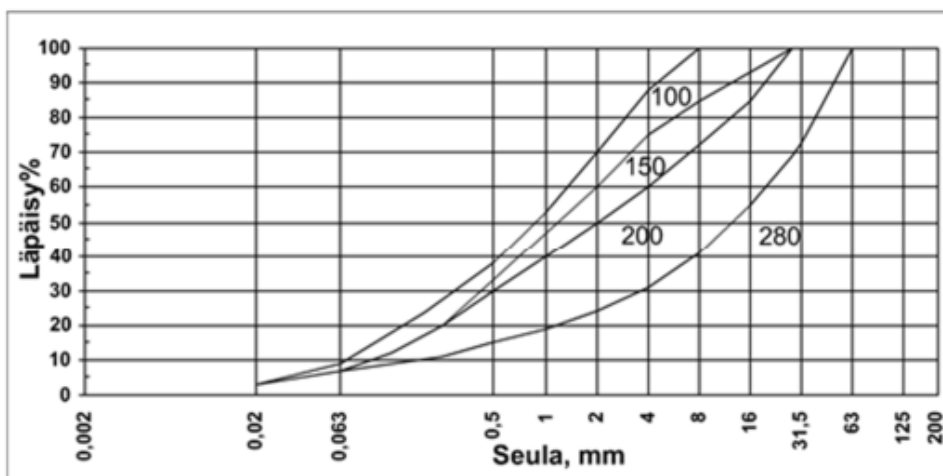
Rakeisuuden kannalta keskeisimmät materiaalin jäykkyyteen vaikuttavat tekijät ovat hienoaineksen määrä, maksimiraekoko ja rakeisuuskäyrän muoto. Karkearaakeisilla mailla kuormat välittyvät isompien rakeiden muodostaman raerungon välityksellä ja hienompi aines on niiden välisissä huokosissa. Materiaali käyttäytyy sitä jäykemmin, mitä suurempien rakeiden kautta kuormat välittyvät. Hienoaines alentaa materiaalin jäykkyyttä, jos sen suuren pitoisuuden takia isommat rakeet eivät pysty olemaan kontaktissa toistensa kanssa. Tällöin raerungon jäykkyys alenee ja materiaalin käyttäytyminen on lähempänä hienorakeisen maan käyttäytymistä. (Kolisoja 1996)

Hienoaines voi sen laadusta riippuen sitoa itseensä paljon vettä muodostaen vesivaippoja. Isompien rakeiden väleihin joutuessaan vesivaipat alentavat raerungon jäykkyyttä. Hienoaineksen vedenläpäisevyys on heikkoa, joten huokosvesi ei pääse nopeasti muuttuvan kuormituksen aikana poistumaan rakenteesta, jolloin muodostuu huokosveden ylipaine. Siitä seuraa tehokkaiden jännitysten laskeminen ja sitä kautta jäykkyyden aleneminen. (Kolisoja 1996)

Liian lajittuneella eli tasarakeisella materiaalilla hienompi aines on isompien rakeiden välissä löyhässä tilassa tiivistyksen jälkeenkin. Rakenteen tiheys ja sen seurauksena myös jäykkyys on tällöin alhaisempi kuin suhteistuneella materiaalilla. Hyvin suhteistuneella materiaalilla suuremmat rakeet muodostavat raerungon ja hienompi aines täyttää niiden välit, jolloin rakenteen tiheys on suuri. (Kolisoja 1996)

Tasarakeinen materiaali ei tiivisty yhtä hyvin kuin suhteistunut, minkä takia hyvin kantavassa materiaalissa eivät yksittäiset raekoot saisi olla yliedustettuina. Luonnonmateriaaleilla tämä ongelma esiintyy esimerkiksi silloin, kun sorassa hiekkalajitteiden määrä on suuri. Sorarakeiden välissä oleva tasarakeinen hiekka tiivistyy huonosti. Hiekan suuri määrä aiheuttaa myös sen, että isommat rakeet eivät pysty muodostamaan jäykkää raerunkoa toistensa kanssa. (Kolisoja 1996)

Tierakenteen suunnitteluohjeessa (Liikennevirasto 2018b) on esitetty luonnonSORIEN ja soraisten hiekkojen E-moduulin arviointiin käytettävä ohjekäyrästä, joka on esitetty kuvassa 2.23.



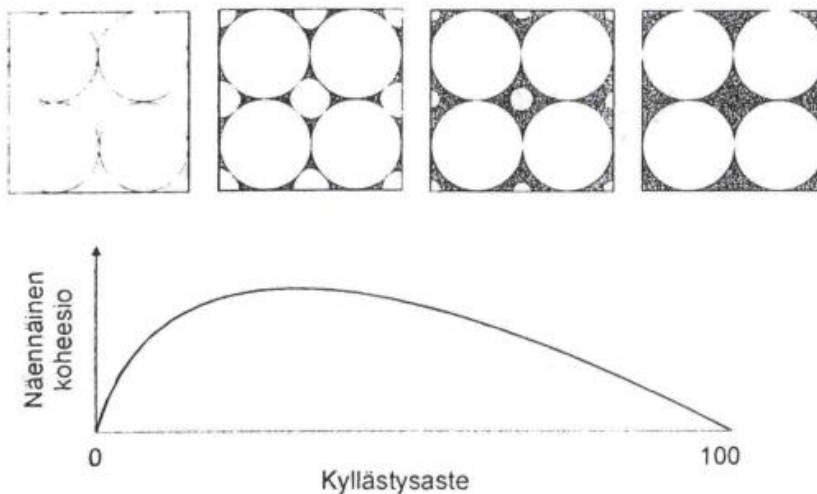
Kuva 2.23: Tierakenteen suunnitteluohjeessa esitetty E-moduulin arviointikäyrästä (Liikennevirasto 2018b)

Kuvasta nähdään, että karkearakeisilla materiaaleilla, joiden rakeisuuskäyrät ovat muodoltaan roikkuvia, saavutetaan parhaat E-moduulit. Materiaalin E-moduuli on alhaisempi, kun materiaali on hienorakeisempaa ja rakeisuuskäyrä on suurempi tai jopa ylöspäin kupera.

2.6.7 Kosteustilan vaikutus materiaalin jäykkyyteen

Kosteus vaikuttaa karkearakeisen maan jäykkyyteen näennäisen koheesion kautta, joka selittyy veden pinnan suuntaisesti vaikuttavalla veden pintajännityksellä. Kiviainesten hydrofiilisyyden takia huokosissa oleva vesi pyrkii levittäytymään kiviaineksen pinnalle. Pienillä vesipitoisuuksilla huokosissa oleva vesi hakeutuu rakeiden välisiin kontaktikohtiin huokoskulmavedeksi. Veden pintajännitys vaikuttaa pintaa vastaan kohtisuorassa, jolloin rakeiden välissä oleva huokoskulmavesi aiheuttaa rakeita toisiaan vastaan puristavan voiman. (Kolisoja 1996)

Täysin kuivassa maassa ei ole huokosvettä, eikä silloin myöskään näennäistä koheesiota. Vesipitoisuuden kasvaessa kasvaa aluksi myös näennäinen koheesio. Tietyn vesipitoisuuden ylittyessä huokoskulmavedet rakeiden väleissä yhdistyvät, jolloin niiden väliin muodostuu ilmakuplia. Ilman ja veden välille muodostuva pintajännityksestä johtuva vetovoima aiheuttaa rakeita toisiaan vasten vetävän alipaineen huokosveteen. Tietyn vesipitoisuuden ylittyessä ilmakuplat häviävät kokonaan, jolloin näennäisen koheesion vaikutus lakkaa kokonaan. Kuvassa 2.24 on havainnollistettu kyllästysasteen periaatteellista vaikutusta näennäiseen koheesioon.



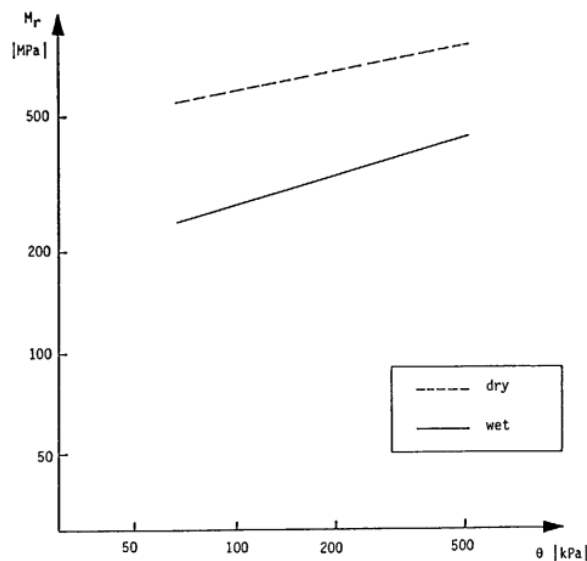
Kuva 2.24: Kyllästysasteen vaikutus näennäiseen koheesioon (Kolisoja 1996)

Kuvasta nähdään, kuinka näennäistä koheesiota ei ole silloin, kun materiaali on täysin kuiva tai täysin kyllästynyt. Suurimmillaan näennäinen koheesio on alle 50% kyllästysasteella. Näennäinen koheesio voidaan teoriassa ottaa helposti mukaan muodonmuutosmoduulin arviointiin lisäämällä se kaavan 10 pääjännitykseen (Kolisoja 1996).

Kosteuden vaikutus jäykkyyteen riippuu kiviaineksen rakeisuudesta ja kosteuden määrästä. Vaikutus on suurempi paljon hienoainesta sisältäville materiaaleille. Karkearakeisille materiaaleille, joissa ei ole mukana hienoainesta, näennäisen koheesion vaikutus on käytännössä merkityksetön. Sekarakeiselle materiaalille vaiku-

tusta ei voida yksiselitteisesti arvioida. (Kolisaja 1996) Materiaaleilla, joilla rasitukset välittyvät kantavan raerungon kautta, kosteuden vaikutus on pienempi kuin materiaaleilla, joilla rasitukset välittyvät hienoainesmatriisin kautta (Sweere 1990).

Hiekoilla jäykkyyden on Sweeren (1990) tutkimuksessa todettu kasvavan, kun niiden vesipitoisuus laskee materiaalin kuivuessa. Vesipitoisuuden vaikutus jäykkyyteen ei kuitenkaan ole hiekoilla yhtä suuri kuin paljon savilajitteita sisältävillä materiaaleilla. Soramateriaalilla, johon oli sekoitettu savilajitteita sisältävää materiaalia, havaittiin jäykkyyden merkittävä kasvu, kun vesipitoisuutta laskettiin 4,9 %:sta 1,6 %:iin. Jäykkyyden on havaittu kasvavan materiaalin kuivuessa myös kalliomurskeilla. Kuvassa 2.25 on esitetty resilient-moduulin kuvaajat samalla kalliomurskeella noin 2 % ja alle 1 % vesipitoisuuksissa. (Sweere 1990)

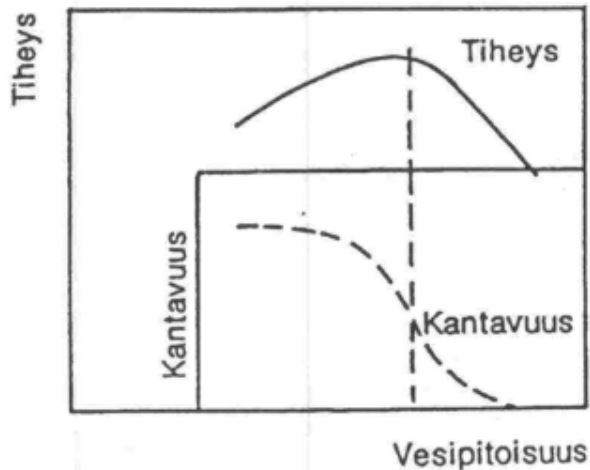


Kuva 2.25: Vesipitoisuuden vaikutus resilient-moduuliin kalliomurskeella (Sweere 1990)

Havaittu vaikutus jäykkyyteen on merkittävä siitä huolimatta, että materiaali on kalliomursketta, jonka hienoainespitoisuus on melko alhainen. Materiaalin hienoaineksen kuitenkin havaittiin sisältäneen savilajitteita, mikä selittää näennäisen koheesion vaikutusta. (Sweere 1990)

Vesipitoisuus voi vaikuttaa rakenteen kantavuuteen myös laskevasti. Täysin veden kyllästävässä materiaalissa voi kehittyä ulkoisen kuormituksen alla huokosveden ylipaine silloin, kun materiaalin vedenläpäisevyys on pieni verrattuna kuormitusnopeuteen. Vesi ei pääse purkautumaan, jolloin huokosvedeen muodostuu ylipainetta. Huokosvedenpaineen kasvu johtaa tehokkaiden jännitysten laskemiseen. (Kolisaja 1996) Kuivatuksen toimiessa korkeimpana rakenteessa esiintyvänä vesipitoisuutena voidaan pitää parannelulla Proctor-kokeella määritettyä optimivesipitoisuutta (Sweere 1990).

Kuvassa 2.26 on esitetty periaate vesipitoisuuden vaikutuksesta kantavuuteen hienorakeisilla materiaaleilla.



Kuva 2.26: Vesipitoisuuden vaikutus kantavuuteen ja tiiviyyteen hienorakeisilla materiaaleilla (Kuskelin et al. 1994, muokattu)

Kuvasta nähdään, että vesipitoisuus, jossa materiaali saadaan tiivistettyä tiiviimpään tilaan, on korkeampi kuin vesipitoisuus, jossa saavutetaan paras kantavuus. Rakenteen kantavuus kasvaa sen kuivuessa. Optimivesipitoisuutta suuremmilla vesipitoisuuksilla sekä saavutettava tiheys että kantavuus heikkenevät merkittävästi.

2.6.8 Muita materiaalin jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä

Muita materiaalin jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. raemuoto, rakeiden pinnankarkeus, kiviaineksen kimmo-ominaisuudet ja lämpötila. Raemuodon vaikutusta jäykkyyteen ei tarkkaan tunneta ilmiön mittaamisen vaikeuden takia. Raemuoto kuitenkin vaikuttaa rakenteen tiivistyvyyteen, minkä takia sillä on epäsuorasti vaikutus myös jäykkyyteen. Raemuoto ja raepintojen karkeus ovat tekijöitä, jotka selvästi erottavat luonnonmateriaalit murskatuista kiviaineksista. Raepintojen karkeus vaikuttaa materiaalin jäykkyyteen rakeiden pintakitkakulman kautta. Palautuvat muodonmuutokset johtuvat maarakenteessa kiviaineksen kimmoisista muodonmuutoksista, jolloin kiviaineksen kimmo-ominaisuudet suoraan vaikuttavat koko rakenteen toimintaan. Niiden tarkkaa vaikutusta on kuitenkin hyvin vaikea ottaa laskennallisesti huomioon. Lämpötilan vaikutus materiaalin jäykkyyteen on pieni lukuun ottamatta huokosissa olevan veden jäätyminen aiheuttamaa jäykkyyden merkittävää kasvua. (Kolisoja 1996)

Joillakin karkearakeisilla kiviaineksilla jäykkyyttä voi kasvattaa sementoitumisilmiö. Sementoitumisessa veden vaikutuksen alaisena olleeseen kiviainekseen muodostuu partikkelien välillä vaikuttavia jäykkyyttä ja lujuutta kasvattavia sidoksia. Ilmiön jäykkyyttä lisäävä vaikutus voi kadota yksittäisten kuormitusimpulssien vaikutuksesta. Oletettavasti sementoitumisilmiön vaikutus suomalaisten kiviainesten muodonmuutuskäyttäytymiseen on melko pieni. (Kolisoja 1993)

2.6.9 Luiskan läheisyyden vaikutus kantavuuteen

Kalliainen et al. (2011) tutkimuksessa tehtiin levykuormituskokeita 1 m, 2 m ja 2,7 m etäisyydellä ratapenkereen reunasta sekä penkereen keskilinjalta. Varsinkin kalliomurskeista rakennetuilla penkereillä tehtiin havainto, että läheltä penkereen reunaan tehdyissä levykuormituskokeissa tulokset ovat heikompia kuin keskeltä penkertä. Luonnonmateriaaleilla vaikutus oli selvästi vähäisempi.

2.6.10 Kantavuusarvojen laskennallinen käsittely

Tierakenteen suunnitteluohjeessa (Liikennevirasto 2018b) kantavuusmitoitus tehdään Odemarkin kaavalla

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \left(\frac{h}{0,15}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}, \quad (11)$$

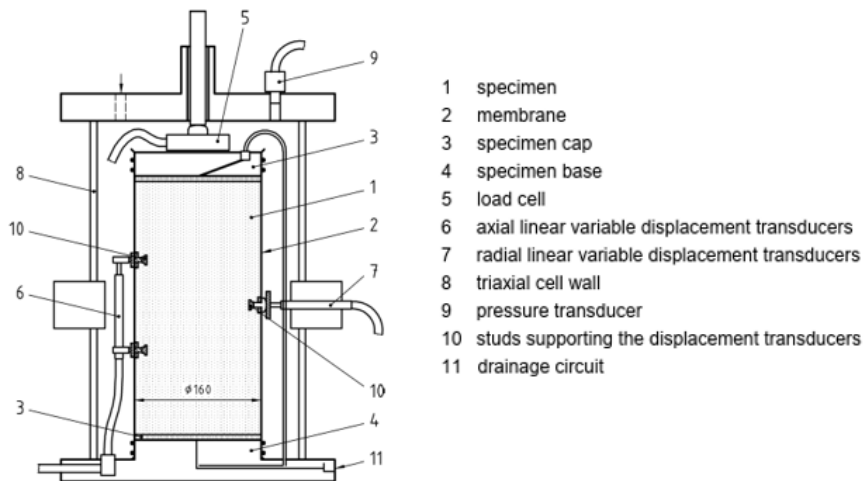
missä E_Y on mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus, E_A saman kerroksen alapinnan kantavuus, E kerroksen materiaalin jäykkyyttä kuvaava moduuliarvo ja h mitoitettavan kerroksen paksuus. Kaavassa arvo 0,15 tarkoittaa levykuormituskokeessa käytettävän kuormituslevyn sädettä metreinä, minkä oletetaan vastaavan tierakennetta kuormittavan pyörän kosketuspinnan sädettä. Mitoitus etenee kerroksittain siten, että ensimmäisen kerroksen alapinnan kantavuus on pohjaan kantavuus. Seuraavan kerroksen alapinnan kantavuus on edellisen kerroksen yläpinnan kantavuus. Kerrospaksuuden täytyy mitoituksessa olla vähintään 150 mm ja enintään 300 mm. Tätä paksummat kerrokset jaetaan pienempiin osiin mitoituksessa. Mitoitusmenetelmän toimivuuden kannalta sitomattoman kerroksen E -moduuli saa olla enintään kuusi kertaa kerroksen alapinnan kantavuus E_A . (Liikennevirasto 2018b)

Tierakenteen mitoituksessa kerroksen päältä Odemarkin kaavalla saatavan kantavuuden oletetaan vastaavan levykuormituksesta saatua E_2 -moduulia. Mitoituksessa materiaalien E -moduuleille annetaan vakioarvot, vaikka todellisuudessa materiaalin jäykkyys on jännitystilasta riippuvainen. (Kolisjoja 1993)

2.7 Materiaalin jäykkyyden mittaus laboratoriossa

2.7.1 Kolmiaksaalikoe

Kolmiaksaalikokeessa maanäytettä kuormitetaan olosuhteissa, jotka pyritään luomaan mahdollisimman hyvin todellista kuormitustilannetta vastaaviksi. Karkearakeisille materiaaleille tehtävässä kokeessa näyte rakennetaan sylinterin muotoiseen muottiin ja tiivistetään kerroksittain. Näyte verhoillaan sivuilta vettä läpäisemättömällä kalvolla ja asetetaan koeselliin, missä näytteeseen kohdistetaan joka suunnassa yhtä suuret pääjännitykset näytettä ympäröivän ilman- tai nesteen paineella. Näytteeseen kohdistetaan pystysuora jännitys puristamalla sitä päätylevyjen välityksellä. Pystysuoran jännityksen suuruus on puristuksesta aiheutuvan jännityksen ja sellipaineen summa. Kokeessa voidaan lisäksi mitata näytteeseen muodostuvaa huokosvedenpainetta. (Rantamäki et al. 2009) Kolmiaksaalikokeen periaate on esitetty kuvassa 2.27.

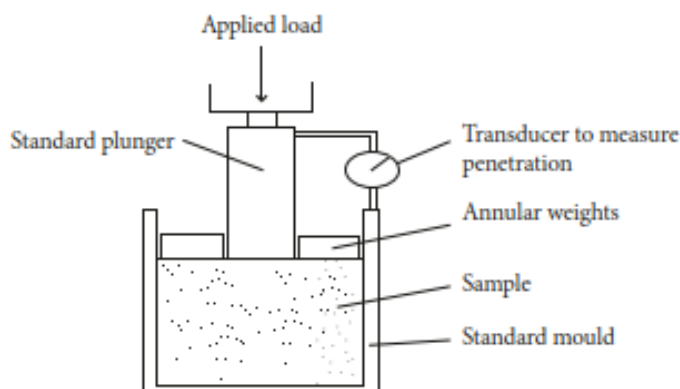


Kuva 2.27: Kolmiakσιαalikoelaitteisto (SFS-EN 13286-7, muokattu)

Kolmiakσιαalikoe voidaan tehdä staattisena tai syklisenä kokeena, joista syklinen koe on eniten käytetty laboratoriotutkimusmenetelmä karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksien tutkimiseen. Syklisessä kokeessa koekappaleta kuormitetaan syklisesti staattista kolmiakσιαalikoetta suuremmalla kuormitusnopeudella. Mitattavia suureita ovat sellipaine, aksiaalinen kuormitus, aksiaalinen muodonmuutos, vaakasuuntainen muodonmuutos ja kyllästetyllä näytteellä huokosvedenpaine ja mahdollinen takapaine. (Kolisoja 1993) Syklinen kolmiakσιαalikoe voidaan tehdä joko vakio- tai muuttuvaselipainekokeena. Vakioselipainekokeessa sellipaine pidetään koko kokeen aikana vakiona. Todellista maarakenteen kuormitusta paremmin vastaa muuttuvaselipainekoe, missä aksiaalisen kuormituksen aikana sellipaine muuttuu. (Alkio et al. 2001)

2.7.2 California Bearing Ratio (CBR)

CBR on Kaliforniassa 1930-luvulla alun perin tiepenkereen ja tien rakennekerrosten kantavuuden arviointiin kehitetty empiirinen koemenetelmä. CBR on moneen muuhun koemenetelmään verrattuna nopea ja yksinkertainen tehdä, ja sitä voidaan soveltaa useille eri materiaaleille savesta soraan. Kokeessa pyöreeä mäntää työnnetään muotissa olevaan häiriintymättömään tai tiivistettyyn maahan vakionopeudella 1 mm/min ja mitataan työntämiseen tarvittavaa voimaa. Mäntän halkaisija on 50 mm ja muotin 152 mm. (Head & Epps 2010) Kuvassa 2.28 on esitetty CBR-kokeen koejärjestelyn periaate.



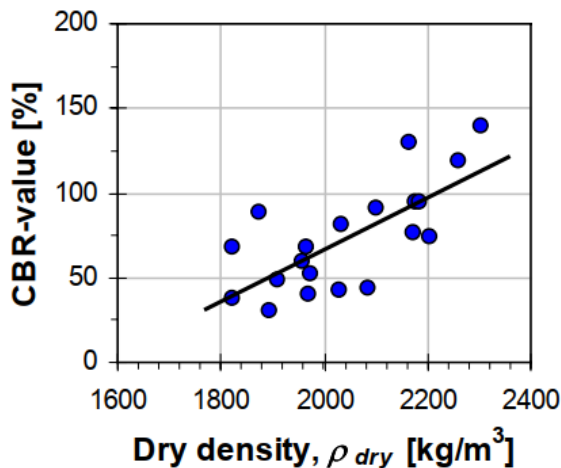
Kuva 2.28: CBR-kokeen periaate (Arshad, 2019)

Männän työntämiseen tarvittavaa voimaa verrataan standardivoimaan 2,5 mm ja 5,0 mm painumien kohdalla kaavan 12 mukaisesti.

$$CBR = \frac{\text{mitattu voima}}{\text{standardivoima}} 100\%, \quad (12)$$

Standardivoima 2,5 mm painuman kohdalla on 13,2 kN ja 5,0 mm painuman kohdalla 20,0 kN. Korkeampi kahdesta suhdeluvusta on näytteen CBR-arvo. (Head & Epps 2010)

Kokeesta saatava tulos riippuu kullakin materiaalilla kuivairtitiheydestä, johon materiaali on tiivistetty sekä vesipitoisuudesta. Suuremmalla kuivairtitiheydellä päästään suurempiin CBR-arvoihin. Kuivairtitiheyden pysyessä vakiona, CBR-arvo laskee vesipitoisuuden kasvaessa etenkin optimivesipitoisuutta suuremmilla vesipitoisuuksilla. (Head & Epps 2010) Erlingssonin (2011) tutkimuksessa tyypillisille tien rakennekerrosmateriaaleille tehtyjen CBR-kokeiden perusteella havaittiin kuvassa 2.29 esitetty kuivairtitiheyden ja CBR-arvon yhteys.



Kuva 2.29: Kuivairtitiheyden vaikutus CBR-arvoon (Erlingsson 2011)

Yleensä CBR-koe pyritään tekemään kenttäolosuhteita vastaavassa tiiviys- ja kosteusolossaan. Koe voidaan myös tehdä in-situ-kokeena, jossa mäntää työnnetään suoraan maahan. In-situ-kokeiden tulokset eivät ole täysin vastaavat laboratorio-kokeiden tulosten kanssa. (Head & Epps 2010) Tulosten eroavaisuus johtuu erilaisesta sivuttaistuesta ja huokosveden ylipaineen erilaisesta purkautumisesta. Laboratorionäytteestä joudutaan myös poistamaan tiettyä raekokoa suuremmat rakeet, joilla on merkittävä vaikutus muodonmuutoskäyttäytymiseen. (Kolisoja 1993a)

CBR-arvon ja resilient-moduulin välille on esitetty erilaisia yhteyksiä. Etenkin karkearakeisilla materiaaleilla resilient-moduuli on riippuvainen jännitystasosta, mutta CBR-koe antaa materiaalille tulokseksi vakioarvon. Tästä syystä resilient-moduulia ei voida luotettavasti arvioida CBR:n perusteella. (Kolisoja 1993a)

Kaavoissa 13–16 on esitetty neljä ehdotettua yhteyttä CBR-arvon ja resiliient-moduulin välille.

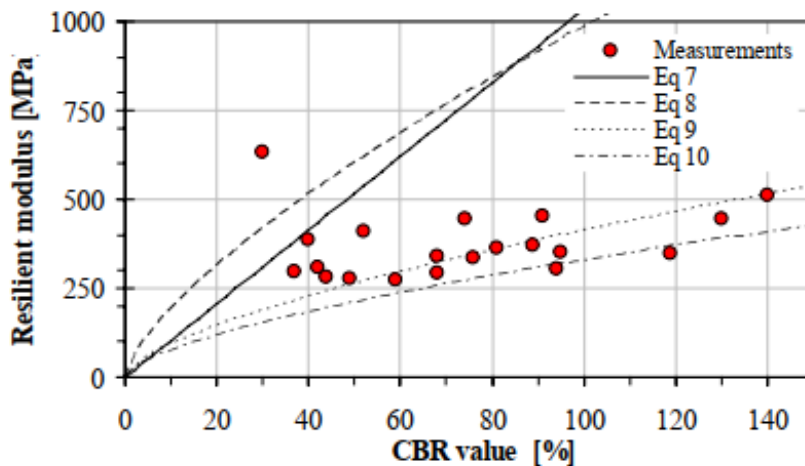
$$M_r = 10,35CBR \quad (13)$$

$$M_r = 37,3CBR^{0,711} \quad (14)$$

$$M_r = 20,7CBR^{0,65} \quad (15)$$

$$M_r = 17,25CBR^{0,64} \quad (16)$$

Kaavat ovat järjestyksessä seuraavien organisaatioiden kehittämiä: Shell Oil, U.S. Army corps of Engineers, South African Council on Scientific and Industrial Research ja Transport and Road Research Laboratory. (Witczak et al. 1995, Erlingsson 2011 mukaan) Kuvassa 2.30 on esitetty yhtälöiden mukaiset korrelaatiot sekä Erlingssonin (2011) tutkimuksessa määritetyt yhteydet, kun kolmiakiaalikokeen hydrostaattinen jännitys on ollut 250 kPa.

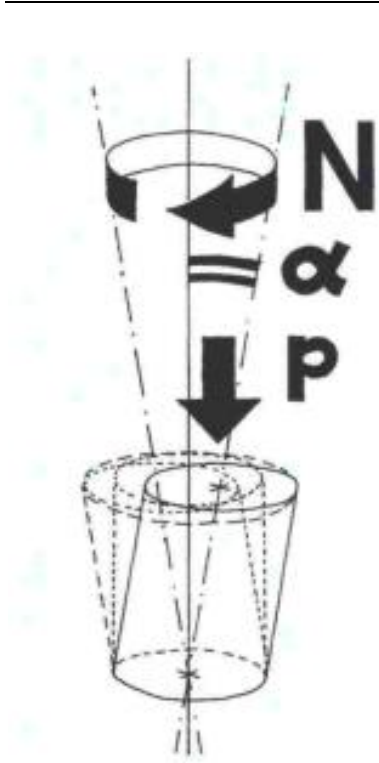


Kuva 2.30: CBR-arvon ja M_r :n välinen yhteys (Erlingsson 2011)

Kuvasta nähdään, että yhtälöiden mukaiset korrelaatiot ovat hyvin erilaisia keskenään. Koetulosten perusteella CBR-arvon ja resiliient-moduulin välinen yhteys on heikko.

2.7.3 Kiertotiivistyskoe

Kiertotiivistinlaitteella eli ICT-laitteella (Intensive Compaction Tester) voidaan tutkia rakeisten materiaalien tiivistymistä. Materiaalina voi olla myös side- tai lisäaineita sisältävä materiaali. Kokeessa näytesylinterissä olevaa materiaalia tiivistetään puristamalla näytettä kokoon toisiaan vastaan kohtisuorassa olevien päätylevyjen välityksellä. Tiivistyksen aikana sylinterin keskiakselia pyöritetään pohjalevyn keskinormaalien ympäri tietyssä kulmassa. Kiertotiivistyksen periaate ja kokeen parametrit on esitetty kuvassa 2.31. (Törnqvist & Jauhiainen 2001)



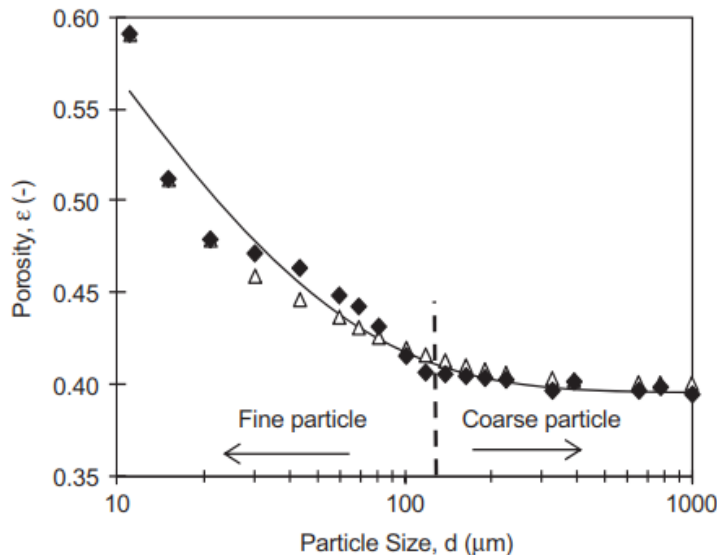
Kuva 2.31: Kiertotiivistyksen periaate ja suureet (Törnqvist & Jauhiainen 2001)

Kiertotiivistyskokeessa kokeen parametreja ovat liikekulma α , keskimääräinen aksiaalipaine p , työkierrosten lukumäärä N ja pyörintänopeus. Tiivistämisen aikana laite mittaa tehtyjen työkierrosten suhteen näytteen korkeutta, josta voidaan laskea näytteen tilavuus ja tiivistila. Laite mittaa lisäksi kansilevyn liikettä vastustavaa momenttia, josta määritetään näytteen muodonmuutoksen leikkausvastus. (Törnqvist & Jauhiainen 2001) Kiertotiivistyskokeella ei voida mitata materiaalin jäykkyyttä, mutta tiivistila on kuitenkin yksi kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä, jota kokeella voidaan mitata.

3 Partikkelien pakkautuminen

3.1 Partikkelien pakkautumisteoria

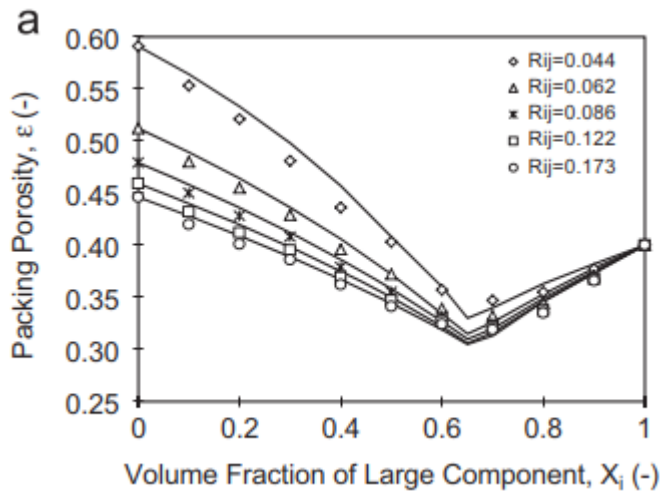
Hieno- ja karkearakeiset partikkelit pakkautuvat eri tavalla. Karkearakeisilla partikkeleilla painovoima on tärkein partikkeleihin vaikuttava voima. Partikkelikoon ollessa noin alle 0,1 mm, kyse on hienorakeisista partikkeleista, joihin vaikuttavat heikot voimat kuten van der Waalsin voima ja elektrostaattiset voimat. Myös kosteus vaikuttaa hienorakeisten partikkelien pakkautumiseen. Tasarakeisilla partikkeleilla pienin laskennallinen huokoisuus sattumanvaraisessa tiiviissä pakkautumisessa on 0,36. Hienorakeisilla partikkeleilla huokoisuudet ovat kuitenkin selvästi suurempia. Kuvassa 3.1 on esitetty raekoon vaikutusta huokoisuuteen tasarakeisilla lasihelmillä. (Zou et al. 2011)



Kuva 3.1: Raekoon vaikutus huokoisuuteen (Zou et al. 2011)

Kuvassa 150 μm kohdalla oleva katkoviiva havainnollistaa kokoa, jota suuremmilla partikkeleilla raekoko ei enää merkittävästi vaikuta huokoisuuteen.

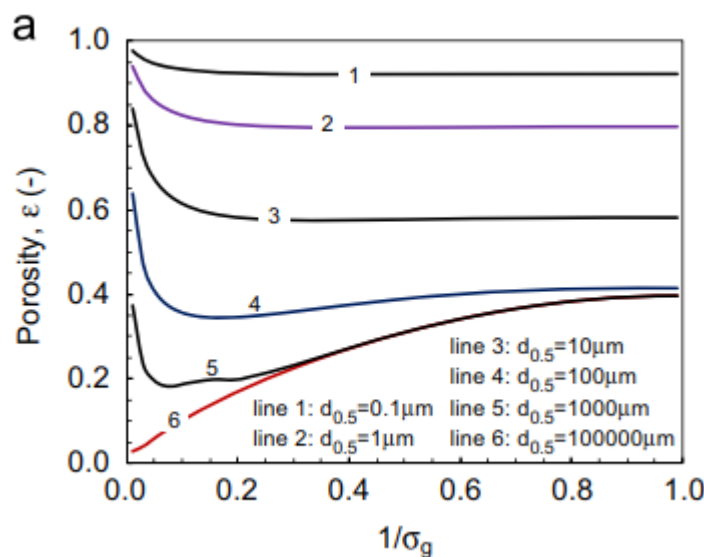
Kahden eri raekoon materiaalien sekoituksella voidaan oikealla sekoitussuhteella päästä pienempään huokoisuuden arvoon kuin kummallakaan yksittäisellä materiaalilla. Binäärisessä sekoituksessa huokoisuus on suurimmillaan hienojen partikkelien osuuden ollessa suuri. Huokoisuus pienenee, kun isojen partikkelien osuus kasvaa tiettyyn arvoon asti. Pienimmät huokoisuuden arvot saadaan sekoituksella, jossa on noin 60–80 % karkeaa materiaalia. Tätä suuremmilla karkean aineksen pitoisuuksilla huokoisuus jälleen kasvaa, koska hienoainesta ei ole enää riittävästi täyttämään karkeiden rakeiden väleihin jäänyttä tyhjätilaa. Vastaavalla tavalla pienimpään huokoisuuteen päästään myös kahden eri keskiraekoon sekoituksen materiaalin sekoituksella. Kuvassa 3.2 on esitetty huokoisuuden arvoja eri sekoitussuhteilla. Parametri Rij tarkoittaa materiaalien raekokojen suhdetta. (Zou et al. 2011)



Kuva 3.2: Kahden tasarakeisen materiaalin sekoitussuhteen vaikutus huokoisuuteen (Zou et al. 2011)

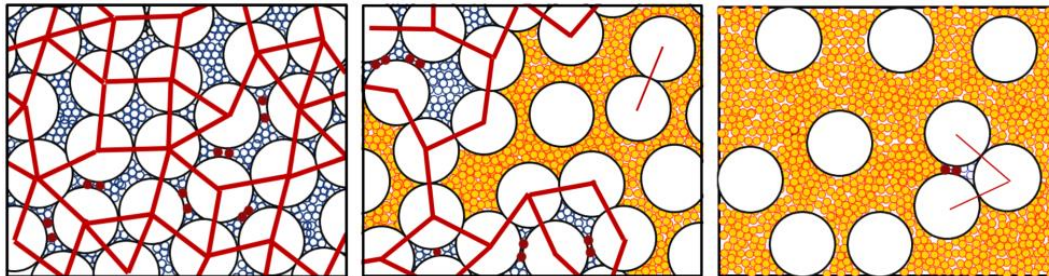
Zoun et al. (2011) mukaan kolmen materiaalin sekoituksessa pienin huokoisuus saavutetaan sekoituksella, jossa keskimmäisiä raekokoja ei ole ollenkaan mukana. Tämä tarkastelu on tehty kuitenkin materiaaleilla, joiden raekoiden väliset erot ovat pieniä ja rakeet pallonmuotoisia.

Karkeilla materiaaleilla raekokojakauman laajentaminen pienentää materiaalin huokoisuutta. Riittävän karkeilla materiaaleilla keskiraekooilla ei ole huokoisuuden kannalta merkitystä. Myös hyvin hienorakeisilla materiaaleilla raekokojakauman merkitys huokoisuudelle on vähäinen. Jos materiaalissa on sekä hienoja että karkeita rakeita, raekokojakauman laajentaminen pienentää huokoisuutta tiettyyn arvoon asti, jonka jälkeen huokoisuus jälleen kasvaa raekokojakauman laajentuessa. (Zou et al. 2011) Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 3.3, jossa käyrät kuvaavat eri keskiraekokoja. Parametri $1/\sigma_g$ kuvaa raekokojakaumaa siten, että arvolla 1 materiaali on täysin tasarakeinen.



Kuva 3.3: Keskiraekoon ja raekokojakauman vaikutus huokoisuuteen (Zou et al. 2011)

Kahden materiaalin sekoituksessa karkeiden rakeiden osuuden ollessa suuri, hienoaines on täyteenä isojen rakeiden välissä. Tässä tapauksessa rasitukset välittyvät isojen rakeiden muodostaman raerungon kautta. Hienoaineksen osuuden kasvaessa osa hienoista rakeista voi olla myös kiilautuneena karkeiden rakeiden väliin toimien osana raerunkoa. Jos hienoaineksen partikkelien raekoko on suurempi kuin isojen partikkeleiden väleihin jäävät huokokset, työntää hienoaines isoja partikkeleita erilleen löyhdyttämällä raerunkoa. Karkeiden rakeiden osuuden ollessa pieni, ne ovat hienoaineksen seassa yksittäisinä rakeina tai pieninä rykelminä muodostamatta keskenään raerunkoa. Rasitukset välittyvät tällöin hienorakeisen materiaalin muodostaman verkoston kautta. Hienoaineksen osuuden ollessa noin 25–50 % sekoituksessa on silloin osittain sekä hienojen että karkeiden rakeiden muodostamat raerungot. (Chang & Deng 2017) Kuvassa 3.4 on esitetty karkeiden rakeiden muodostama raerunko, jonka välissä on hienoja rakeita täyteenä ja kiilautuneena (vasemmalla), yksittäiset karkeat rakeet ja rykelmät hienoaineksen seassa (oikealla) ja välimuototilanne, jossa on osittaiset karkean ja hienon materiaalin raerungot (keskellä).

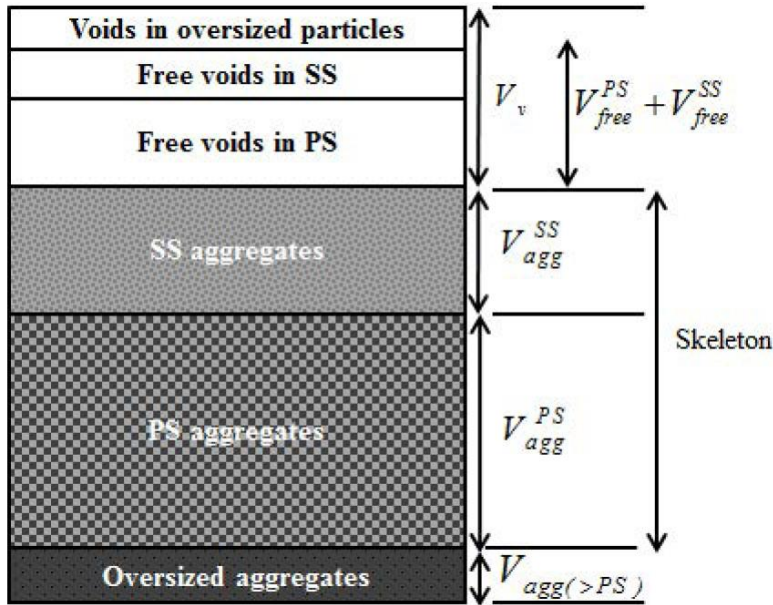


Kuva 3.4: Rasitusten välittyminen erilaisilla hieno- ja karkearakeisen materiaalien sekoituksilla (Chang & Deng 2017)

Kahden raekoon sekoitusten tarkastelu ei täysin vastaa tilannetta, jossa luonnonkiviainesten tapaan on useita eri raekokoja laajalla rakeisuusvälillä. Se toimii kuitenkin teoreettisena pohjana monimutkaisempien tilanteiden tarkastelulle.

3.2 Kantavuuden määrittäminen pakkautumisteorian perusteella

Kantavuuden ja muodonmuutoskestävyyden kannalta optimaalisessa materiaalissa karkeat rakeet muodostavat raerungon, jota tukee riittävä määrä hienorakeisempaa materiaalia. Yideti et al. (2013a) on esitellyt laskennallisen menetelmän, jossa rakeisuuden perusteella materiaalista tunnistetaan kuormia kantava karkeiden rakeiden raerunko eli primäärirakenne (primary structure, PS) ja kuormia heikommin kantava hienorakeinen osuus, sekundäärirakenne (secondary structure, SS). Jos sekundäärirakenteen osuus materiaalista on liian pieni, se tukee heikosti primäärirakennetta. Jos sekundäärirakenteen osuus on liian suuri, se työntää primäärirakenteen partikkeleita erilleen heikentäen sen rakeiden välisiä raekontakteja. Lisäksi materiaalissa voi olla mukana ylisuuria rakeita, jotka eivät vaikuta rakenteen käyttäytymiseen. (Yideti et al. 2013a) Kuvassa 3.5 on esitetty rakeisen materiaalin osatekijät.



Kuva 3.5: Rakeisen materiaalin osatekijät (Yideti et al. 2013c)

Materiaalin huokokset voidaan kuvan mukaisesti jakaa primäärirakenteen, sekundäärirakenteen ja ylisuurten rakeiden huokosiksi. Yidetin et al. (2013a) esittämä laskentamalli perustuu pallonmuotoisten rakeiden pakkautumiseen. Tiiveimmässä mahdollisessa tilassa, joka on joko pintakeskinen kuutiollinen tai heksagoninen pakkautuminen, samankokoiset pallot on mahdollista saada pakkautumaan tiiviyteen 0,74. Tiiviydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kiintoaineksen tilavuusosuutta koko rakenteen tilavuudesta. Löyhimmässä mahdollisessa tilassa, joka on yksinkertainen kuutiollinen pakkautuminen, partikkelit ovat pakkautuneet tiiviyteen 0,52. Jos primäärirakenteen huokoisuus on yli 50%, rakeiden välillä ei ole riittävää raekontaktia kantavan raerungon muodostamiseksi. Laskentamallissa materiaalista määritetään primäärirakenteeseen kuuluvat raekoot rakeiden halkaisijoiden ja painoprosenttien perusteella. Jos peräkkäisillä seuloilla olevien lajitteiden määrien ero on liian suuri, ei rakeiden välillä silloin ole riittävää vuorovaikutusta. Tavoitteena laskentamallissa on määrittää kahden peräkkäisen lajitteen huokosten läpimitan painotettu keskiarvo ja verrata sitä raekokojen perusteella määritettäviin ylä- ja alarajoihin. Jos huokosten koko on liian pieni, pienempi lajite on dominoiva ja vastaavasti jos huokosten koko on liian suuri, suurempi lajite on dominoiva. Kummassakaan tapauksessa raerungolle vaadittavaa vuorovaikutusta ei enää tapahdu. (Yideti et al. 2013a)

Ensin määritetään kahden peräkkäisen lajitteen raekoon painotettu keskiarvo $D_{w,avg}$ kaavalla 17

$$D_{w,avg} = D_1 D_2^3 \sqrt{\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_1 D_2^3 + \varphi_2 D_1^3}} \quad (17)$$

missä D_1 on suurempi ja D_2 pienempi seulakoko. Lajitteiden vastaavat määrät φ_1 ja φ_2 ovat tilavuusosuuksia koko rakenteesta. Löyhimmässä pakkautumisessa, joka on yksinkertainen kuutiollinen pakkautuminen, huokosten läpimita on 0,732 kertaa partikkelin läpimita. Tätä suuremmalla läpimitalla partikkelien välillä ei enää ole kontaktia. Painotettu keskiarvo huokosten läpimitalle $d_{w,avg}$ saadaan kaavalla 18

$$d_{w,avg} = 0,732D_{w,avg} \quad (18)$$

Huokosten läpimittaa verrataan kaavalla 19 määritettäviin ylä- ja alarajoihin.

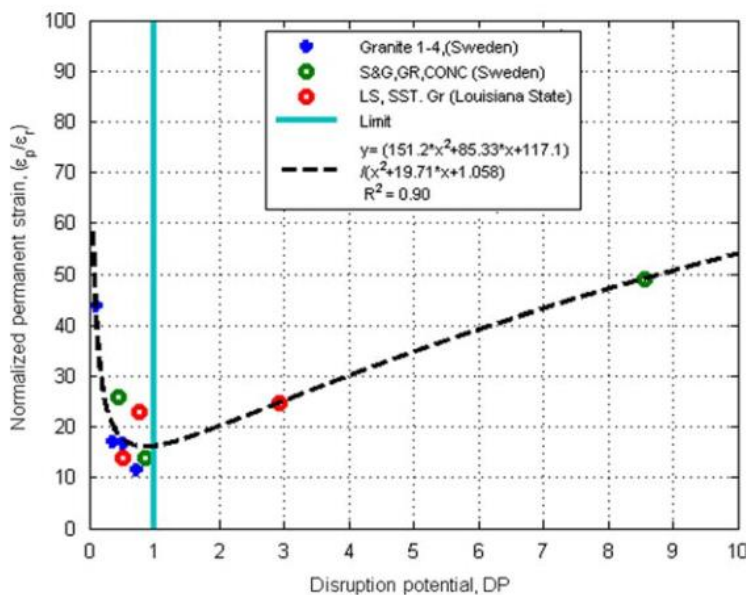
$$\frac{1,1D_1D_2}{\sqrt[3]{D_2^3 + 2,36D_1^3}} \leq d_{w,avg} \leq \frac{1,1D_1D_2}{\sqrt[3]{2,36D_2^3 + D_1^3}} \quad (19)$$

Menetelmällä tarkistetaan kaikki seulakoot suurimmasta alkaen 2 mm seulakokoon asti. Jos epäyhtälö ei toteudu jollain lajitteilla, pienempi lajite ei tällöin enää kuulu primäärirakenteeseen. Jos kaikki epäyhtälöt toteutuvat 2 mm asti, silloin kaikki yli 2 mm materiaali on osa primäärirakennetta. (Yideti et al. 2013a)

Primäärirakenteen määrittämisen jälkeen materiaalista on mahdollisuus päätellä erilaisia materiaalin käyttäytymiseen vaikuttavia parametreja, joita ovat mm. disruptiopotentiaali (disruption potential DP), primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} ja primäärirakenteen koordinaatioluku c_{nPS} . DP määritetään kaavalla 20

$$DP = \frac{V_{DM}^{SS}}{V_{free}^{PS}}, \quad (20)$$

missä V_{DM}^{SS} on disruptiivisten materiaalien osuus ja V_{free}^{PS} on primäärirakenteen sisäinen huokostilavuus. Disruptiivisia materiaaleja ovat Yideti et al. (2013a) määritelmän mukaan kaikki sekundäärirakenteen lajitteet, joiden raekoko on vähintään 0,225 kertaa primäärirakenteen pienin raekoko. Primäärirakenteen sisäinen huokostilavuus on rakenteen huokostilavuuden osuus, joka vastaa primäärirakenteen osuutta koko rakenteesta. Disruptiiviset materiaalit voivat joko tukea tai häiritä primäärirakennetta. Kuvassa 3.6 on esitetty DP:n vaikutus syklistä kolmiakselialueissa määritettyihin normalisoituihin pysyviin muodonmuutoksiin.



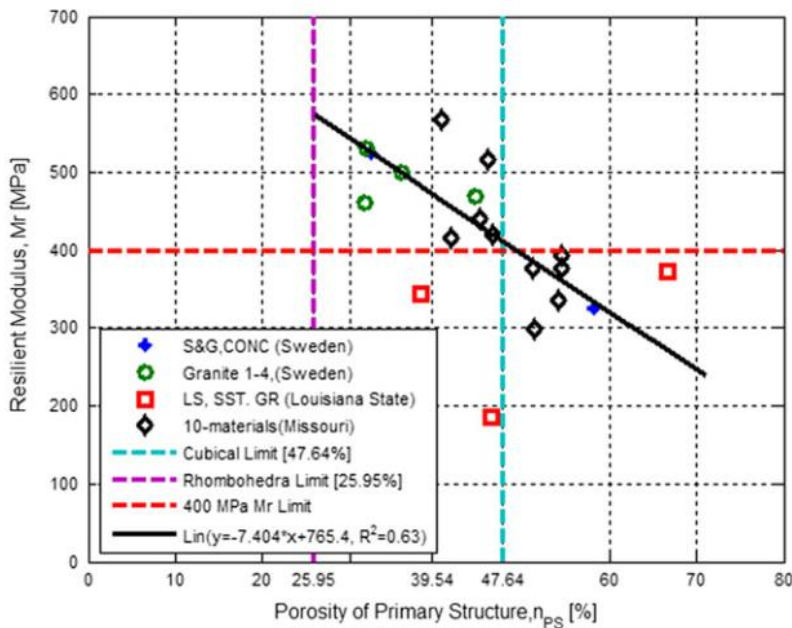
Kuva 3.6: DP:n ja pysyvien muodonmuutosten välinen yhteys (Yideti et al. 2013a)

Yidetin et al. (2013a) mukaan DP:n ollessa välillä 0,5–1 pysyviä muodonmuutoksia tapahtuu vähän, koska tällöin hienompaa materiaalia on riittävästi tukemaan raerunkoa. DP:n ollessa alle 0,5 tai yli 1, materiaalin kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia heikkenee. Kun DP on alle 0,5, raerunko jää ilman riittävää tukea ja kun DP on enemmän kuin 1, materiaalissa on mukana liikaa raerunkoa häiritseviä raekokoja. Sekundäärirakenteen määrä on toinen pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttava tekijä. Sen liian suuri tai liian pieni osuus heikentää materiaalin kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Optimimäärä sekundäärirakennetta antaa tukea primäärirakenteelle, jolloin pysyvät muodonmuutokset ovat alhaisimmillaan. Optimimäärä sekundäärirakenteelle tutkimuksessa käytetyn aineiston perusteella on noin 25 %. (Yideti et al. 2013a)

Primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} vaikuttaa mm. materiaalin resilient-moduuliin. Se määritetään kaavalla 21

$$n_{PS} = \frac{V_{SS} + V_{voids}}{V_T - V_{>PS}}, \quad (21)$$

missä V_{SS} on sekundäärirakenteen osuus rakenteen tilavuudesta, V_{voids} koko rakenteen huokostilavuus, V_T koko rakenteen tilavuus ja $V_{>PS}$ on ylisuurten rakeiden osuus tilavuudesta. Resilient-moduulin ja primäärirakenteen huokoisuuden välinen yhteys on esitetty kuvassa 3.7. (Yideti et al. 2013b)



Kuva 3.7: Resilient-moduulin ja n_{PS} :n välinen yhteys (Yideti et al. 2013b)

Kuvasta havaitaan, että mitä suurempi primäärirakenteen huokoisuus on, sitä heikompi resilient-moduuli. Resilient-moduulit on määritetty kolmiakiaalikokeissa, joiden hydrostaattinen ja deviatorinen jännitys on ollut 150 kPa. Kuvassa on esitetty pystyviivoilla tiiveimmän ja löyhimmän samansuuruisen pallojen teoreettisen pakkautumisen huokoisuudet 25,95% ja 47,64%. (Yideti et al. 2013b)

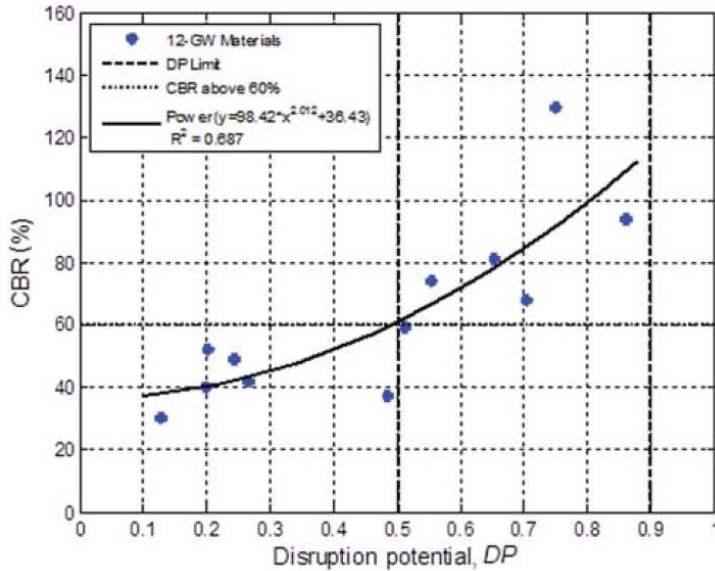
Primäärirakenteen huokoisuuden perusteella rakenteelle voidaan määrittää koordinaatioluku, jolla tarkoitetaan yhden partikkelin keskimääräistä partikkelikontaktien lukumäärää. Koordinaatioluvun ja primäärirakenteen huokoisuuden yhteys

määritettiin Yideti et al. (2013b) tutkimuksessa neljän eri teoreettisen partikkelien pakkautumisrakenteen perusteella, jotka olivat yksinkertainen kuutiollinen, tetragoninen, oktaedrinen ja romboedrinen pakkautuminen. Primäärirakenteen koordinaatioluku cn_{PS} voidaan määrittää kaavalla 22

$$cn_{PS} = 2,827 \left[\frac{n_{PS}}{100} \right]^{-1,069}, \quad (22)$$

missä n_{PS} on primäärirakenteen huokoisuus prosentteina. Koordinaatioluvun ollessa 6–12 materiaalilla on suhteellisen hyvä resilient-moduuli ja sen ollessa alle 6, raekontaktit välittävät heikosti kuormituksia. (Yideti et al. 2013b)

Yideti et al. (2013c) mukaan disruptiopotentiali korreloi pysyvien muodonmuutosten lisäksi myös CBR-arvon kanssa. DP:n kasvaessa arvosta 0,1 arvoon 0,9 CBR-arvo kasvaa noin arvosta 40 noin arvoon 110. (Yideti et al. 2013b) Tämä kokeellisesti havaittu yhteys on esitetty kuvassa 3.8.

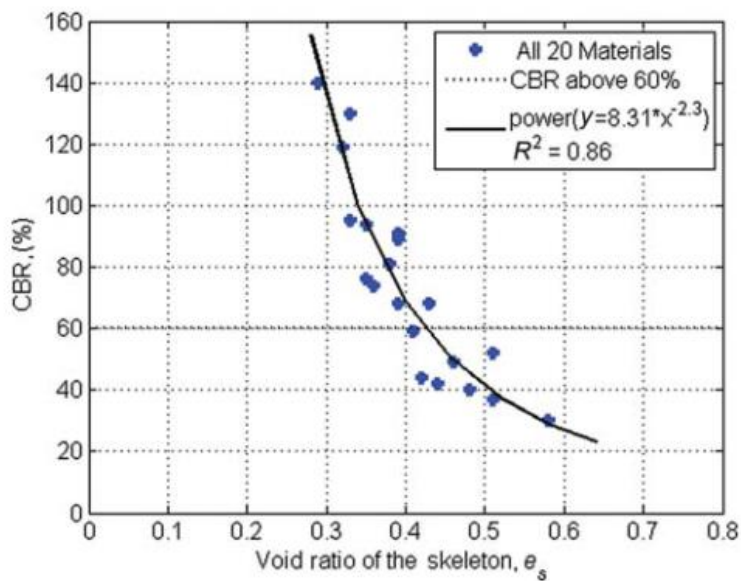


Kuva 3.8: CBR-arvon riippuvuus disruptiopotentialista (Yideti et al. 2013b)

CBR-arvo korreloi lisäksi myös primäärirakenteen vapaan huokostilavuuden V_{free}^{PS} sekä koko rakenteen raerungon huokoisuuden e_s kanssa. Raerungon huokoisuus e_s määritetään kaavalla 23

$$e_s = \frac{V_{free}^{PS} + V_{free}^{SS}}{V_{PS} + V_{SS}}, \quad (23)$$

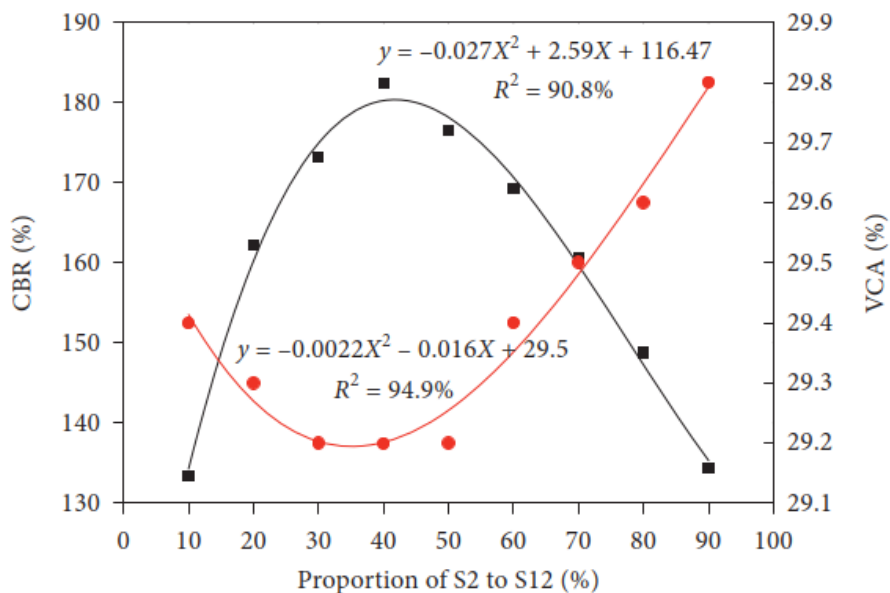
missä V_{free}^{SS} on sekundäärirakenteen vapaa huokostilavuus, V_{PS} primäärirakenteen rakeiden osuus rakenteen tilavuudesta ja V_{SS} sekundäärirakenteen rakeiden osuus koko rakenteen tilavuudesta. CBR-arvon ja e_s :n välinen yhteys on esitetty kuvassa 3.9. (Yideti et al. 2013c)



Kuva 3.9: CBR-arvon ja e_s :n välinen yhteys (Yideti et al. 2013c)

Kuvasta nähdään, että mitä pienempi raerungon huokoisuus, sitä parempi CBR-arvo.

Bao et al. (2019) tutkivat eri raekokojen sekoitusten ja sekoitussuhteiden vaikutusta CBR-arvoihin ja huokoisuuteen. Kokeissa käytettiin neljää eri raekoon kalliokiviainesta, jotka ovat raekokovälillä 4,75–16 mm. Kuvassa 3.10 on esitetty CBR-arvo ja huokoisuus (VCA) sekoitukselle, jossa 13,2–16 mm kiviainekseen sekoitetaan hienorakeisempaa 9,5–13,2 mm kiviainesta.



Kuva 3.10: Huokoisuuden vaikutus CBR-arvoon (Bao et al. 2019)

Kuvassa CBR-arvo on merkitty mustalla ja huokoisuus (VCA) punaisella. Kuvasta havaitaan, että sekoitussuhteella, jossa on noin 35% hienorakeisempaa kiviainesta saavutetaan pienin huokoisuus. Samalla sekoituksella saavutetaan myös suurin CBR-arvo, eli huokoisuus ja CBR ovat kääntäen verrannollisia.

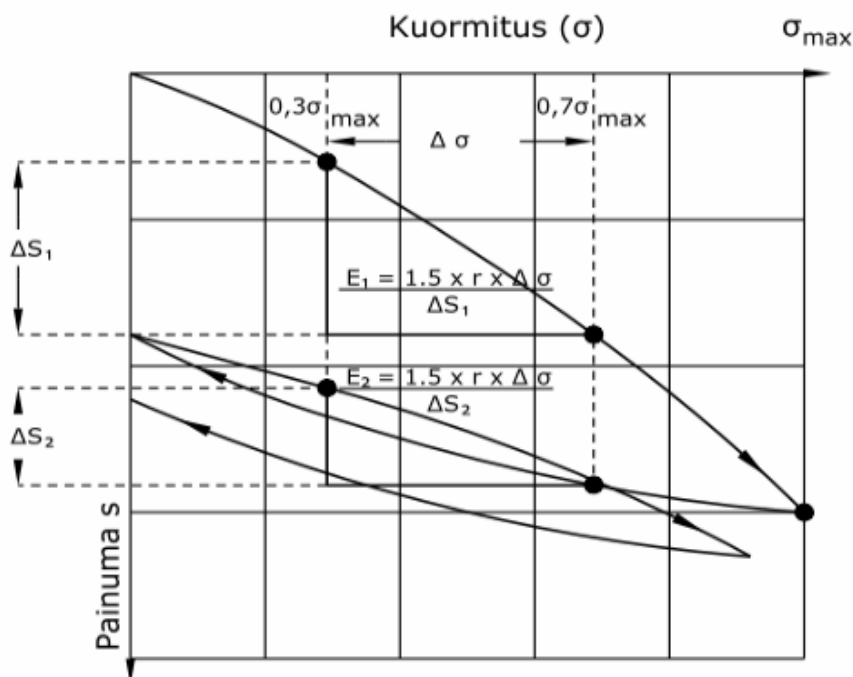
4 Kantavuuden mittaus ja kantavuusvaatimukset

4.1 Kantavuuden kenttämittausmenetelmät

4.1.1 Kantavuuden mittaus levykuormituskokeella

Levykuormituskokeessa mitataan painumaa 300 mm halkaisijaltaan olevan kuormituslevyn alla. Mittauksessa tehdään kaksi kuormituskertaa, joilla määritetään muodonmuutosmoduulit E_1 ja E_2 kaavan 7 perusteella. Painumat mitataan kolmella mittakellolla, jotka sijaitsevat 120° välein kuormituslevyn reunalla. Kuormituslevyä tunkataan vastapainoa vasten. Vastapainona voi olla esimerkiksi kaivinkone. Mittauksen aluksi tehdään 3,5 kN kuormalla esikuormitus, jonka jälkeen mittakellot nollataan. Painumia mitataan 10 kN välein 60 kN asti. Ennen kunkin mittatuloksen kirjaamista painumanopeuden on oltava alle 0,01 mm/min. Tulosten tulkinnassa lasketaan kullekin kuormitusportaalle mittakellojen mittaustulosten keskiarvo. Ensimmäisen kuormituskerran jälkeen kuorma poistetaan ja mittaus tehdään samasta pisteestä uudelleen, jolloin saadaan arvo E_2 . (Kalliainen et al. 2011)

InfraRYLin (2020) mukaan kantavuudet E_1 ja E_2 tulee määrittää kuormitusväliltä 30%...70%, jotta mittaustulos ei vääristyisi mittauksen alkuvaiheen häiriöiden tai loppuvaiheessa rakenteen kimmoisuuden mahdollisen ylittymisen takia. Kuvassa 4.1 on esitetty levykuormituskokeen tyypillinen kuvaaja, sekä arvojen E_1 ja E_2 määrittäminen väliltä 30%...70%. (Kalliainen et al. 2011)



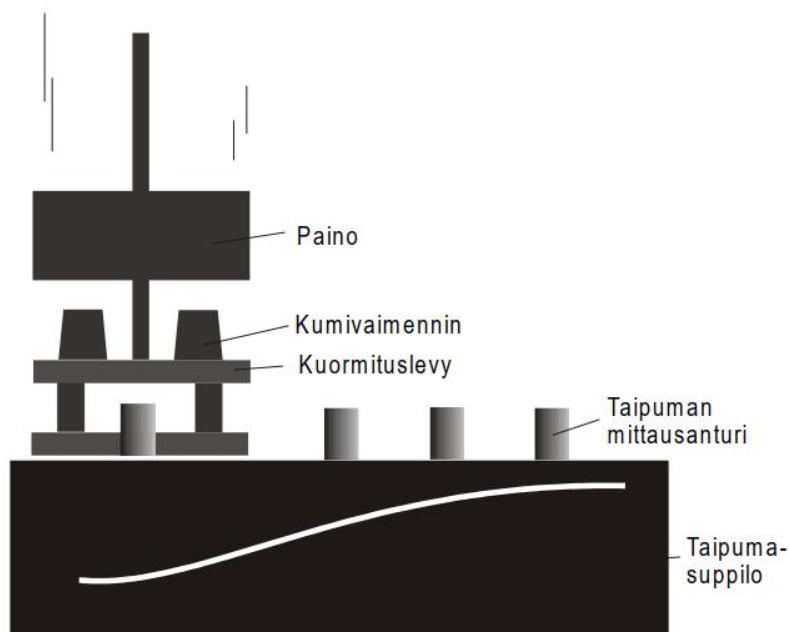
Kuva 4.1: Muodonmuutosmoduulien määrittäminen levykuormituskokeen perusteella (InfraRYL 2020)

Toisella kuormituskerralla rakenne on tiivistynyt ensimmäisen kuormituksen jäljiltä, jolloin mitatut painumat ovat pienempiä. Muodonmuutosmoduulien suhdetta E_2/E_1 kutsutaan tiiviyssuhteeksi, koska sen avulla pystytään arvioimaan rakenteen tiivystilaa. Suurempi tiiviyssuhde tarkoittaa sitä, että rakenne on ennen kuormitusta ollut löyhemmässä tilassa, koska kokeen tiivistävä vaikutus on ollut suuri. InfraRYLissä kantavuusvaatimukset on annettu sekä E_2 -arvolle että tiiviyssuhteelle. (Kalliainen et al. 2011)

4.1.2 Kantavuuden mittaus pudotuspainolaitteella

Pudotuspainolaitteella 300 mm halkaisijaltaan olevalle kuormituslevylle pudotettavalla painolla aiheutetaan dynaaminen kuormitus, jolla pyritään simuloimaan liikenteen aiheuttamaa kuormaa. Laite mittaa kuormituksen aiheuttamaa taipumaa kuormituslevyn keskellä sekä useassa pisteessä kuormituslevyn ulkopuolella. Kuormitus aiheuttaa rakenteeseen taipumasuppilon, jonka muodon perusteella voidaan arvioida rakenteen ominaisuuksia. Takaisinlaskennalla voidaan selvittää rakennekerrosten jäykkyys. (Spoof & Petäjä, 2000)

Kuvassa 4.2 on esitetty pudotuspainolaitteen toimintaperiaate.



Kuva 4.2: Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate (Spoof & Petäjä 2000)

Rakenteen jäykkyys kuormituslevyn alla saadaan laskettua kaavalla 24

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p \cdot a}{s}, \quad (24)$$

missä ν on Poissonin vakio (yleensä 0,35), p on kosketuspaine, a kuormituslevyn säde ja s painuma kuormituslevyn alla. Kaava on muilta osin sama kuin kaava 7, jolla lasketaan kantavuus levykuormituskokeesta, mutta kaavan 7 kerroin r on PPL-mittauksen tapauksessa taipuisalle levylle käytettävä arvo 2. Eri rakennekerrosten jäykkyyttä voidaan arvioida taipumasuppilon avulla. Pintamoduulit eli jäykkyydet voidaan laskea mittausanturien kohdilla kaavalla 25

$$E = \frac{(1 - \nu^2) \cdot p \cdot a^2}{r \cdot d_r}, \quad (25)$$

missä r on mittauspisteen etäisyys kuormituslevystä ja d_r painuma mittauspisteessä. (Spoof & Petäjä 2000)

Käytössä on myös pudotuspainolaitteita, jotka mittaavat taipumaa ainoastaan kuormituslevyn alla. AL-Engineering Oy:n kehittämä Heavy Loadman mittaa 50 kg:n painoisen pudotuspainon kuormituslevyyn aiheuttamaa kiihtyvyyttä, mikä integroidaan taipumaksi. Taipuman perustella rakenteelle lasketaan kantavuusarvo. Suomessa käytössä on myös kannettava 10 kg pudotuspainolla varustettu kevyt pudotuspainolaite tuotenimeltään Loadman, joka mittaa tässäkin tapauksessa pudotuspainon aiheuttamaa kuormituslevyn kiihtyvyyttä ja sen perusteella rakenteen taipumaa. Loadmanilla pudotuksen aiheuttama kuormitus ei ylety syvälle rakenteeseen sen alhaisen painon takia. (Kalliainen et al. 2011)

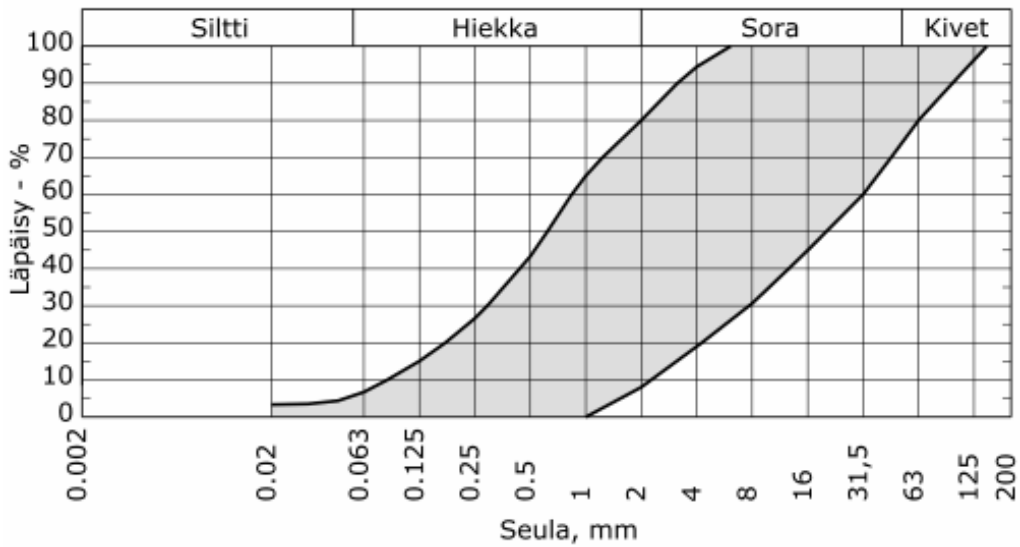
Koppanan (2018) diplomityössä on tutkittu raskaan pudotuspainolaitteen ja levykuormituskokeen välisiä eroja jäykkyyden ja tiivistyssuhteiden mittaamisessa. Mittaustulosten eroavaisuuteen vaikuttaa mittauskohdan olosuhteet, kuten pohjamaa ja tiivistystyön laatu, eikä yksiselitteistä vakiokerrointa menetelmien välille voitu määrittää. InfraRYLin ohjeen mukaisella levykuormituskokeen tulkinalla saadaan noin 20% - 25% suurempia kantavuusarvoja kuin pudotuspainolaitteella. Jos levykuormituskokeen tulkinassa käytetään InfraRYLin ohjeesta poiketen koko kuormitusalueelta mitattuja painumia, saadaan levykuormituskokeella 5% - 10% pienempiä kantavuuksia kuin pudotuspainolaitteella. Tiivistyssuhteiden vertailussa vastaavasti tulokseksi saatiin, että levykuormituskokeella mitatut tiivistyssuhteet ovat 20% - 27% pienempiä kuin pudotuspainolaitteella mitatut. (Koppana 2018)

4.2 Eristys- ja välikerrosten laatuvaatimukset

Eristyskerroksen tehtävänä on olla kantavana alustana välikerrokselle ja jakaa kuormat pohjamaalle. Eristyskerroksen paksuus määräytyy kuitenkin routamitoituksen, ei kantavuuden perusteella. Välikerroksen tehtävänä on olla kantavana alustana tukikerrokselle ja estää tuki- ja eristyskerros materiaalien sekoittuminen. (Liikennevirasto 2018a) Eristys- ja välikerroksille on InfraRYLissä esitetty vaatimuksia sekä materiaalille että valmiille rakenteelle. (InfraRYL 2020)

4.2.1 InfraRYLin mukaiset materiaalivaatimukset

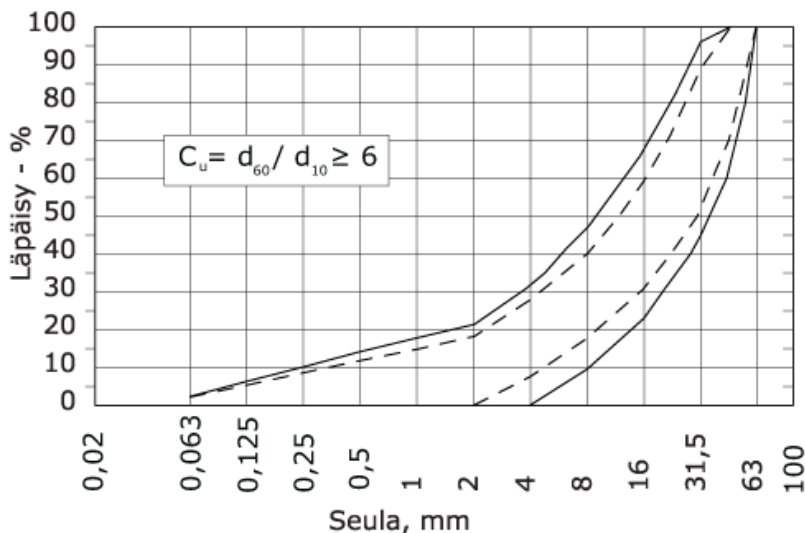
InfraRYLissä (2020) eristys- ja välikerroksen materiaaleille on esitetty rakeisuusvaatimukset erikseen luonnonmateriaaleille ja kalliomurskeelle. Kuvassa 4.3 on esitetty rakeisuusvaatimus eristys- ja välikerroksissa käytettävälle luonnonmateriaalille.



Kuva 4.3: Eristys- ja välikerrosten rakeisuusvaatimus luonnonmateriaalille (InfraRYL 2020)

Rakeisuusvaatimusten perusteella havaitaan, että materiaaliksi soveltuu maala-jeista karkea hiekka, sora, sorainen hiekka ja hiekkainen sora. Hienoainespitoisuuden on oltava alle 4 %. Materiaalissa ei saa olla mukana eloperäistä ainesta, eikä sitä saa valmistaa keinotekoisesti sekoittamalla kahta tai useampaa eri lähteistä peräisin olevaa maa-ainesta keskenään. Luonnonmateriaalin raekokosuhteelle ei ole annettu vaatimuksia, eikä luonnonkiviainekselle ole asetettu rapautumisherkkyys- tai lujuusvaatimuksia. (InfraRYL 2020)

Eristys- ja välikerroksissa käytettävälle kalliomurskeelle on rakeisuuden lisäksi esitetty vaatimuksia raekokosuhteelle, kiviaineksen mineraaleille ja kiviainesten lujuudelle. Kuvassa 4.4 on esitetty kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset.



Kuva 4.4: Eristys- ja välikerrosten rakeisuusvaatimus kalliomurskeelle (InfraRYL 2020)

Käytettävän kalliomurskeen rakeisuuskäyrä ei saa ylittää yhtenäisiä viivoja ja 90% materiaalinäytteistä on sijoitettava katkoviivojen väliselle alueelle. Hienoainespitoisuus saa olla enimmillään 2%. Raekokosuhteelle C_U esitetty vaatimus tarkoittaa sitä, että 60% läpäisyn kohdalla olevan raekoon tulee olla vähintään kuusi kertaa 10% läpäisyn kohdalla olevan raekoon suuruinen. Vaatimuksen on täyttyävä vähintään 90% näytteistä. Yksittäisissä näytteissä raekokosuhteen on oltava vähintään neljä. Rakeisuuskäyrän tulee laskea riittävän loivasti, mikä tarkoittaa sitä, että materiaalin on oltava riittävän suhteistunutta. (InfraRYL 2020)

Kalliomurskeessa ei saa olla haitallisia määriä rapautumisherkkiä mineraaleja. Kiviaineksen on oltava riittävän lujaa ja sen on oltava radan korkeusviivasta 1,5 m etäisyydellä Los Angeles -luokaltaan enintään 25 ja micro-Deval -luokaltaan enintään 15. Eristyskerroksen alaosalle yli 1,5m etäisyydellä korkeusviivasta sallitaan alhaisempien kuormitustasojen takia hieman heikomman kiviaineksen käyttö. (InfraRYL 2020)

4.2.2 InfraRYLin mukaiset kantavuus- ja tiiviysvaatimukset

Eristys- ja välikerrosten tiiviysasteiden on säteilymittauslaitteella mitattuna oltava keskimäärin vähintään 95% ja yksittäisissä mittauspisteissä vähintään 92%. Vaatimusten on täyttyävä kussakin eristyskerroksen kerralla tiivistettävässä kerroksessa. Tiiviysastetta ja kantavuutta voidaan mitata levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Kantavuusvaatimukset luonnonmateriaalista tehdyille eristys- ja välikerroksille pudotuspainolaitteella ja levykuormituksella mitattuna on esitetty taulukossa 4.1. Kalliomurskerakenteille on käytössä arvoiltaan hieman eroavat tiiviys- ja kantavuusvaatimukset, joita tässä työssä ei käsitellä yksityiskohtaisemmin.

Taulukko 4.1: Luonnonmateriaaleista tehtyjen eristys- ja välikerrosten kantavuusvaatimukset (InfraRYL 2020)

| Mittaustapa | Eristyskerros E_2 [MPa] | | Välikerros E_2 [MPa] | |
|-------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| | Keskiarvo | Yksittäinen mittaus | Keskiarvo | Yksittäinen mittaus |
| Levykuormituskoe | 130 | 110 | 160 | 140 |
| Pudotuspainolaite | 150 | 125 | 185 | 160 |

Kantavuuden lisäksi eristys- ja välikerrosten on täytettävä tiiviysuhteelle asetetut vaatimukset, jotka ovat hieman eri pudotuspainolaitteella ja levykuormituksella tehdyille mittauksille. Taulukossa 4.2 on esitetty InfraRYLin vaatimukset pudotuspainolaitteella ja levykuormituksella mitattuihin tiiviysuhteisiin eristys- ja välikerroksille.

Taulukko 4.2: Luonnonmateriaaleista tehtyjen eristys- ja välikerrosten tiiviysuhdevaatimukset (InfraRYL 2020)

| Kantavuus E ₂ [MPa] | Eristyskerros E ₂ /E ₁ | | Välikerros E ₂ /E ₁ | |
|-----------------------------------|--|-------------------|---|-------------------|
| | Levykuormituskoe | Pudotuspainolaite | Levykuormituskoe | Pudotuspainolaite |
| < 125 | ≤ 2,2 | ≤ 1,9 | ≤ 2,0 | ≤ 1,7 |
| 125...134 | ≤ 2,3 | ≤ 2,0 | ≤ 2,1 | ≤ 1,8 |
| 135...144 | ≤ 2,4 | ≤ 2,1 | ≤ 2,2 | ≤ 1,9 |
| 145...154 | ≤ 2,5 | ≤ 2,2 | ≤ 2,3 | ≤ 2,0 |
| 155...164 | ≤ 2,6 | ≤ 2,3 | ≤ 2,4 | ≤ 2,1 |
| 165...174 | ≤ 2,7 | ≤ 2,4 | ≤ 2,5 | ≤ 2,2 |
| 175...184 | ≤ 2,8 | ≤ 2,5 | ≤ 2,6 | ≤ 2,3 |
| ≥ 185 | ≤ 2,9 | ≤ 2,6 | ≤ 2,7 | ≤ 2,4 |

Tiiviys- ja kantavuusvaatimusten täyttyessä materiaalin rakeisuudelle sallitaan ohjealueesta poikkeava hienoainespitoisuus. Hienoainespitoisuus saa tässä tapauksessa olla 1,5 %-yksikköä ohjealueen mukaista enimmäisarvoa suurempi, 0,125–2 mm alueella läpäisy saa olla 2 %-yksikköä suurempi ja 4–63 mm alueella läpäisy saa olla 3 %-yksikköä suurempi. (InfraRYL 2020)

Eristys- ja välikerroksille tulee tehdä kantavuuden ja tiiviiden tarkkailua työmenetelmätarkkailuna ja laadunvarmistusmittauksin. Työmenetelmätarkkailussa ennen eristys- ja välikerrosten rakentamista selvitetään riittävään tiiviiden ja kantavuuden saavuttamiseen tarvittavat jyräskerrat ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus koetiivistyksessä. Varsinainen tiivistystyö tehdään koetiivistyksessä selvitettyllä, rakennuskohteen olosuhteisiin soveltuvalla periaatteella. Työn aikana on tarkkailtava pengermateriaalia ja sen vesipitoisuutta. Tiiviydentarkkailua voidaan tehdä joko tiiviysastetta mittaavalla säteilymittauksella tai kantavuutta ja tiiviysuhdetta mittaavalla levykuormituksella tai pudotuspainolaitteella. Säteilymittaus soveltuu hyvin hienorakeiselle materiaalille ja levykuormitus ja pudotuspainolaite soveltuvat karkearakeisemmille materiaaleille. (InfraRYL 2020)

Säteilymittauslaitteella tulee mitata kunkin kerralla tiivistettävän kerroksen vesipitoisuus 150 m välein ennen kerroksen tiivistämistä. Tiiviysmittauksia tulee tehdä kunkin raiteen alla 150 m välein ja 1,5 m etäisyydeltä penkereen reunasta 300 m välein. Mikäli käytössä on GPS-paikannuksella varustettu jatkuvasti mittaava täryjyry, voidaan tiiviydentarkkailun mittauspisteväliä harventaa raiteen keskellä 400 metriin ja penkereen reunoilla 800 metriin. (InfraRYL 2020)

Eristys- ja välikerrosten materiaalia tulee tarkkailla näytteiden avulla. Näytteitä tulee ottaa 500 m välein jokaiselta raiteelta eristyskerroksen kahdesta ylimmästä kerralla tiivistettävästä kerroksesta ja välikerroksesta 2 m raiteen keskilinjan vierestä. Näytteenoton tulee alkaa kerroksen pinnasta ja kattaa 75% kerroksen paksuudesta. Näytteistä mitataan rakeisuus ja hienoainespitoisuus ja niiden on täytettävä myös muut materiaalille asetetut laatuvaatimukset. (InfraRYL 2020)

4.2.3 Vaatimukset työmenetelmille

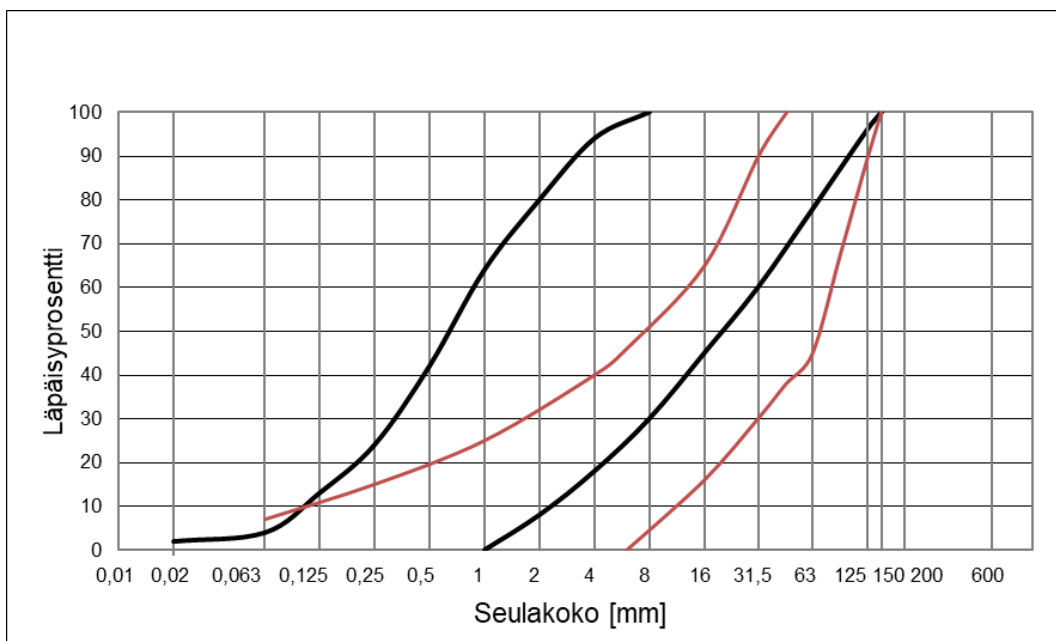
Infra RYLissä (2020) on esitetty tiivistyskertamäärän ohjearvot ja kerralla tiivistettävien kerrosten paksuudet tiivistyskoneiden ja tiivistettävien kerrosten mukaan. Taulukossa 4.3 on esitetty ohjeelliset tiivistyskertamäärät radan eristys- ja välikerrosten tiivistämiseen valssi- ja kumipyöräjäyrille.

Taulukko 4.3: Eristys- ja välikerrosten tiivistyskertamäärät (InfraRYL 2020)

| Tiivistyskone | Eristyskerros | | Välikerros | |
|-----------------------|---------------|-----|------------|-----|
| | 0,25 | 0,5 | 0,25 | 0,4 |
| Kerrospaksuus [m] | | | | |
| 1 täryvalssi | 4 | 7 | 5 | 9 |
| 2 täryvalssia | 3 | 4 | 3 | 5 |
| Kumipyöräjäyrä < 20 t | 6 | - | 8 | - |
| Kumipyöräjäyrä > 20 t | 4 | 8 | 6 | 12 |

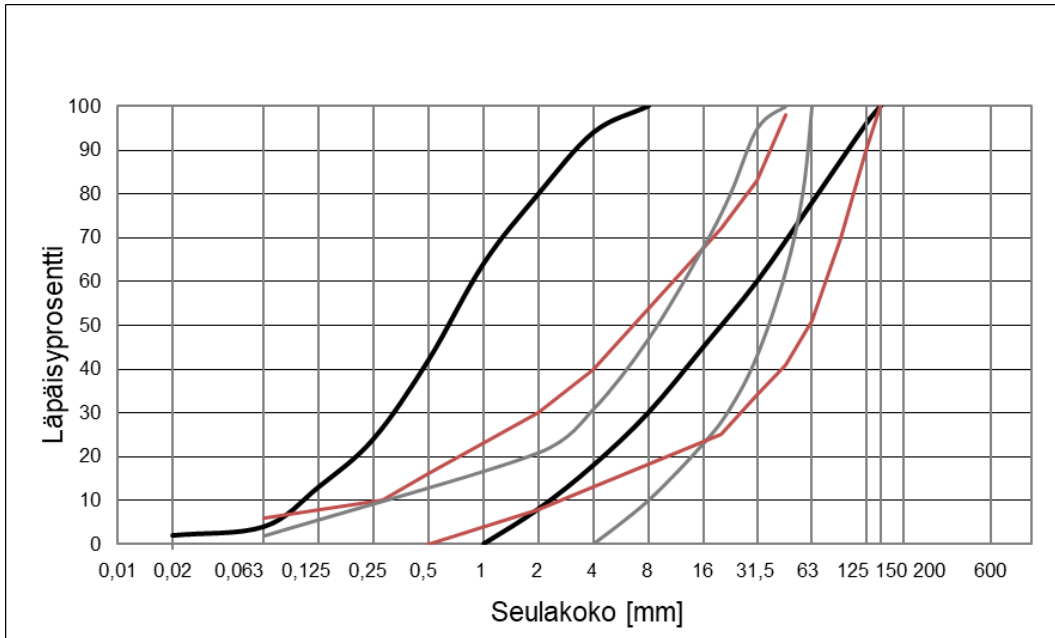
4.2.4 Ulkomaisia vaatimuksia

Ruotsissa eristys- ja välikerroksen (underballast) vaatimuksena 1990-luvun puoliväliin asti on ollut luonnonmateriaalin rakeisuusohjealue, jonka mukaan soveltuvia materiaaleja ovat hiekka, sorainen hiekka ja hiekkainen sora. 1990-puolivälissä vaatimusta päivitettiin siten, että materiaalissa saa olla selvästi aiempaa vähemmän hiekkalajitteita. (Dehlbom et al. 2018) Tämä päivitetty rakeisuusohjealue on esitetty kuvassa 4.5 punaisella. InfraRYLin mukainen ohjealue on kuvassa mustalla.



Kuva 4.5: Ruotsalainen ohjealue eristys- ja välikerroksen luonnonmateriaalille (Dehlbom et al. 2018)

Ohjealueen mukainen materiaali on selvästi karkearakeisempaa kuin InfraRYLin mukaisen vaatimuksen materiaali. 2000-luvun alusta lähtien kaikki uudet eristys- ja välikerrokset on rakennettu kalliomurskeesta, jonka rakeisuusohjealue on kuvan 4.6 mukainen. (Dehlbom et al. 2018) Kuvassa on harmaalla esitetty InfraRYLin vaatimus eristys- ja välikerroksen kalliomurskeelle.



Kuva 4.6: Ruotsalainen vaatimus eristys- ja välikerroksen kalliomurskeelle (Dehlbom et al. 2018)

Kantavuusvaatimuksena Ruotsissa on eristys- ja välikerrokselle levykuormituskokeella mitattuna 120 MPa. Eristyskerroksen alapuolisen penkereen kantavuuden tulee olla vähintään 60 MPa. (Dehlbom et al. 2018)

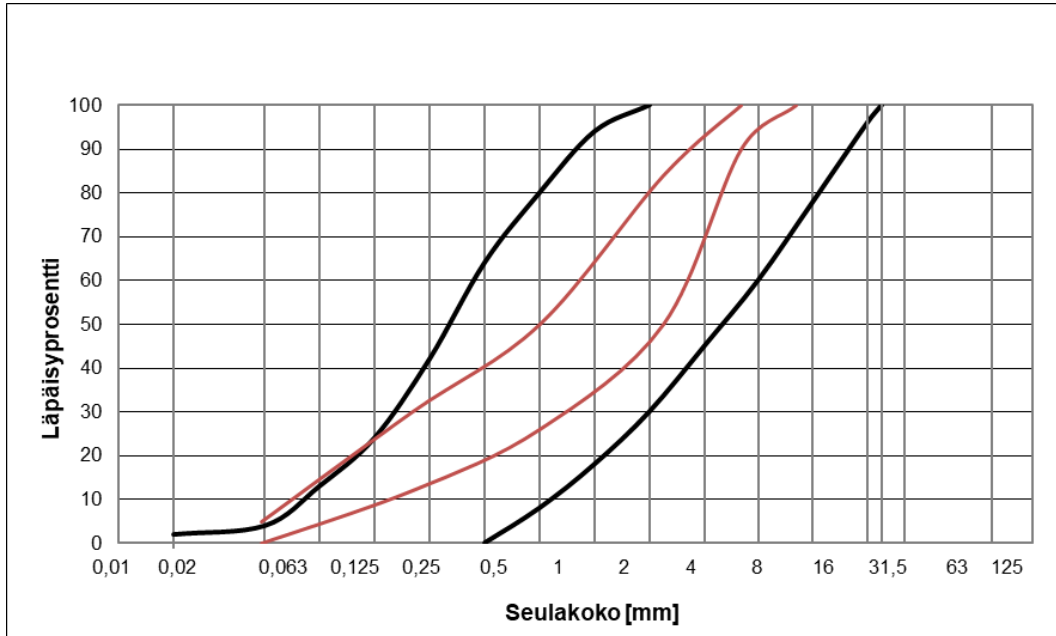
Saksalaisten vaatimusten mukaan radan tyyppin mukaan on asetettu erilaisia kantavuus- ja tiivysvaatimuksia, jotka on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4: Ratapenkereen saksalaisia laatuvaatimuksia (Göbel et al. 1996, Kalliainen et al. 2011 mukaan)

| Ratatyypit | | Eristyskerros | | Pohjamaa | |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| | | E_{v2} (MN/m ²) | D_{PR} | E_{v2} (MN/m ²) | D_{PR} |
| Uusi rata | Pääradat | 120 | 1,03 | 80 | 1,00 |
| | Lähilinjat, 2.luokan radat | 100 | 1,00 | 60 | 0,97 |
| | Muut radat | 80 | 0,97 | 45 | 0,95 |
| Kunnos- tus Olema- sa oleva | $v > 160$ km/h | 80 | 0,97 | 45 | 0,95 |
| | $v \leq 160$ km/h | 50 | 0,95 | 20 | 0,93 |

Tiivysvaatimus on asetettu Proctor-kokeella määritettävälle maksimikuivairtoitehdelle, joka ei täysin vastaa Suomessa käytettävällä parannetulla Proctor-kokeella määritettyjä arvoja. (Kalliainen et al. 2011)

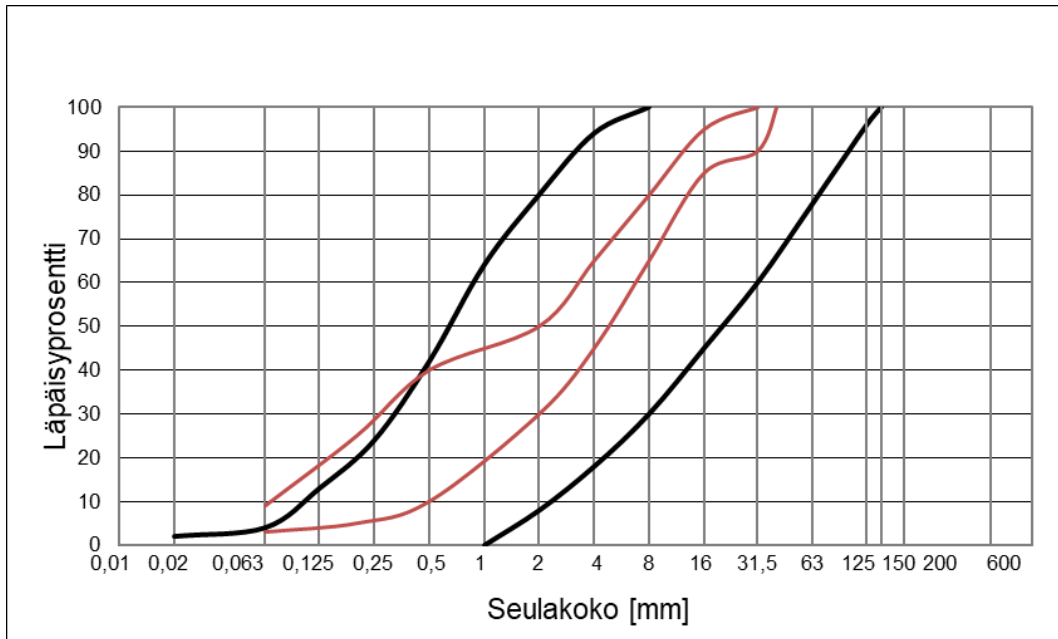
Yhdysvaltalaisen Union Pacificin (2020) suunnittelustandardin mukaan välikerrosta vastaava subballast-kerros rakennetaan kalliomurskeesta joko 6 tai 12 tuuman (152,4 mm tai 304,8 mm) paksuisena pohjamaan rakeisuudesta riippuen (UPRR Std. Dwg. 0013A). Kuvassa 4.7 on esitetty ohjealue subballast-kerrokselle.



Kuva 4.7: Välikerrosta vastaavan subballast-kerroksen rakeisuusvaatimus (UPRR Std. Dwg. 0010E)

Subballast-kerroksen tiivysasteen tulee olla 95 % California Test Method No. 216 -menetelmällä määritettynä (BART Facilities Standards (2018)). Koe on periaatteeltaan hieman erilainen kuin parannettu Proctor-koe.

Espanjassa subballast-kerroksen on oltava hyvin suhteistunutta hiekkaista soraa, jonka rakeisuuskäyrä on kuvan 4.8 mukainen (Garcia-de-la-Oliva & Moreno-Robles 2019).



Kuva 4.8: Espanjalainen vaatimus subballast-kerroksen rakeisuudelle (Garcia-de-la-Oliva & Moreno-Robles 2019, muokattu)

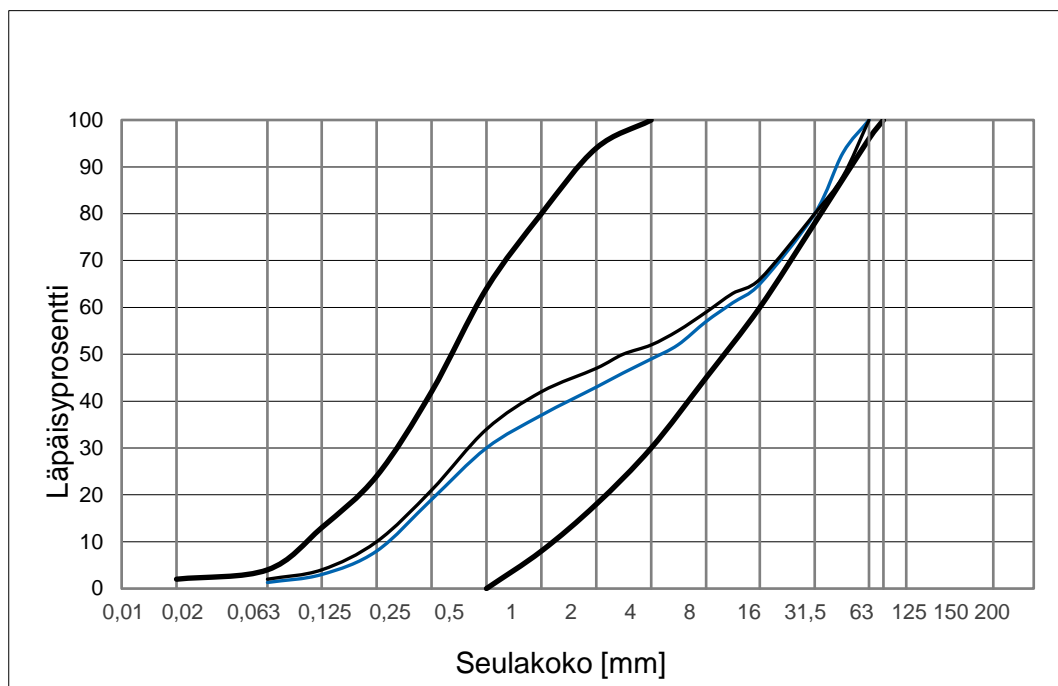
Kuvassa on esitetty suomalainen ohjealue mustilla ja espanjalainen punaisilla käyrillä. Levykuormituskokeella määritettävän E_2 -arvon tulee olla vähintään 120 MPa ja tiiviyssuhteen E_2/E_1 enintään 2,2. Espanjalaisen ohjeen mukaan kantavuus lasketaan vastaavasti kuin Suomessa kuormitusväliltä $0,3...0,7\sigma_{\max}$. (Garcia-de-la-Oliva & Moreno-Robles 2019)

5 Aiempien tutkimusten kantavuusmittaushavainnot

5.1 Luumäki-Imatra RU2 koekentät, kevät 2020

5.1.1 Rauhan asema 1

Rauhan aseman länsipäässä km-välillä 317+600 – 317+800 tehtiin 18.3.2020 kaksi 1,3 m korkuista koepengettä kuvan 5.1 mukaisista luonnonmateriaaleista.



Kuva 5.1: Rauhan asema 1:n koepenkereiden materiaalien rakeisuuskäyrät (Lankinen 2020, muokattu)

Rakeisuuskäyrät ovat materiaalitoimittajan ennakkoon toimittamia, joten rakeisuusjakautumat eivät välttämättä täysin vastaa todellisia koepenkereiden materiaaleja. Materiaalien vesipitoisuudet, keskiraekoot, raekokosuhteet C_u , rakeisuuskäyrän muotoa kuvaavat parametrit C_c ja hienoainespitoisuudet on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1: Rauhan asema 1:n koepenkereiden materiaaliparametrit

| Näyte | w [%] | d_{50} | C_u | C_c | <0,063 [%] |
|-------|-------|----------|-------|-------|------------|
| 206 | 3,2 | 8,9 | 72,6 | 0,17 | 1,3 |
| 210 | 4,0 | 5,6 | 69,6 | 0,15 | 2,0 |

Koepenkereiden 1 m paksuinen eristyskerros tiivistettiin kahdessa 500 mm osassa, ja jonka päälle tehtiin 300 mm välikerros. Tiivistystyö tehtiin 12 t yksivalssijyrällä. Kantavuudet mitattiin levykuormituskokeella 4, 6, 8 ja 10 jyrän ylityskerran jälkeen. Levykuormituskokeet tehtiin heti tiivistämisen jälkeen. Toinen koepenkerestä tiivistettiin käyttämällä lisäkastelua. Pohjamaan kantavuus E_2 oli 119 MPa kevyellä pudotuspainolaitteella mitattuna. (Lankinen, 2020)

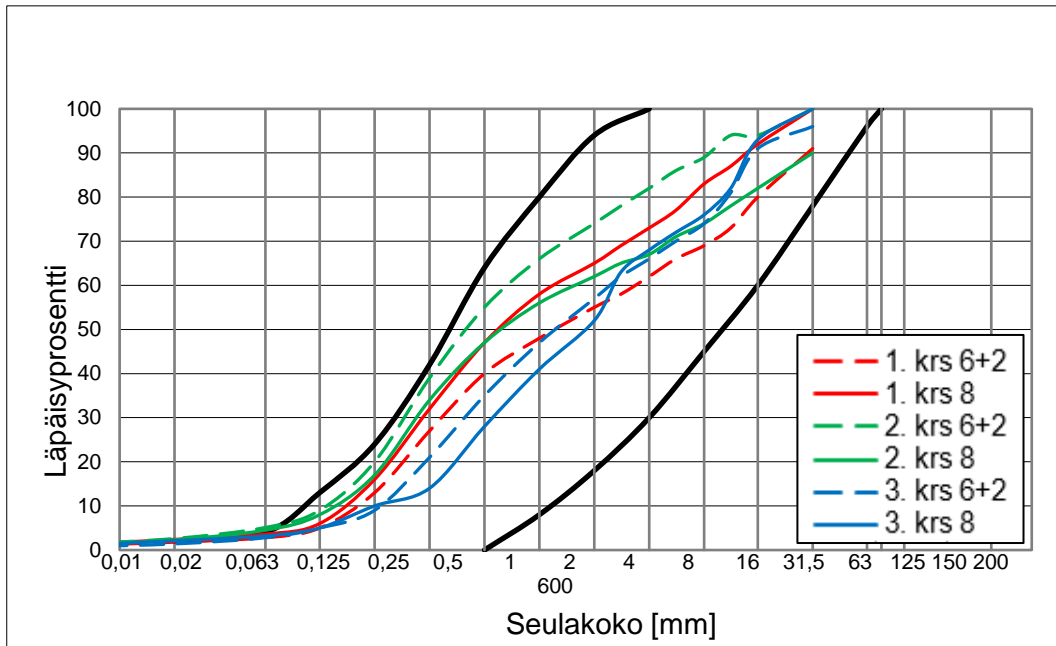
Ilman kastelua tehdyn koepenkereen paras kantavuus välikerroksen päältä saatiin 8 ylityskerran jälkeen. Kantavuuden arvoksi saatiin $E_2 = 67,72$ MPa ja tiiviyssuhteen arvoksi $E_2/E_1 = 3,94$. Kastellulla penkereellä paras kantavuus $E_2 = 92,45$ MPa ja tiiviyssuhde $E_2/E_1 = 5,34$ saavutettiin 6 ylityskerran jälkeen. Kantavuus ja tiiviyssuhde alittavat selvästi InfraRYLin mukaiset vaatimukset. (Lankinen, 2020)

5.1.2 Rauhan asema 2

Rauhan aseman länsipuolella tehtiin 23.3.2020 uusi koepenger samasta materiaalista kuin 18.3.2020. Koepenger tehtiin ilman lisäkastelua samalla tavalla kuin aiemmat. Tiivistämiseen käytettiin tällä kerralla kevyempää 7 t yksivalssijyrää. Penkereestä mitattiin 4, 6, 8 ja 10 tiivistyskerran jälkeen useasta pisteestä tiiviyssaste Troxler-mittauksella. Eristyskerroksen pinnalta parhaat tulokset saatiin 8 tiivistyskerran jälkeen, jolloin mittaustulosten keskiarvo oli 96,5% ja heikoin yksittäinen tulos 94,1%. Välikerroksen pinnasta 10 tiivistyskerran jälkeen mittaustulosten keskiarvo oli 94,8% ja heikoin yksittäinen tulos 90,4%. Eristyskerroksen mittaustulokset täyttävät InfraRYLin mukaiset vaatimukset. (Lankinen, 2020)

5.1.3 Rauhan asema 3

Rauhan aseman alueella tehtiin 7.-8.4.2020 koepenger, jonka eristyskerroksen materiaalina oli luonnonsora ja välikerroksen materiaalina kalliomurske. Penkereen eristyskerros rakennettiin kolmessa noin 400 mm paksuisessa kerroksessa. Penger jaettiin kahteen puoliskoon, joista toinen puoli tiivistettiin 7 t yksivalssijyrällä kahdeksalla ylityskerralla pitkällä iskulla ja toinen puoli tiivistettiin kuusi kertaa pitkällä ja kaksi kertaa lyhyellä iskulla. Eristyskerroksen ylin osa tiivistettiin kastelua käyttämällä. Koepenkereen jokaiselle kerrokselle tehtiin kummallekin puolelle kolme levykuormituskoeita ja kolme Troxler-mittausta. Jokaisen kerroksen kummaltakin puolelta määritettiin rakeisuus. (Björkqvist, 2020) Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2: Rauhan asema 3:n koepenkeren eristyskerroksen materiaalien rakeisuudet (Björkvist 2020, muokattu)

Kuvassa kahdeksan kertaa pitkällä iskulla tiivistettyjen osuuksien rakeisuudet on esitetty yhtenäisellä viivalla ja kuusi kertaa pitkällä ja kaksi kertaa lyhyellä iskulla tiivistettyjen osuuksien rakeisuudet on esitetty katkoviivalla. Kaikkien materiaalien rakeisuudet täyttävät vaatimukset lukuun ottamatta toisen kerroksen materiaalin hienoainespitoisuutta, joka ylittää vaatimuksen mukaisen arvon. Materiaalien vesipitoisuudet, keskiraekoot, raekokosuhteet, rakeisuuskäyrän muotoa kuvaava parametrit ja hienoainespitoisuudet on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2: Koepenkeren eristyskerroksen materiaaliparametrit

| Näyte | w [%] | d ₅₀ | C _u | C _c | <0,063 [%] |
|------------|-------|-----------------|----------------|----------------|------------|
| EK 1 (6+2) | 2,2 | 2,4 | 34,7 | 0,27 | 2,8 |
| EK 1 (8) | 3,2 | 1,2 | 14,8 | 0,52 | 3,6 |
| EK 2 (6+2) | 3,8 | 0,8 | 10,3 | 0,71 | 5,1 |
| EK 2 (8) | 3,0 | 1,3 | 21,8 | 0,39 | 4,5 |
| EK 3 (6+2) | 3,3 | 2,5 | 18,5 | 0,47 | 2,8 |
| EK 3 (8) | 4,5 | 3,5 | 20,4 | 0,97 | 3,2 |

Taulukossa 5.3 on esitetty levykuormituskokeista saadut E₂ ja E₂/E₁ -arvot sekä Troxler-mittausten perusteella saadut kuivairtoihydet ja tiiviysasteet kolmen mitaustuloksen keskiarvoina.

Taulukko 5.3: Rauhan asema 3:n koepenkereen mittaustulokset

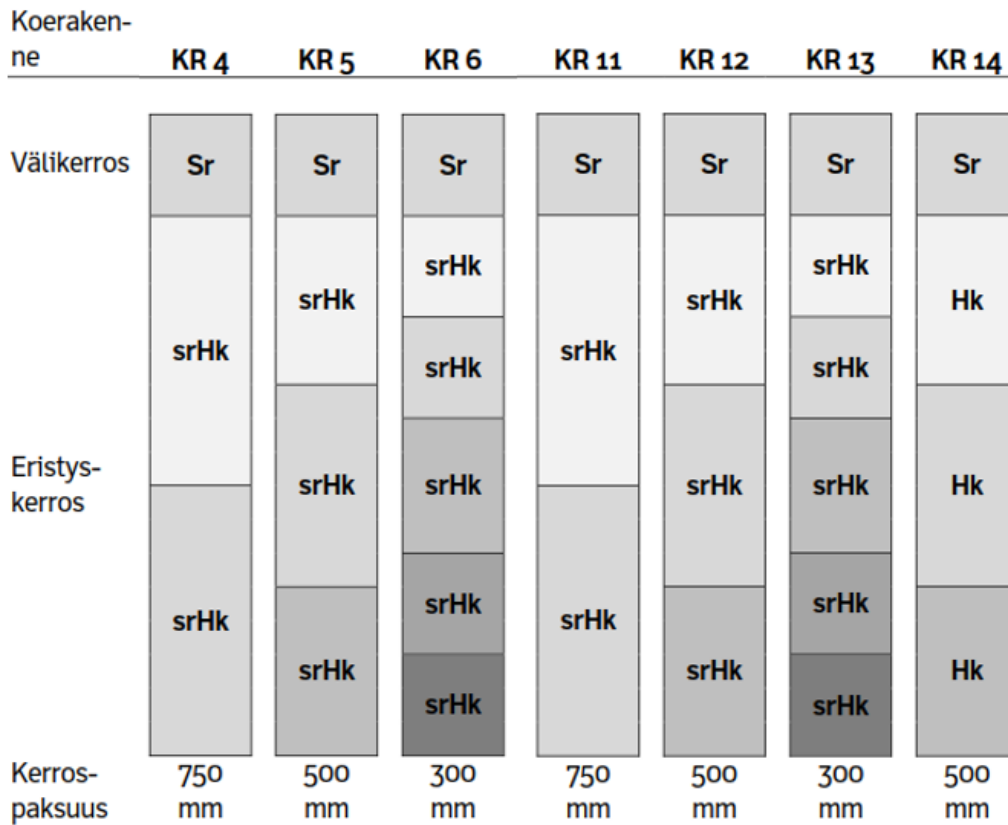
| Näyte | E_2 [MPa] | E_2/E_1 | ρ_d [kg/m ³] | Tiivysaste [%] |
|------------|-------------|-----------|-------------------------------|----------------|
| EK 1 (6+2) | 121,0 | 4,63 | 2027,7 | 95,9 |
| EK 1 (8) | 108,0 | 3,97 | 2019,0 | 96,5 |
| EK 2 (6+2) | 112,0 | 3,43 | 2063,3 | 98,7 |
| EK 2 (8) | 132,7 | 4,80 | 2074,0 | 99,2 |
| EK 3 (6+2) | 92,9 | 2,16 | 2136,3 | 102,1 |
| EK 3 (8) | 97,2 | 2,31 | 2128,3 | 100,9 |

Eristyskerrokselle asetetun kantavuusvaatimuksen 130 MPa täyttää toisen kerroksen kahdeksan kertaa pitkällä iskulla tiivistetty osuus, mutta tämä osuus ei täytä tiiviyssuhdevaatimusta. Mikään muu osuus ei täytä kantavuusvaatimusta. Kaikki osuudet täyttävät tiivysastevaatimuksen 95%.

5.2 Hipin koepenkeret

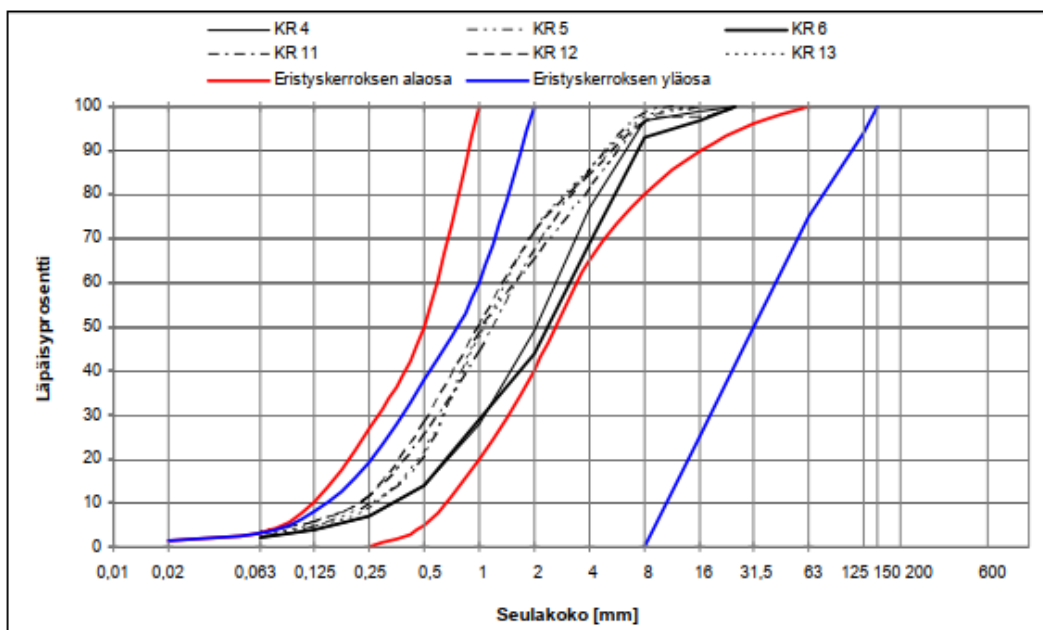
Syksyllä 2009 Seinäjoki–Ruha-rataosuudella rakennettiin kaksi lähes 200 m pituista koepengertä, joilla tutkittiin erilaisten materiaalien ja tiivistysmenetelmien vaikutusta kantavuuteen. Koepenkereille tehtiin levykuormituskokeita, pudotuspainolaitemittauksia, säteilylaitemittauksia, vesivolymetrimittauksia ja itsemittaavan jyrän tekemiä mittauksia. Koerakenteet 1–7 rakennettiin pehmeälle ja koerakenteet 8–14 hyvin kantavalle pohjamaalle. Pehmeän pohjamaan kantavuudeksi mitattiin levykuormituskokeilla noin 15–25 MPa ja kantavan pohjamaan kantavuudeksi mitattiin noin 100–120 MPa. Materiaalina koepenkereissä käytettiin erilaisia luonnonkiviaineksia ja kalliomurskeita. Eristyskerroksen kerralla tiivistettävän kerroksen paksumutta varioitiin. Yhteensä eristyskerros oli paksuudeltaan 1500 mm ja välikerros 300 mm. (Kalliainen et al. 2011)

Pehmeällä pohjamaalla sijaitsevista koerakenteista rakenteet 4–6 rakennettiin sorasta ja soraisesta hiekasta. KR 4:n eristyskerros rakennettiin 750 mm kerroksissa soraisesta hiekasta. KR 5:n eristyskerros rakennettiin 500 mm kerroksista ja KR 6:n eristyskerros rakennettiin 300 mm kerroksissa. Kaikissa välikerros rakennettiin sorasta yhdessä 300 mm kerroksessa. Kantavalla pohjamaalla sijaitsevista koerakenteista rakenteet 11–14 rakennettiin luonnonmateriaaleista. Rakenteissa 11–13 eristyskerros rakennettiin soraisesta hiekasta ja rakenteessa 14 hiekasta. KR 11:n eristyskerros rakennettiin 750 mm kerroksissa, KR 12:n ja KR 14:n eristyskerros 500 mm kerroksissa ja KR 13:n 300 mm kerroksissa. Kuvassa 5.3 on esitetty luonnonmateriaaleista tehtyjen koerakenteiden periaatekuvat.



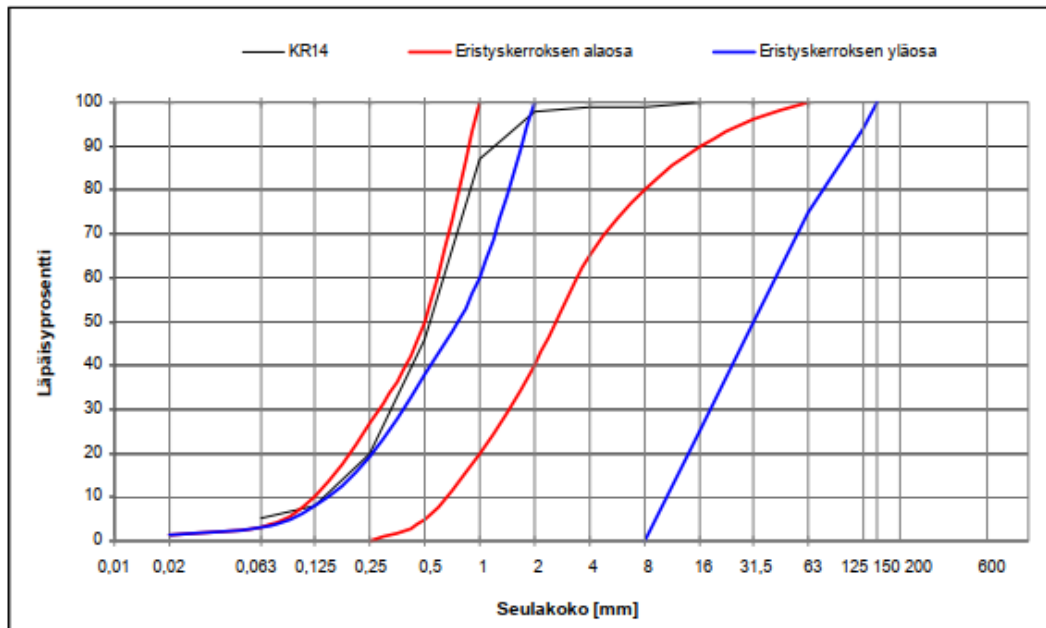
Kuva 5.3: Hipin koerakenteiden 4–6 (heikko pohjamaa) ja 11–14 (kantava pohjamaa) periaatekuvat (Kalliainen et al. 2011, muokattu)

Koerakenteiden 4–6 ja 11–13 eristyskerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 5.4.



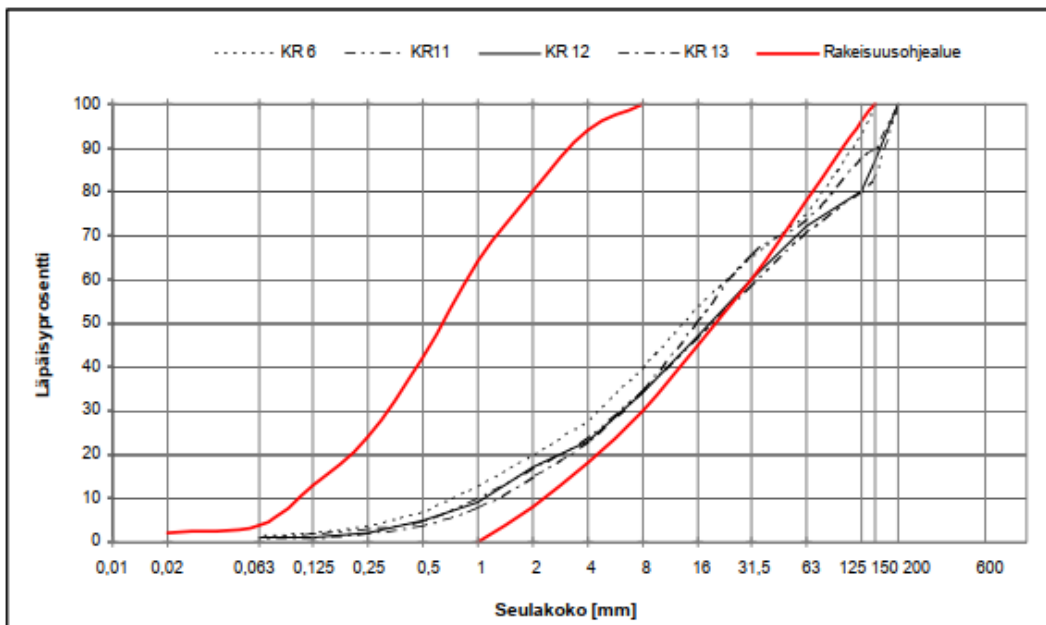
Kuva 5.4: Hipin koepenkerien KR 4–6 ja KR 11–13 eristyskerroksen materiaalien rakeisuuskäyrät (Kalliainen et al. 2011)

Kuvassa eristyskerroksen ala- ja yläosien rakeisuusalueet perustuvat aikaisempiin materiaalivaatimuksiin. Materiaalien rakeisuudet ovat myös nykyisten vaatimusten mukaisia. Koerakenne 14:n rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 5.5.



Kuva 5.5: KR 14:n eristyskerroksen rakeisuuskäyrä (Kalliainen et al. 2011)

KR 14:n eristyskerroksen materiaali on rakeisuudeltaan liian hienorakeista täyttämään nykyiset rakeisuusvaatimukset. Koerakenteissa 6 ja 11–13 käytettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 5.6.



Kuva 5.6: KR 6 ja KR 11 - 13 välikerrosten materiaalien rakeisuuskäyrät (Kalliainen et al. 2011)

Koerakenteiden välikerroksissa käytetyt materiaalit ovat rakeisuudeltaan selvästi karkeampia kuin eristyskerroksen materiaalit. Materiaalit ylittävät hieman ohjealueen karkealta puolelta. Taulukossa 5.4 on esitetty vesipitoisuudet 250 mm syvyydeltä, raekokosuhteet, hienoainespitoisuudet, kantavuudet E_2 , tiiviyssuhteet E_2/E_1 , kuivairtoteiheydet 250 mm syvyydeltä ja tiiviyssasteet KR 4–6 ja KR 11–14 eristys- ja välikerroksille.

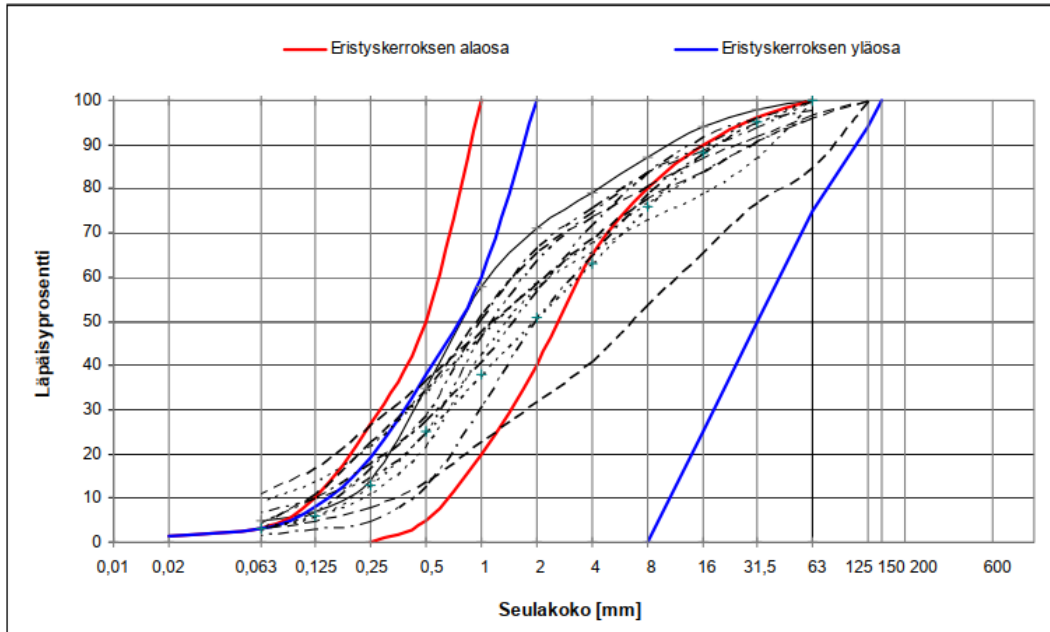
Taulukko 5.4: Hipin koepenkeroiden mittaustulokset (Kalliainen et al. 2011)

| Penger | w [%] | C_u | <0,063 [%] | E_2 [MPa] | E_2/E_1 | ρ_d [kg/m ³] | Tiiviyssaste [%] |
|------------|-------|-------|------------|-------------|-----------|-------------------------------|------------------|
| KR 4 (EK) | 5,9 | 7,9 | 2,1 | 90 | 4,83 | 1860 | 94,4 |
| KR 5 (EK) | 11,6 | 6,1 | 2,6 | 72 | 4,89 | 1784 | 90,6 |
| KR 6 (EK) | 7,2 | 9,5 | 2,2 | 98 | 4,72 | 1848 | 93,8 |
| KR 11 (EK) | 11,5 | 7,8 | 4,0 | 84 | 3,83 | 1801 | 91,4 |
| KR 12 (EK) | 5,3 | 7,0 | 3,5 | 89 | 4,02 | 1789 | 90,8 |
| KR 13 (EK) | 4,7 | 5,5 | 2,9 | 93 | 3,33 | 1753 | 89,0 |
| KR 14 (EK) | 3,0 | 4,9 | 4,6 | 84 | 6,86 | 1708 | 96,5 |
| KR 4 (VK) | 3,7 | 31,7 | 1,6 | 142 | 4,05 | 2087 | 99,4 |
| KR 5 (VK) | 3,4 | 31,7 | 1,6 | 162 | 3,89 | 2089 | 99,5 |
| KR 6 (VK) | 3,8 | 31,7 | 1,6 | 171 | 4,04 | 2100 | 100,0 |
| KR 11 (VK) | 3,3 | 34,3 | 1,1 | 187 | 3,00 | 2188 | 104,2 |
| KR 12 (VK) | 1,8 | 27,0 | 1,0 | 151 | 4,48 | 2083 | 99,2 |
| KR 13 (VK) | 1,9 | 19,0 | 0,9 | 141 | 4,23 | 2069 | 98,5 |
| KR 14 (VK) | 1,8 | - | - | 131 | 4,75 | 2099 | 100,0 |

Luonnonmateriaaleista rakennetut eristyskerrokset eivät täytä InfraRYLin mukaisia vaatimuksia kantavuuden E_2 , tiiviyssuhteen ja tiiviyssasteen osalta lukuun ottamatta KR 14:n tiiviyssastetta. Välikerrokset täyttävät vaatimukset tiiviyssasteen osalta. Lisäksi KR 11 täyttää välikerroksen kantavuusvaatimuksen E_2 , mutta ei tiiviyssuhdevaatimusta. Muilla koerakenteilla kantavuus- ja tiiviyssuhdevaatimukset eivät täyty.

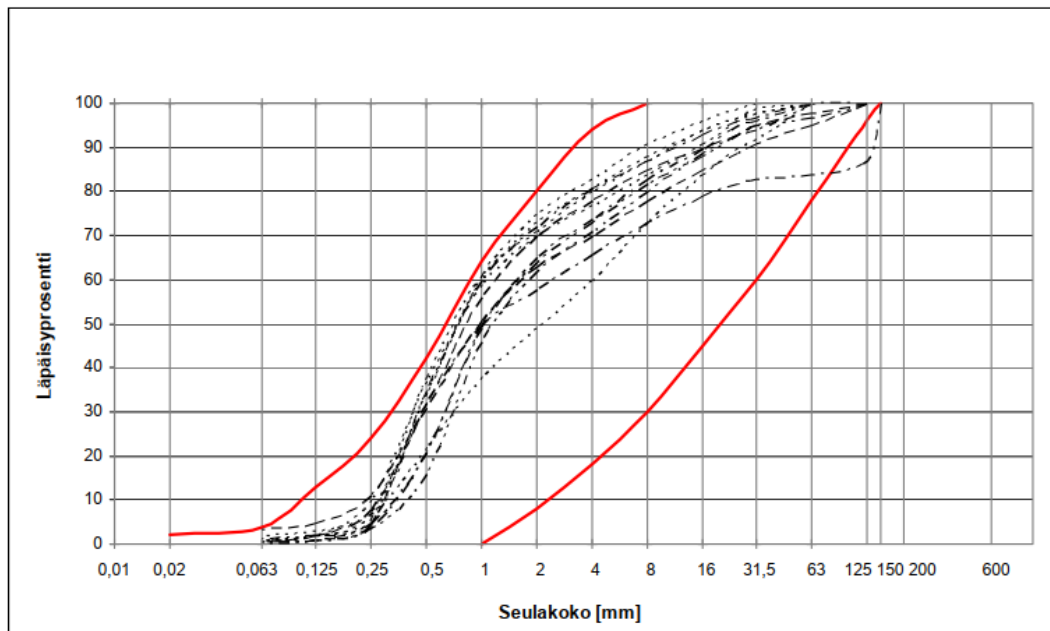
5.3 Kaitjärven liikennepaikka

Kesäkuussa 2009 Kaitjärven liikennepaikalla tutkittiin rakenteilla olevan ratapengerlevennyksen tiivyyttä ja kantavuutta. Ratapengertä levitettiin kummallekin puolelle vanhaa pengertä. Välikerrokselle tehtiin Troxler-mittauksia ja vesivolymetrikoita ja kantavuusmittauksia levykuormituskokeella, Heavy Loadman-pudotuspainolaitteella ja kannettavalla pudotuspainolaitteella. Eristyskerrokselle tehtiin Troxler-mittauksia ja vesivolymetrikoita. Kummastakin kerroksesta otettiin koepisteistä maanäytteet, joista määritettiin rakeisuus. Tutkimuspisteet sijaitsivat vuorotellen vanhan raiteen pohjois- ja eteläpuolella 100 m välein. (Kalliainen et al. 2011) Pohjamaa on alueella hiekkaa ja hiekkaista soraa noin 5–7 m kerroksena, jonka alla on moreenia (Erkkilä 2010). Kuvassa 5.7 on esitetty kootusti kohteen eristyskerroksen materiaalin rakeisuuskäyrät.



Kuva 5.7: Kaitjärven liikennepaikan eristyskerroksen rakeisuuskäyrät (Kalliainen et al. 2011)

Eristyskerroksen materiaaleista monilla hienoainepitoisuus ylittää selvästi vaatimusten mukaisen tason. Muilta osin rakeisuuskäyrät ovat pääosin vaatimusten mukaisia. Kuvassa 5.8 on esitetty kohteen välikerroksen materiaalin rakeisuuskäyrät.



Kuva 5.8: Kaitjärven liikennepaikan välikerroksen rakeisuuskäyrät (Kalliainen et al. 2011)

Välikerroksen materiaalit ovat rakeisuudeltaan vaatimusten mukaisia lukuun ottamatta yhden näytteen vaatimusta suurempaa 125–150 mm lajitepitoisuutta. Rakeisuuskäyrät eivät kuitenkaan ole ohjealueen rajakäyrien suuntaisia.

Taulukossa 5.5 on esitetty eristyskerroksen vesipitoisuudet, raekokosuhteet, hienoainespitoisuudet, kuivatilavuuspainot ja tiivysasteet vesivolymetrilla mitattuna sekä tiivysasteet Troxler-laitteella 250 mm syvyydeltä mitattuna. Troxler-mittausten tulokset ovat kolmen mittauksen keskiarvoja. (Kalliainen et al. 2011)

Taulukko 5.5: Kaitjärven liikennepaikan eristyskerroksen mittaustulokset (Kalliainen et al. 2011)

| Rata-kilometri | w [%] | C _u | <0,063 [%] | P _d [kg/m ³] | Tiivysaste [%] (vesivolymetri) | Tiivysaste [%] (Troxler) |
|----------------|-------|----------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| P 226+650 | 3,3 | 6,5 | 4,9 | 1850 | 91,1 | 83,4 |
| E 226+750 | 5,1 | 41,9 | 8,5 | 1950 | 96,0 | 87,2 |
| P 226+850 | - | 37,4 | 3,1 | - | - | - |
| E 226+950 | 4,8 | 32,5 | 9,5 | 1870 | 90,8 | 85,8 |
| P 227+050 | 2,6 | 11,3 | 4,5 | 1880 | 91,3 | 89,7 |
| E 227+150 | 3,3 | 18,1 | 3,3 | 2060 | 100,0 | 97,6 |
| P 227+250 | 2,2 | 13,7 | 6,8 | 1870 | 90,9 | 92,9 |
| E 227+350 | 2,7 | 14,7 | 2,8 | 1780 | 87,7 | 94,0 |
| P 227+450 | 3,2 | 10,3 | 3,7 | 1900 | 93,6 | 92,5 |
| E 227+550 | 2,8 | 10,3 | 3,1 | 1920 | 94,7 | 98,0 |
| P 227+650 | 3,0 | 18,5 | 3,6 | 1810 | 89,4 | 94,7 |
| E 227+750 | 3,3 | 12,6 | 4,6 | 1890 | 93,0 | 89,3 |
| P 227+850 | 4,0 | 8,1 | 1,8 | 1880 | 92,8 | 88,4 |

Taulukossa 5.6 on esitetty välikerroksen vastaavat parametrit.

Taulukko 5.6: Kaitjärven liikennepaikan välikerroksen mittaustulokset (Kalliainen et al. 2011)

| Rata-kilometri | w [%] | C _u | <0,063 [%] | P _d [kg/m ³] | Tiiviysaste [%] (vesivolymetri) | Tiiviysaste [%] (Troxler) |
|----------------|-------|----------------|------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| P 226+650 | 0,7 | 5,4 | 3,4 | 1790 | 93,2 | 94,0 |
| E 226+750 | 0,8 | 3,5 | 0,5 | 1700 | 88,4 | 98,1 |
| P 226+850 | 0,7 | 3,4 | 0,7 | 1800 | 93,6 | 91,3 |
| E 226+950 | 0,8 | 5,1 | 0,6 | 1690 | 88,1 | 89,4 |
| P 227+050 | 0,4 | 5,2 | 0,7 | 1940 | 101,0 | 94,1 |
| E 227+150 | 1,1 | 3,6 | 0,8 | 1730 | 90,2 | 89,6 |
| P 227+250 | 0,8 | 8,2 | 0,6 | 1720 | 89,8 | 93,6 |
| E 227+350 | 0,8 | 3,6 | 1,0 | 1660 | 86,2 | 93,3 |
| P 227+450 | 3,4 | 4,3 | 0,9 | 1760 | 91,9 | 93,4 |
| E 227+550 | 0,9 | 3,7 | 1,2 | 1730 | 89,9 | 93,4 |
| P 227+650 | 4,2 | 6,1 | 0,8 | 1710 | 89,9 | 93,5 |
| E 227+750 | 0,6 | 5,1 | 1,3 | 1750 | 91,2 | 92,4 |
| P 227+850 | 4,2 | 13,7 | 2,1 | 1720 | 89,4 | 95,9 |

Kaitjärven liikennepaikalla välikerroksen päältä on tehty levykuormituskokeita, joiden tulokset on esitetty taulukossa 5.7.

Taulukko 5.7: Kaitjärven liikennepaikan välikerroksen levykuormituskoe tulokset

| Ratakilometri | E ₂ [MPa] | E ₂ /E ₁ |
|---------------|----------------------|--------------------------------|
| E 226+664 | 74,1 | 4,46 |
| P 226+754 | 121,8 | 2,76 |
| E 226+840 | 59,0 | 3,94 |
| P 226+938 | 103,9 | 3,90 |
| E 227+058 | 62,8 | 4,35 |
| P 227+162 | 108,3 | 3,02 |
| E 227+250 | 131,9 | 7,16 |
| P 227+362 | 113,0 | 2,05 |
| E 227+488 | 120,6 | 3,42 |
| P 227+582 | 134,8 | 2,47 |
| E 227+683 | 126,6 | 4,33 |
| P 227+794 | 126,1 | 3,71 |
| E 227+883 | 115,6 | 3,29 |

Levykuormituskokeiden tuloksia ei voida tarkasti yhdistää taulukossa 5.6 esitettyihin mittaustuloksiin. Levykuormitustuloksista yksikään ei täytä InfraRYLin mukaisia välikerroksen kantavuusvaatimuksia.

6 Kantavuusmittaukset koerakenteista

6.1 Pudotuspainolaitemittaukset ratarakenteesta

Rakennettujen eristys- ja välikerrosten kantavuutta tutkittiin Luumäki-Imatra-ratahankkeella 28.9.2020. Valmiista eristys- ja välikerroksista tehtiin pudotuspainolaitemittauksia ja otettiin maanäytteitä, joista määritettiin rakeisuus. Eristys- ja välikerrokset oli mittausalueella tehty samasta materiaalista. Tutkittu osuus sijaitsi urakka-alueella 2 kaksoisraidetyömaalla km-välillä 322+500 – 323+600. Välikerrosta oli esillä 780 m ja eristyskerrosta 240 m. Tiivistystyö oli kaikille kerroksille tehty 13 t yksivalssijyrällä kuudella ylityskerralla, joista neljä ensimmäistä pitkällä iskulla ja kaksi viimeistä lyhyellä. Tiivistettävää kerrosta kasteltiin tiivistystyön yhteydessä. Välikerroksesta osuus km-välillä 322+505 – 323+000 oli tiivistetty noin kuukausi ennen mittauksia. Välikerros km-välillä 323+000 – 323+445 oli tiivistetty noin 10 päivää ennen mittauksia. Eristyskerrosta km-välillä 323+455 – 323+590 oli kasteltu ja tiivistetty mittauspäivänä. Kuvassa 6.1 näkyy osuus mittauspäivänä tiivistetystä eristyskerroksesta.



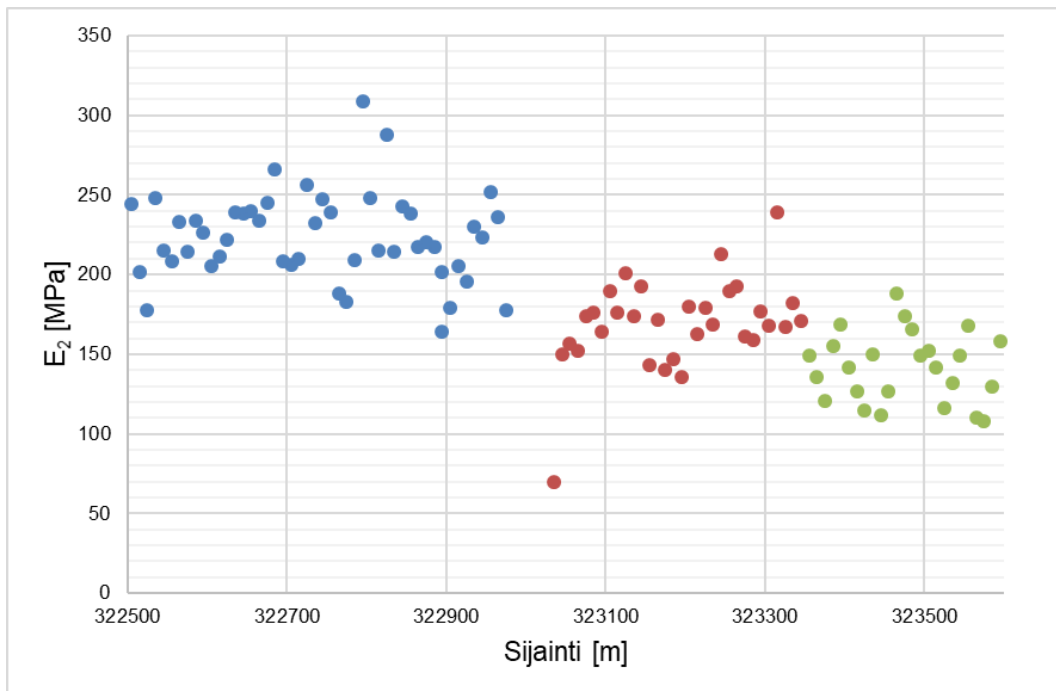
Kuva 6.1: Mittauspäivänä tiivistetty eristyskerros

Mittaukset tehtiin Kuab-pudotuspainolaitteella, joka on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.2: Kuab-pudotuspainolaite Luumäki-Imatra-ratahankkeella

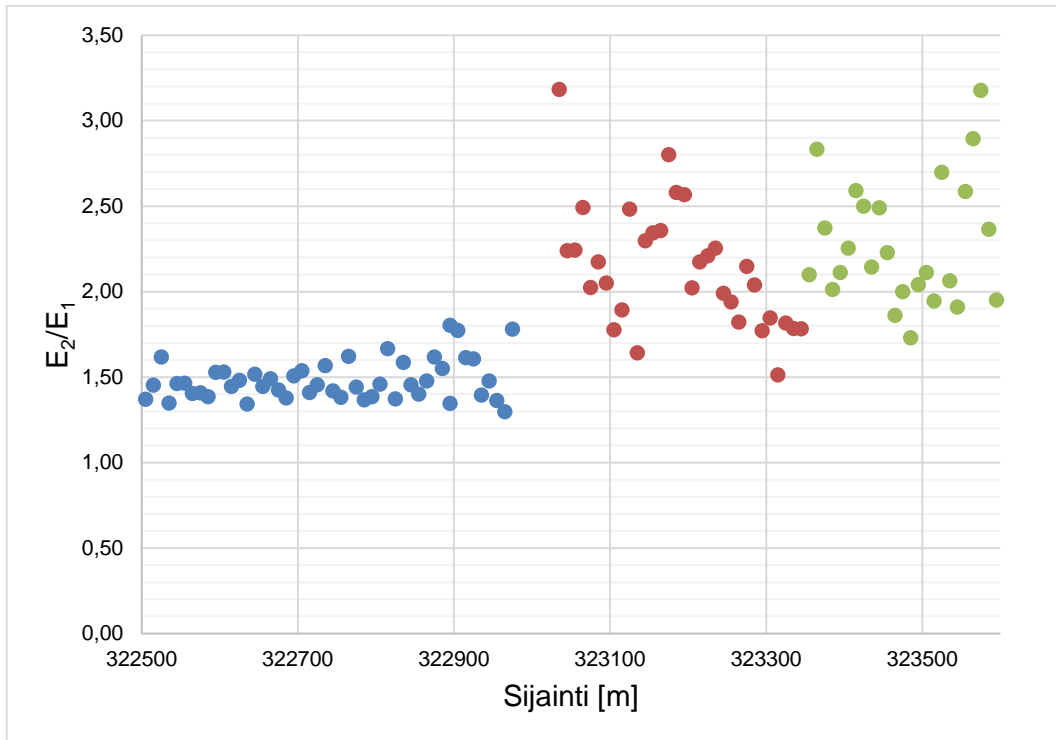
Mittaukset tehtiin rakenteesta 10 m välein ja yhteensä mittauspisteitä oli 106. Kuvassa 6.3 on esitetty mitatut kantavuuden E_2 -arvot.



Kuva 6.3: PPL-mittauksista saadut E_2 -arvot

Kuvassa sinisellä on merkitty km-välin 322+505 – 323+000 välikerroksen, punaisella km-välin 323+000 – 323+445 välikerroksen ja vihreällä km-välin 323+455 – 323+590 eristyskerroksen kantavuudet. Heikoin mittaustulos (70 MPa) mitattiin sillan päädyssä km 323+035 kohdasta, joka mittaushetkellä oli vielä tiivistämättä.

Kuvassa 6.4 on esitetty mitatut tiiviyssuhteet.



Kuva 6.4: PPL-mittauksista saadut tiiviyssuhteiden arvot

Mittaustulokset jakautuvat alueittain selvästi kolmeen osaan. Taulukossa 6.1 on esitetty mitaustulosten minimi- ja maksimiarvot sekä keskiarvot. Km 323+035 mitaustulos on jätetty keskiarvon laskennassa huomioimatta.

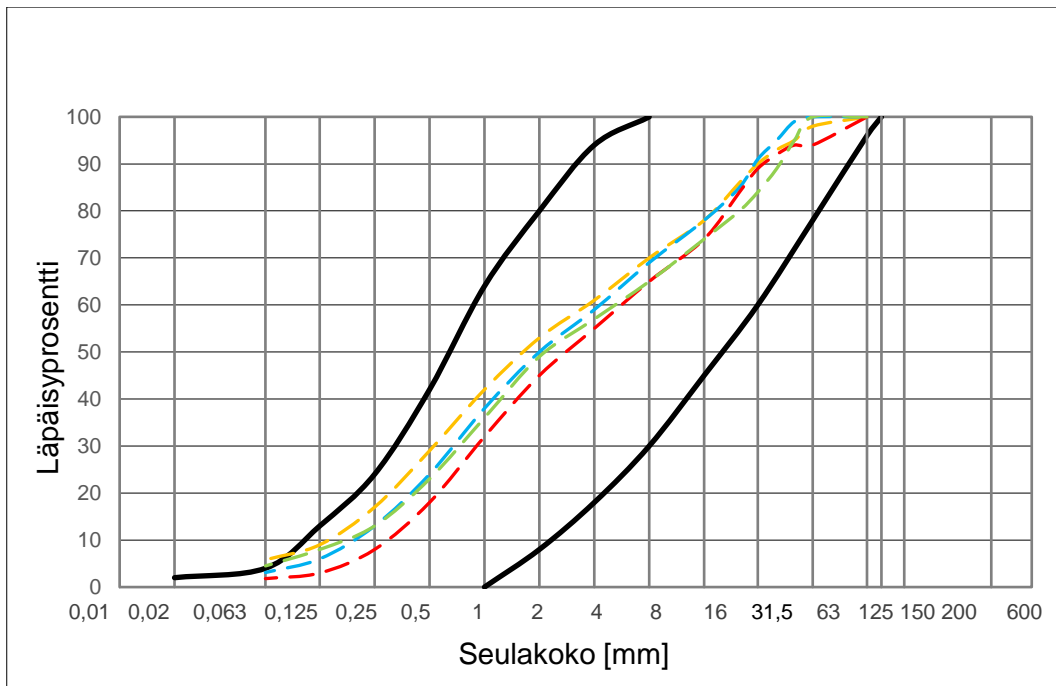
Taulukko 6.1: PPL-mittausten tulokset osuuksittain

| Kilometriväli | E_2 keskiarvo [MPa] | E_2 min [MPa] | E_2/E_1 keskiarvo | E_2/E_1 max |
|-------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| 322+505 – 323+000 | 223,6 | 164 | 1,48 | 1,80 |
| 323+000 – 323+445 | 172,8 | 136 | 2,10 | 2,80 |
| 323+455 – 323+590 | 141,8 | 108 | 2,28 | 3,18 |

Km-välillä 322+505 – 323+000 tutkimukset täyttävät InfraRYLin (2020) mukaisen välikerroksen kantavuuden vähimmäisvaatimuksen 160 MPa sekä keskiarvovaatimuksen 185 MPa. Myös tiiviyssuhde on jokaisessa pisteessä vaatimuksia parempi. Km-välillä 323+000 – 323+445 välikerroksen kantavuusarvojen keskiarvo ei täytä vaatimusta. Yksittäisten pisteiden kantavuusvaatimus alittui 8 pisteessä. Tiiviyssuhdevaatimus alittuu 11 pisteessä. Km-välillä 323+455 – 323+590 eristyskerroksen kantavuusvaatimus 150 MPa mitausten keskiarvolle ei täyty. Yksittäisten pisteiden kantavuusvaatimus 125 MPa alittuu 6 pisteessä. Tiiviyssuhdevaatimus alittuu 18 pisteessä.

Tutkitulta osuudelta otettiin neljä maanäytettä, joista määritettiin rakeisuudet. Näytteet otettiin kohdista km 322+967 (keltainen), 323+110 (sininen), 323+365 (punainen) ja 323+586 (vihreä). Rakeisuuskäyrät ja InfraRYLin (2020) vaatimus-

ten mukaisen eristys- ja välikerroksen luonnonmateriaalin rakeisuusohjealueen rajat on esitetty kuvassa 6.5. Kaikki tämän tutkimuksen seulontalomakkeet on esitetty työn liitteessä B.



Kuva 6.5: Valmiista rakenteesta otettujen maanäytteiden rakeisuudet

Neljä näytettä ovat rakeisuudeltaan samankaltaisia ja rakeisuuskäyrän muodoltaan melko suoria. Taulukossa 6.2 on esitetty materiaalien vesipitoisuudet, keskirakekoot, raekokosuhteet C_u , rakeisuuskäyrän kaarevuutta kuvaavat luvut C_c ja hienoainespitoisuudet.

Taulukko 6.2: Tutkitun rataosuuden materiaalin ominaisuudet

| Ratakilometri | w [%] | d_{50} [mm] | C_u | C_c | <0,063 [%] |
|---------------|-------|---------------|-------|-------|------------|
| 322+967 | 3,6 | 1,7 | 26,9 | 0,56 | 5,8 |
| 323+110 | 2,0 | 2,0 | 23,1 | 0,57 | 3,1 |
| 323+365 | 0,6 | 2,8 | 19,7 | 0,50 | 1,8 |
| 323+568 | 3,1 | 2,2 | 31,5 | 0,62 | 4,5 |

Näytteiden materiaalit sijoittuvat ohjealueelle lukuun ottamatta km 322+967 ja 323+568 otettujen näytteiden hienoainespitoisuuksia. Väli- ja eristyskerrosten hienoainespitoisuuden tulee InfraRYLin (2020) mukaan olla alle 4%, mutta 1,5% ylitus sallitaan kantavuus- ja tiiviysvaatimusten täyttyessä.

Km 323+365 kohdalla materiaali oli pinnasta silmämääräisesti irtonaista. Tämä havainto selittyy materiaalin pienellä hienoainespitoisuudella ja vesipitoisuudella. Myös raekokosuhte C_u on muita näytteitä hieman alhaisempi. Kantavuuserot johtuvat todennäköisesti ajan kuluessa tapahtuneesta lujittumisesta, koska rakeisuudeltaan materiaalit ovat melko samankaltaisia.

6.2 Koepenkereet

Luonnonmateriaaleista tehtyjen penkereiden kantavuuksia tutkittiin soranottopaikoilla tehdyillä kokeilla. Koepenkereet tehtiin erilaisista soranottoaikoilta löytyvistä materiaaleista, joiden rakeisuus arvion perusteella oli eristys- ja välikerrosten ohjealueella tai hieman sen ulkopuolella. Tavoitteena oli löytää kattavasti eri rakeisuuksien materiaaleja. Koepenkereille tehtiin levykuormituskokeita ja Troxler-mittauksia. Mitattavia suureita olivat kantavuus E_2 , tiiviyssuhde E_2/E_1 , märkäirtotiheys ρ_w , kuivairtotiheys ρ_d , ja vesipitoisuus w . Penkereet tiivistettiin 13 t yksivalssijyrällä kastelua apuna käyttäen. Koepenkereiden tiivistämiseen käytetty valssijyrä on esitetty kuvassa 6.6.



Kuva 6.6: Koepenkereiden tiivistämiseen käytetty 13 t valssijyrä

Kuvassa 6.7 on esitetty koepenkereiden kasteluun käytetty kasteluvaunu.



Kuva 6.7: Kasteluun käytetty kalusto

Varsinaisten koepenkereiden lisäksi tutkittiin myös jyräskertamäärän, kastelun, jyräpainon ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden vaikutusta. Kokeita tehtiin myös ajouralta, jossa maa oli maansiirtoautojen tiivistämää. Pohjamaa oli kaikkien penkereiden alla tiivistä soraa.

Koepenkeret A, B ja C rakennettiin Swerock Oy:n omistamalla Saarlammen soranottopaikalla 20.-22.10.2020. Penger B tehtiin välätystä materiaalista, jota on käytetty LUIMA-hankkeen radan rakennekerroksiin. Materiaalit A ja C olivat suoraan rintauksesta otettuja. Kuvassa 6.8 on esitetty penkeren A ensimmäinen tiivistetty kerros.



Kuva 6.8: Koepenkeren A ensimmäinen kerros

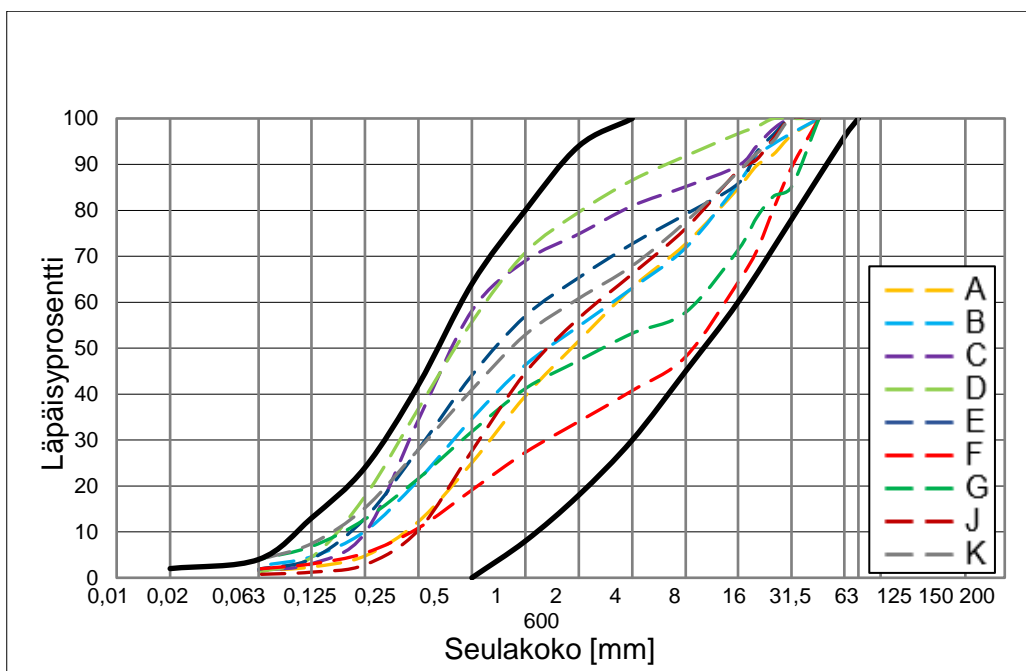
Kuvasta 6.8 nähdään penkeren A lisäksi Saarlammen soranottopaikan rintausta. Lähempänä maanpintaa olevissa kerroksissa on selvästi karkeampaa soraa kuin alemmissä. Rintauksessa näkyy myös hienorakeisempia ohuita silttikerroksia. Materiaali, jota vietiin LUIMA-hankkeen eristys- ja välikerrokseen, oli sekoitus näitä eri materiaaleja. Ylisuuret rakeet poistettiin välppäämällä ja selvästi hyvin hienorakeisia hieikkoja oli siirretty sivuun.

Koepenkeret D, E ja F rakennettiin Swerock Oy:n Karsturannan soranottopaikalla 26.-27.10.2020. Penkereet D ja E tehtiin kasoilla olevista materiaaleista, jotka oli aiemmin todettu heikosti radan eristys- ja välikerrokseen soveltuviksi. Penger F tehtiin karkearakeisesta sorasta, joka saatiin lähellä maanpintaa olevasta kerroksesta. Koepenkeret G, H, I, J ja K rakennettiin Destia Oy:n omistamalla Karsturannan soranottopaikalla 27.-28.10.2020, joka sijaitsee Swerock Oy:n soranottopaikan läheisyydessä. Penkereet G, J ja K olivat varsinaisia koepenkereitä. Penkereillä H ja I tutkittiin jyräskertamäärien, käytettävän jyrän ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden vaikutusta. Penkereet G, H ja I rakennettiin kasalla olevasta materiaalista, jota on käytetty radan eristys- ja välikerrokseen. Penkereet J ja K tehtiin rintauksesta otetuista luonnonmateriaaleista. Mittausten jälkeen penkereet jyrättiin kerran, jotta alusta olisi tasainen seuraavia pudotuspainolaitemittauksia varten. Taulukossa 6.3 on esitetty yhteenveto koepenkereistä.

Taulukko 6.3: Koepenkereet

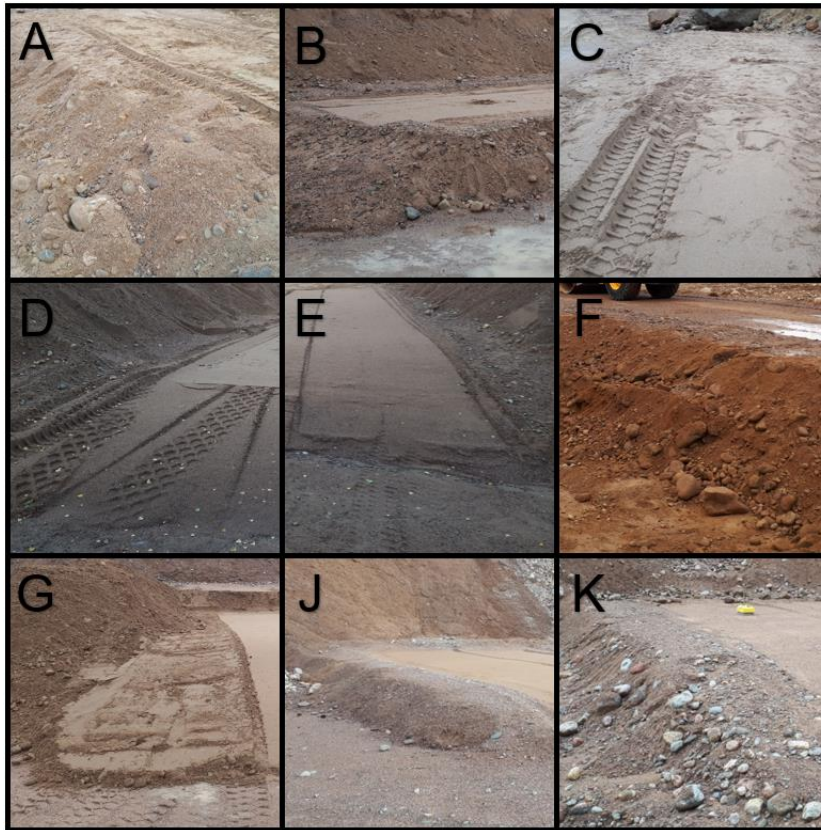
| Penger | Sijainti | Ajankohta | Kerrokset | Jyrä | Huomioita |
|----------|---------------------------|------------|----------------|------|---|
| A | Saarlampi Swerock Oy | 20.-22.10. | 2 x 400 mm | 13 t | |
| B | Saarlampi Swerock Oy | 20.-22.10. | 2 x 400 mm | 13 t | |
| C | Saarlampi Swerock Oy | 20.-22.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |
| D | Karsturanta Swerock Oy | 26.-27.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |
| E | Karsturanta Swerock Oy | 26.-27.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |
| F | Karsturanta Swerock Oy | 26.-27.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |
| G | Karsturanta Destia Oy | 27.-28.10. | 1 x 500 mm | 13 t | Jyräskertamäärän vaikutuksen tutki- minen |
| H | Karsturanta Destia Oy | 27.-28.10. | 1 x 500 mm | 23 t | Jyräskertamäärän vaikutuksen tutki- minen |
| I | Karsturanta Destia Oy | 27.-28.10. | 1 x 1200 mm | 23 t | Jyräyksen syvyysvai- kutuksen tutkiminen |
| J | Karsturanta Destia Oy | 27.-28.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |
| K | Karsturanta Destia Oy | 27.-28.10. | 1 x 500 mm | 13 t | |

Kaikkien penkereiden materiaaleille tehtiin rakeisuusmääritykset pesuseulonnalla. Materiaalien rakeisuuskäyrät ja eristys- ja välikerrosten rakeisuusvaatimukset on esitetty kuvassa 6.9.



Kuva 6.9: Koepenkereiden materiaalien rakeisuuskäyrät

Koepenkereet ja niiden materiaalit näkyvät kuvassa 6.10.



Kuva 6.10: Koepenkereiden materiaalit

Kaikkien koemateriaalien rakeisuuskäyrä osuu ohjealueen sisäpuolelle. Näytteissä ei ollut mukana suurimpia kiviä, joten on mahdollista, että joidenkin materiaalien rakeisuus ylittää ohjealueen suurimman sallitun raekoon 150 mm. Taulukossa 6.4 on esitetty rakeisuuskäyrien muotoa kuvaavat parametrit C_c , raekokosuhteet C_u , keskiraekoot D_{50} ja hienoainespitoisuudet.

Taulukko 6.4: Koepenkereiden materiaalien rakeisuusparametrit

| Penger | C_c | C_u | d_{50} [mm] | < 0,063 [%] |
|----------|-------|-------|---------------|-------------|
| A | 0,60 | 16,3 | 3,65 | 1,5 |
| B | 0,41 | 25,2 | 2,70 | 2,6 |
| C | 0,69 | 4,5 | 0,79 | 1,6 |
| D | 0,75 | 7,3 | 0,81 | 1,2 |
| E | 0,58 | 12,9 | 1,37 | 1,9 |
| F | 0,59 | 58,5 | 17,29 | 1,9 |
| G | 0,24 | 98,4 | 5,49 | 4,0 |
| J | 0,49 | 10,6 | 2,73 | 0,7 |
| K | 0,53 | 23,7 | 1,69 | 3,9 |

Penkereen A kohdalta mitattiin levykuormituskokeella pohjamaan kantavuus yhdessä pisteessä (A1). Kantavuudeksi saatiin $E_2 = 162,8$ MPa. Penkereet A ja B rakennettiin kahdessa noin 400 mm kerroksessa. Näillä penkereillä ensimmäinen kerros tiivistettiin ilman kastelua, jonka jälkeen tehtiin viisi levykuormituskoeetta ja

Troxler-mittaukset. Penkereiden A ja B toinen kerros tiivistettiin aluksi ilman kastelua, jonka jälkeen tehtiin levykuormituskokeet. Lopuksi penkereet tiivistettiin kastelua käyttäen, jonka jälkeen tehtiin levykuormituskokeet. Näille penkereille tehtiin vielä lisää mittauksia seuraavana päivänä.

Penger C rakennettiin yhdessä noin 500 mm kerroksessa ja tiivistettiin heti kastelua käyttäen. Rakeisuudeltaan pengermateriaali on ohjealueen vasemmassa reunassa. Levykuormituksia tehtiin kaksi, joista kummallakin suorituskeralla levy painui voimakkaasti ja pengeri alkoi murtua noin 40–50 kN kuormituksen kohdalla. Kuormituslevyn painuminen on esitetty kuvassa 6.11.



Kuva 6.11: Koepenkeren C levykuormituskoe

Riittävän suurten painumien jälkeen kuormitus saatiin nostettua tasolle 60 kN ja mittauksista saatiin tulokset.

Penkereet D, E ja F rakennettiin noin 500 mm paksuisiksi ja tiivistettiin ensin ilman kastelua. Kuiville penkereille tehtiin levykuormituskokeet ja Troxler-mittaukset, jonka jälkeen penkereet tiivistettiin uudelleen kastelua käyttäen. Penkereellä G testattiin jyräskertamäärän vaikutusta kuivairtotiheyteen. Penger tiivistettiin ilman kastelua 13 t valssiyrällä kolmessa kaistaleessa. Ensimmäinen osa tiivistettiin kahdella ylityskerralla pitkällä iskulla, toinen osa tiivistettiin neljällä ylityskerralla pitkällä iskulla ja kolmas osa tiivistettiin kuudella ylityskerralla, joista neljä kertaa pitkällä ja kaksi kertaa lyhyellä iskulla. Kaistaleille tehtiin Troxler-mittaukset, joiden tulokset on esitetty taulukossa 6.5.

Taulukko 6.5: Ylityskertamäärän vaikutus tiiviyteen penkereellä G

| Ylityskerrat | 2 | 4 | 6 |
|---|----------|----------|----------|
| ρ_w [kg/m³] | 2105,8 | 2144,8 | 2186,0 |
| ρ_d [kg/m³] | 2029,8 | 2060,8 | 2104,5 |
| w [%] | 3,8 | 4,1 | 4,1 |

Taulukossa esitetyt arvot ovat neljästä pisteestä tehtyjen Troxler-mittausten keskiarvoja. Tuloksista havaitaan, että kuuteen ylityskertaan asti rakenteen kuivairto-
tiheys kasvaa. Ylityskertamäärän vaikutuksen tutkimisen jälkeen pengeri tiivistettiin
kastelua käyttäen. Penkereelle tehtiin levykuormituskokeet tiivistämistä seuraava-
vana päivänä. Yöllä oli satanut runsaasti, joten penkereen vesipitoisuus oli vielä
korkea ja rakenteen pinta selvästi vetinen.

Penger H rakennettiin yhtenä noin 500 mm paksuisena kerroksena samasta mate-
riaalista kuin penger G. Penkereellä testattiin jyräskertamäärän vaikutusta tiiviy-
teen 23 t yksivalssiyrällä. Penger jaettiin kolmeen kaistaleeseen, jotka tiivistettiin
1, 2 ja 3 kertaa ilman kastelua. Troxler-mittausten tulokset on esitetty taulukossa
6.6.

Taulukko 6.6: 23 t jyrän ylityskertamäärän vaikutus tiiviyteen penkereellä H

| Ylityskerrat | 1 | 2 | 3 |
|---|----------|----------|----------|
| ρ_w [kg/m³] | 2148,3 | 2172,3 | 2175,8 |
| ρ_d [kg/m³] | 2066,3 | 2087,8 | 2089,8 |
| w [%] | 4,0 | 4,1 | 4,1 |

Painavammalla jyräskalustolla päästiin kevyempää vastaaviin tiiviyсарvoihin pie-
nemällä ylityskertamäärällä. Penkereellä I testattiin jyräyksen syvyyssvaikutusta
ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuutta. Penger rakennettiin 1,2 m korkuisena
ja tiivistettiin 23 t jyrällä yhtenä kerroksena ilman kastelua. Tiivistämiseen käytetty
23 t jyrä on esitetty kuvassa 6.12.



Kuva 6.12: Penkereen I tiivistys 23 t valssijyrällä

Rakenteelle tehtiin neljä levykuormituskoetta ja seitsemän Troxler-mittausta rakenteen pinnasta. Levykuormituskokeiden E_2 keskiarvoksi saatiin 99,8 MPa ja kuivairtitiheyden keskiarvoksi 2175,7 kg/m³. Mittausten jälkeen penkereestä kaivettiin ylin 0,5 m pois. Kaivupohjasta tehtiin Troxler-mittaukset rakenteen pinnasta ja 250 mm syvyydeltä neljästä pisteestä. Pinnasta mitattu kuivairtitiheyden keskiarvo oli 1991,5 kg/m³ ja 250 mm syvyydeltä 2113,5 kg/m³. Mittausten jälkeen kaivupohja tiivistettiin uudelleen, jonka jälkeen rakenteesta tehtiin Troxler-mittaukset. Uudelleen tiivistetyn kaivupohjan pinnasta saatu kuivairtitiheyden keskiarvo oli 2235,5 kg/m³.

Penkereet J ja K rakennettiin yhdessä noin 500 mm kerroksessa ja ne tiivistettiin heti kastelua käyttämällä. Kummallekin tehtiin neljä levykuormituskoetta ja Troxler-mittaukset.

Jokainen taulukoissa esitetty levykuormituskokeen ja Troxler-mittauksen tulos on usean mittauksen keskiarvo. Yksityiskohtaiset mittaustulokset on esitetty työn liitteessä A. Ilman kastelua tiivistetyille penkereille tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset sekä Troxler-mittauksilla mitatut kuivairtitiheydet ja vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 6.7.

Taulukko 6.7: Ilman kastelua tiivistetyille penkereille tehtyjen mittausten tulokset

| Penger | E_2 [MPa] | E_2/E_1 | ρ_d [kg/m ³] | Tiiviyssaste [%] | w [%] |
|-----------------|-------------|-----------|-------------------------------|------------------|-------|
| A 1. krs | 144,7 | 5,9 | 2058,6 | 96,2 | 2,7 |
| A 2. krs | 135,6 | 6,7 | 1936,6 | 90,5 | 2,3 |
| B 1. krs | 138,0 | 5,9 | 1993,0 | 91,4 | 4,7 |
| B 2. krs | 131,0 | 5,7 | 2028,8 | 93,1 | 3,3 |
| D | 80,9 | 8,3 | 1866,6 | 95,2 | 3,1 |
| E | 115,9 | 6,0 | 1901,4 | 92,8 | 4,2 |
| F | 229,7 | 5,8 | 2153,5 | 96,6 | 2,9 |

Kastelua käyttämällä tiivistettyjen penkereiden levykuormitus- ja Troxler-mittausten tulokset on esitetty taulukossa 6.8.

Taulukko 6.8: Kastelua käyttämällä tiivistetyille penkereille tehtyjen mittausten tulokset

| Penger | E₂ [MPa] | E₂/E₁ | ρ_d [kg/m³] | Tiiviyssaste [%] | w [%] |
|---------------|----------------------------|------------------------------------|---|-------------------------|--------------|
| A | 158,3 | 5,0 | 1948,2 | 91,0 | 5,0 |
| B | 164,7 | 4,3 | 2089,2 | 95,8 | 5,7 |
| C | 57,7 | 6,4 | 1803,6 | 94,9 | 6,7 |
| D | 70,2 | 9,7 | 1807,6 | 92,2 | 5,3 |
| E | 124,9 | 6,3 | 1935,8 | 94,4 | 6,2 |
| F | 276,3 | 5,3 | 2202,0 | 98,7 | 5,9 |
| G | 87,9 | 6,4 | 2144,8 | 98,4 | 5,2 |
| J | 97,8 | 10,6 | 1888,0 | 90,8 | 2,3 |
| K | 127,5 | 7,0 | 2085,5 | 94,4 | 4,3 |

Taulukoista 6.7 ja 6.8 huomataan, että kastelua käyttämällä on päästy korkeampiin kuivairtoihyden ja kantavuuden arvoihin pengertä D lukuun ottamatta. Selvästi heikommat kantavuudet on saavutettu ohjealueen vasemman reunan materiaaleilla, joita ovat C ja D. Kummallakin E₂ arvo on alle 80 MPa. Näillä penkereillä levykuormituskokeen kuormituslevy painui huomattavasti ennen vaaditun kuormitustason saavuttamista. Alle 100 MPa kantavuuksiin jäätiin penkereellä J (97,8 MPa), jonka materiaalin rakeisuuskäyrä on ohjealueen keskellä, mutta jossa karkean hiekan osuus on suuri ja hienoainesta on hyvin vähän. Alle 100 MPa kantavuuteen jäätiin myös penkereellä G (87,9 MPa), jonka materiaali on koepenkereistä toiseksi karkearakeisinta, mutta jonka rakeisuuskäyrä on muodoltaan ongelmallinen. Rakeisuuskäyrän muodon vaikutusta kantavuuteen käsitellään tarkemmin tulosten käsittelyosuudessa. Selvästi paras kantavuus saavutettiin penkereellä F, jossa materiaali on kaikkein karkearakeisinta. Penkereen F E₂-arvo on 276,3 MPa, joka on reilusti eristys- ja välikerrosten vaatimuksia korkeampi. Eristyskerroksen kantavuuden keskiarvovaatimuksen 130 MPa täyttävät materiaalit A, B ja F. Lisäksi välikerroksen kantavuuden keskiarvovaatimuksen 160 MPa täyttävät materiaalit B ja F. Kaikilla penkereillä tiiviyssuhde E₂/E₁ jäi selvästi vaatimustasoa suuremmaksi.

Noin viikon päästä koepenkereiden rakentamisesta 3.11.2020 penkereille D–K tehtiin pudotuspainolaitemittauksia samalla kalustolla kuin 28.9.2020. Mittauspisteet sijaitsivat penkereiden keskilinjalla 1–2 m välein. Kuvassa 6.13 näkyy penkereen E pinta PPL-mittausten jälkeen.



Kuva 6.13: PPL-mittaukset penkereelle E

Mittauspisteiden tuloksista laskettiin keskiarvot, jotka on esitetty taulukossa 6.9.

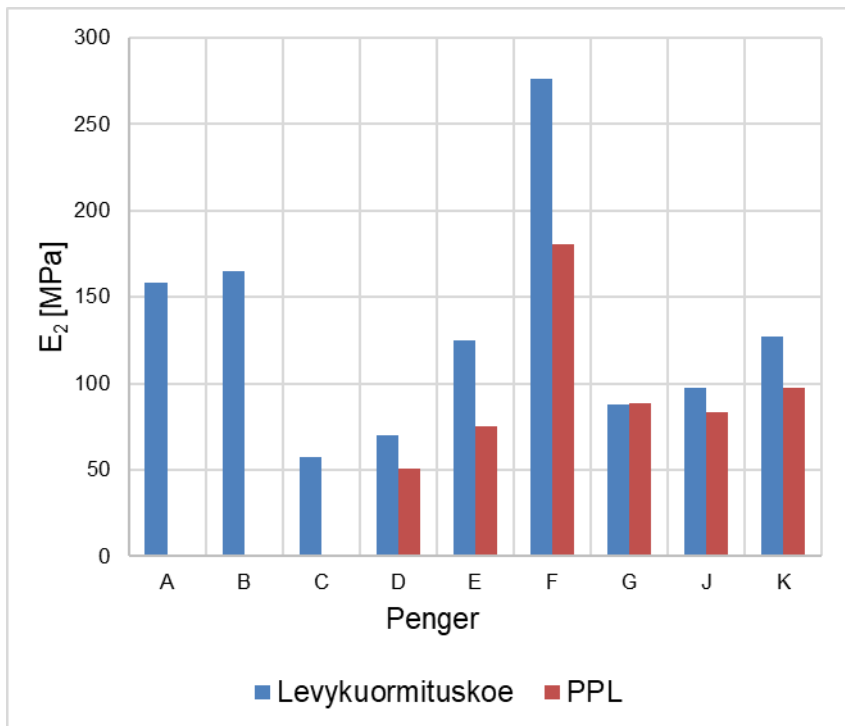
Taulukko 6.9: Koepenkereille tehtyjen PPL-mittausten tulokset

| Penger | E₂ [MPa] | E₂/E₁ |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| D | 50,4 | 2,39 |
| E | 75,4 | 3,16 |
| F | 180,5 | 2,48 |
| G | 88,4 | 2,36 |
| I kaivettu 0,5 m | 86,3 | 2,38 |
| I päältä | 62,7 | 2,71 |
| J | 83,4 | 2,79 |
| K | 97,7 | 2,76 |

Pudotuspainolaitemittausten perusteella penkereistä F täyttää eristyskerrokselle asetetun E₂-vaatimuksen 150 MPa, mutta ei välikerrokselle asetettua vaatimusta 185 MPa. Penger F täyttää myös eristyskerroksen tiiviyssuhteelle asetetun vaatimuksen, mutta ei välikerroksen vaatimusta.

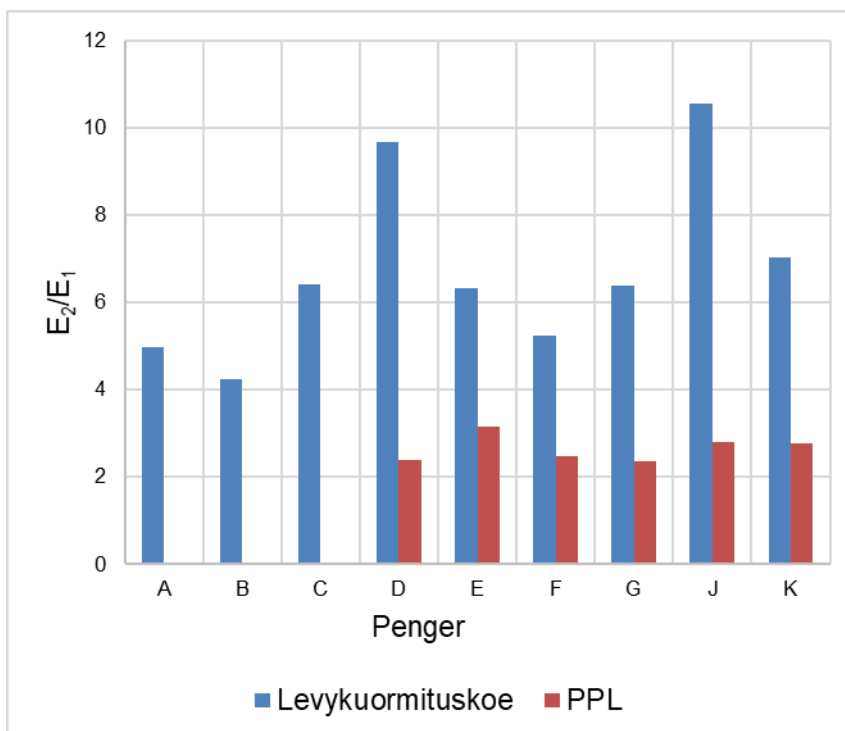
Taulukossa 6.9 esitettyjen penkereelle I tehtyjen PPL-mittausten tuloksista nähdään, että kantavuus tiivistetyn kaivupohjan päältä on suurempi kuin saman penkereen päältä tehdyissä mittauksissa. Kaivupohjasta mitattu kantavuus on lähes sama, kuin samasta materiaalista rakennetun penkereen G päältä mitattu kantavuus. Penkereen päältä saatu heikompi kantavuus osoittaa sen, että koko penger on jäänyt hieman löyhempään tilaan, kun kerralla tiivistettävä kerros on ollut liian paksu.

PPL-tulokset ovat kokonaisuudessa samansuuntaiset kuin levykuormituskokeiden tulokset. Levykuormituskokeiden ja PPL-mittausten E_2 -arvojen vertailu on esitetty kuvassa 6.14.



Kuva 6.14: PPL-mittausten ja levykuormituskoe tulosten vertailu

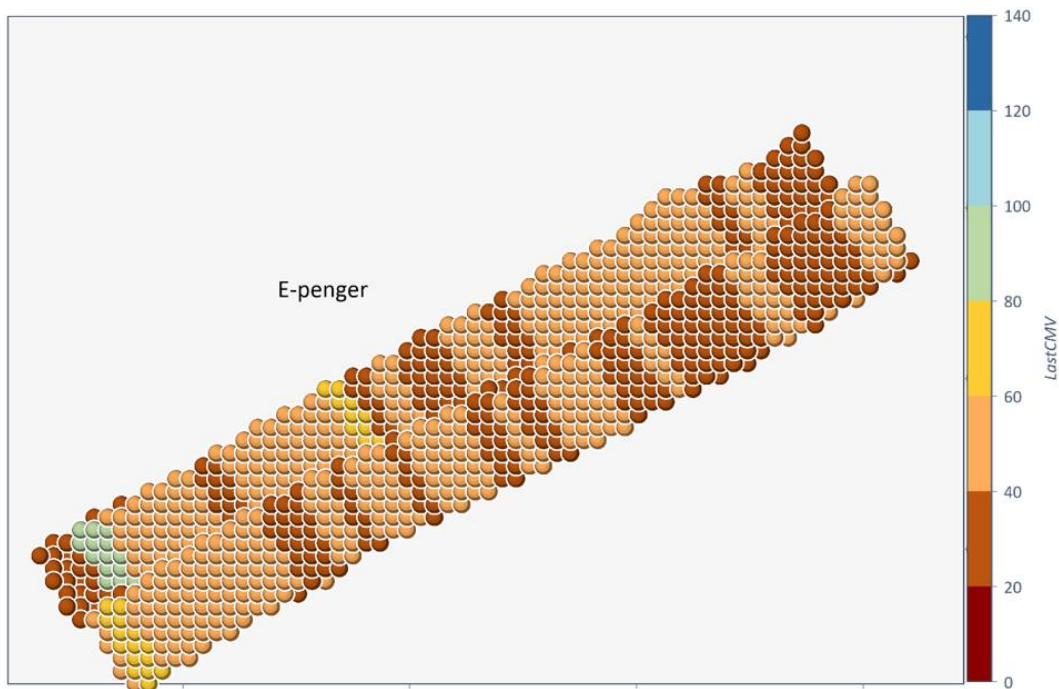
Kuvasta nähdään, että suuremmilla E_2 :n arvoilla levykuormituskokeen ja pudotuspainolaitteen ero on suurempi kuin pienillä kantavuuksilla. Tiiviyssuhteet levykuormituskokeiden ja PPL-mittausten perusteella on esitetty kuvassa 6.15.



Kuva 6.15: Tiiviyssuhteiden vertailu

Tiiviyssuhteiden mittaustuloksissa on suuri ero levykuormituskokeiden ja pudotuspainolaitemittausten tuloksissa. Kaikki PPL-mittaustulokset ovat välillä 2–3, kun taas levykuormituskokeiden tulokset vaihtelevat välillä 4–11. Tulokset ovat myös osittain erisuuntaisia. Levykuormituskokeiden perusteella korkein E_2/E_1 on penkereellä J, kun taas PPL-mittausten perusteella korkein E_2/E_1 on penkereellä E. Mahdollisena eron syynä on esikuormitus, joka tehdään kummallakin mittaustavalla ennen varsinaista mittausta. Levykuormituskokeessa esikuormituksen suuruus on 3,5 kN varsinaisen kuormituksen ollessa 60 kN. PPL-mittauksessa esikuormituksen suuruus on 1462 kg kun sen varsinaisen kuormituksen suuruus on 5000 kg. PPL-mittauksessa esikuormitus on suhteessa varsinaiseen mittaukseen selvästi suurempi kuin levykuormituskokeessa.

Koepenkereiden tiivistämiseen käytettävässä jyrässä oli mukana jatkuvatoiminen GPS-paikannuksella varustettu tiivistyksentarkkailulaite. Kaikkia koepenkereitä tiivistettiin siihen asti, kunnes jyrän mittarin mukainen tiiviyttä kuvaava CMV-arvo ei enää kasvanut. Kuvassa 6.16 on esitetty penkereen E CMV-arvot viimeiseltä jyrän ylityskerralta. Työn liitteessä C on esitetty kaikkien koepenkereiden jyrämittaritulos-



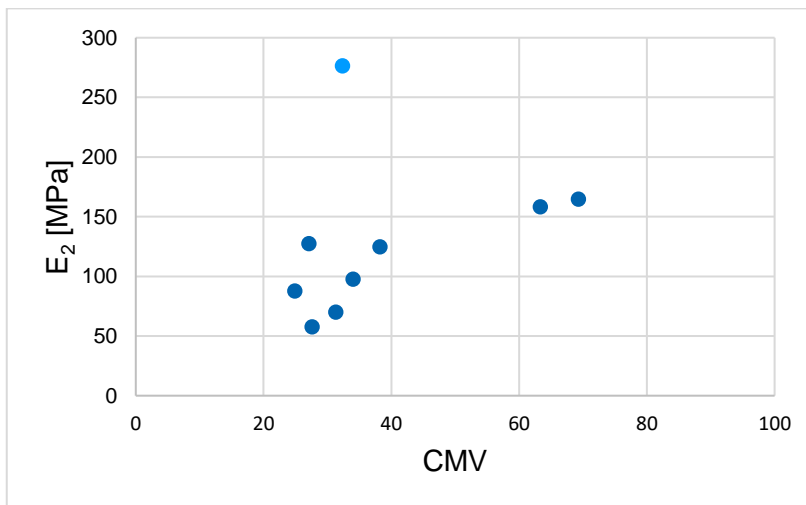
Kuva 6.16: Penkereen E CMV-arvot

Penkereen E CMV-arvo on keskimäärin välillä 40–60, mutta yksittäisiä tästä poikkeavia arvoja on useassa kohdassa. Taulukossa 6.10 on esitetty kaikkien koepenkereiden CMV-arvot, kantavuudet E_2 ja tiiviyssuhteet E_2/E_1 .

Taulukko 6.10: Koepenkereiden CMV-arvot ja levykuormituskokeiden tulokset

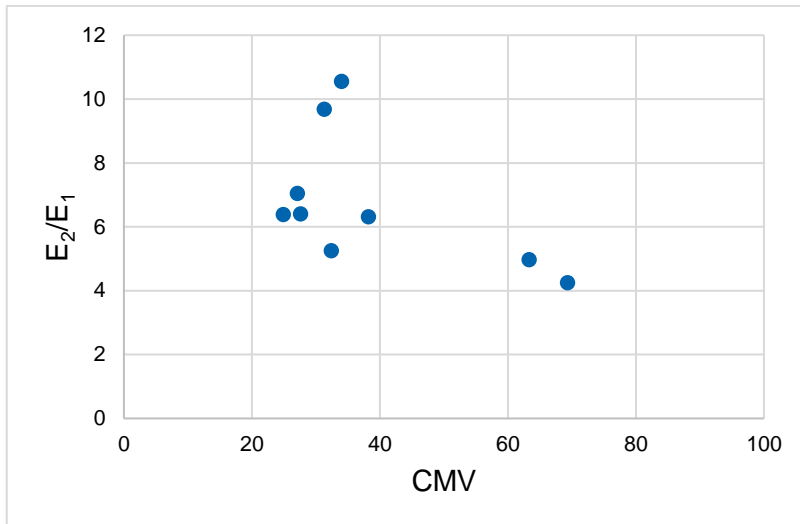
| Penger | CMV | E_2 [MPa] | E_2/E_1 |
|--------|------|-------------|-----------|
| A | 63,3 | 158,3 | 5,0 |
| B | 69,3 | 164,7 | 4,3 |
| C | 27,6 | 57,7 | 6,4 |
| D | 31,3 | 70,2 | 9,7 |
| E | 38,2 | 124,9 | 6,3 |
| F | 32,4 | 276,3 | 5,3 |
| G | 24,9 | 87,9 | 6,4 |
| J | 34,0 | 97,8 | 10,6 |
| K | 27,1 | 127,5 | 7,0 |

Penkereillä, joilla CMV-arvo on matala, on joissain tapauksissa matala kantavuus ja korkea tiiviyssuhde. Suurimpana poikkeuksena on pengeri F, jonka kantavuus on selvästi suurin, mutta CMV-arvo on vain 32,4. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että viimeisillä ylityskerroilla pengeri on ollut niin jäykkä, että valssi on alkanut värähtelemään kaksoishyppyjä. Kaksoishyppyjen tapauksessa mittarin ilmoittama CMV-arvo on virheellinen. Kuvassa 6.17 on esitetty kantavuuden riippuvuus CMV-arvosta. Penkereen F virheellinen mittaustulos on esitetty punaisella pisteellä.



Kuva 6.17: Kantavuuden riippuvuus CMV-arvosta koepenkereillä

Yleisesti ottaen koepenkereiden kantavuus kasvaa CMV-arvon kasvaessa, mutta kantavuuden tarkka arviointi ei sen perusteella ole mahdollista. Penkereen F mittaustulos näkyy selvästi muista poikkeavana pisteenä. Kuvassa 6.18 on esitetty vastaava yhteys tiiviyssuhteen ja CMV-arvon välille.



Kuva 6.18: Tiiviyssuhteen riippuvuus CMV-arvosta koepenkereillä

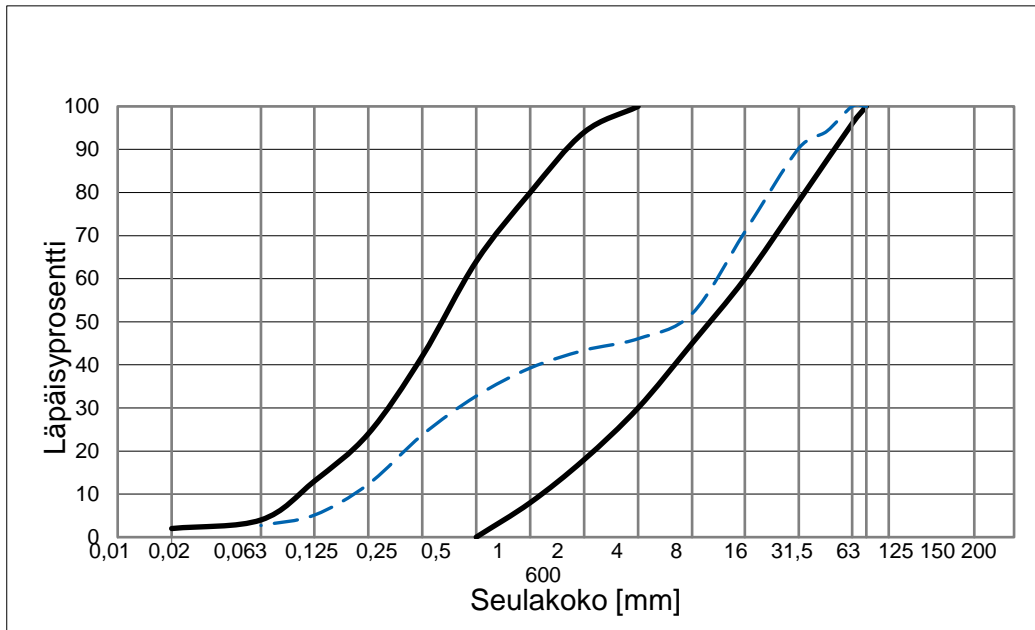
Korkeilla CMV-arvoilla koepenkereiden tiiviyssuhteet ovat kaikkein matalimpia. CMV-arvon ollessa välillä 20–40, sen vaikutusta tiiviyssuhteeseen ei voida havaita koetuloksista. Yleisesti ottaen yhteys on vastaava kuin kantavuuden ja CMV-arvon välinen yhteys.

6.3 Mittaukset ajouralta

Saarlammen soranotto paikalla tehtiin varsinaisten koepenkereiden lisäksi levykuormituskokeita aktiivisessa käytössä olleelta ajouralta. Mittauksen tarkoituksena oli löytää vertailukohta sille, kuinka korkeaan kantavuuteen koemateriaaleja vastaavalla soralla on mahdollista päästä. Materiaali mittauskohdassa oli silmämääräisesti arvioituna hieman karkeampaa kuin penkereen A materiaali. Uralta tehtiin kaksi levykuormituskokeita, joiden keskiarvona saatiin E_2 -arvoksi 297,7 MPa ja tiiviyssuhteeksi 2,1. Kokeiden jälkeen kohta jyrättiin 13 t yksivalssijyrällä usealla ylityskerralla ja mittaukset toistettiin. Uusien levykuormituskokeiden tuloksena E_2 -arvoksi saatiin 152,8 MPa ja tiiviyssuhteeksi 3,7. Tiivistämisen jälkeinen kantavuus on lähellä penkereen A kantavuutta. Kokeesta voidaan päätellä, että jyrääminen häiritsi kohdetta, minkä seurauksena kantavuus putosi noin puoleen. Pitkän ajan kuluessa tapahtuvan liikennekuormituksen seurauksena voidaan päästä selvästi suurempiin kantavuus- ja tiiviyssarvoihin kuin mitä välittömästi jyrällä tiivistämisen jälkeen päästään.

6.4 Koerakenne Tampereen yliopiston rakennushallissa

Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen rakennushallissa tehtiin 21.-22.1.2021 koerakenne, jolla tutkittiin rakeisuuden vaikutusta kantavuuteen ja tiiviyteen kuten muilla tämän tutkimuksen koepenkereillä. Lisäksi koerakenteella tutkittiin ajan ja vesipitoisuuden vaikutusta kantavuuteen. Koepenkereen materiaali oli hankittu Kangasalta Tampereen Autokuljetuksen omistamalta soranotto paikalta. Materiaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.19.



Kuva 6.19: Tampereen yliopiston rakennushallin koerakenteen rakeisuuskäyrä

Materiaalin keskiraekoko d_{50} on 12,71 mm, hienoainespitoisuus 4,7%, raekokosuhte C_U 106,7 ja rakeisuuskäyrän muotoparametri C_C 0,15. Rakeisuuskäyrässä on selvästi nähtävissä hiekkamateriaalin ja karkean soran osuus, mutta 2–16 mm rakeita siinä on vain vähän.

Koerakenne rakennettiin sisätiloissa olevaan neliönmuotoiseen koekuoppaan, jonka sivun pituus oli 2,5 m. Koekuoppa oli syvyydeltään noin 4 m ja se oli tutkimuksen aikana täynnä tiivistä hiekkää. Koekuoppa ennen koerakenteen rakentamista on esitetty kuvassa 6.20.



Kuva 6.20: Koerakenteen alusta ja tiivistämiseen käytetty tärylevy

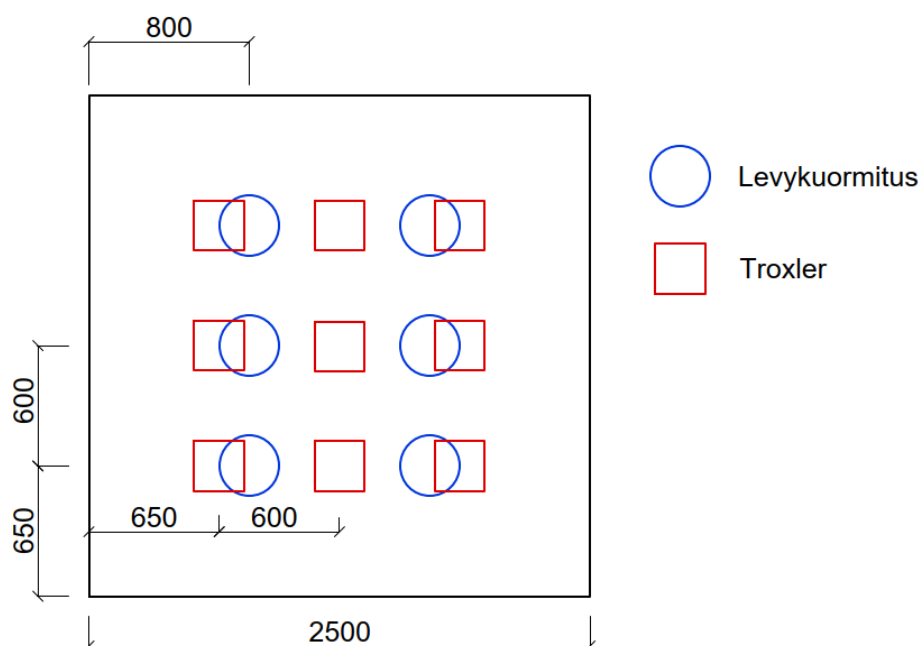
Alusrakenne tiivistettiin kastelua käyttäen ennen koerakenteen tekemistä ja sen päältä tehtiin kaksi levykuormituskoetta, joiden tuloksena kantavuudeksi E_2 saatiin 220,2 MPa ja tiiviyssuhteeksi 3,10.

Koerakenne rakennettiin alusrakenteen päälle 500 mm paksuisena kerroksittain tiivistäen kolmessa kerroksessa. Jokaisen kerroksen tiivistämisessä käytettiin kastelua. Kastelun jälkeen veden annettiin imeytyä rakenteeseen ennen tiivistämistä. Tiivistyskalustona oli sähkökäyttöinen noin 100 kg tärylevy. Valmis koerakenne on esitetty kuvassa 6.21.



Kuva 6.21: Valmis koerakenne

Valmiille koerakenteelle tehtiin yhteensä 9 Troxler-mittausta rakenteen pinnasta ja 6 levykuormituskoetta. Kuvassa 6.22 on esitetty mittauspisteiden sijainnit koerakenteessa.



Kuva 6.22: Koerakenteen mittauspisteiden sijainnit

Rakenteen kantavuudeksi E_2 saatiin 142,2 MPa, tiiviyssuhteeksi E_2/E_1 3,01 ja kuivairtoteiheydeksi ρ_d 2255,3 kg/m³. Korkea kuivairtoteiheys johtuu oletettavasti osittain koekuopan laitojen tuomasta hyödystä tiivistystyölle. Laidat estävät materiaalin leviämisen sivuille ja siten auttavat tehokkaammin kohdistamaan tärylevyn tiivistävän vaikutuksen tiivistettävään rakenteeseen. Lisäksi materiaalin kivisyys vaikutta tiheysmittausten tuloksia korottavasti, jos suurehko kivi osuu juuri mitauskohdan läheisyyteen. Korkea kuivairtoteiheys johti myös epärealistisen korkeaan tiiviyssasteeseen 103,0 %. Vesipitoisuudeksi saatiin Troxler-mittausten keskiarvona 4,2%, mutta rakenteesta otetun näytteen mukaan vesipitoisuus oli 5,3%.

Ensimmäisten mittausten jälkeen koerakenteen pintaa rikottiin lapiolla ja sen päältä ajettiin kaksi kertaa tärylevyllä, jotta levykuormituskokeiden tiivistävä vaikutus saatiin kumottua tulevia mittauksia varten. Seuraavat kokeet tehtiin kolme viikkoa ensimmäisten kokeiden jälkeen 12.2.2021.

Kuivuneelle rakenteelle tehtiin yhdeksän Troxler-mittausta ja kolme levykuormituskoetta. Kantavuudeksi saatiin 205,9 MPa, tiiviyssuhteeksi 2,67, kuivairtoteiheydeksi 2117,9 kg/m³, tiiviyssasteeksi 96,7 % ja vesipitoisuudeksi 1,9 %. Kantavuusarvo kasvoi kolmen viikon aikana selvästi ja vesipitoisuus laski. Kuivairtoteiheys oli myös matalampi kuin ensimmäisissä mittauksissa. Mittausten jälkeen rakenne kasteltiin noin 10–20 mm vesimäärällä. Kastelun jälkeen veden annettiin imeytyä noin puoli tuntia, jonka jälkeen tehtiin uudestaan yhdeksän Troxler-mittausta ja kolme levykuormituskoetta rakenteen toisesta reunasta. Tämän jälkeen kantavuudeksi saatiin 204,6 MPa, tiiviyssuhteeksi 2,75 kuivairtoteiheydeksi 2162,2 kg/m³, tiiviyssasteeksi 98,7 % ja vesipitoisuudeksi 4,1 %. Kantavuus ja tiiviyssuhde pysyivät kastelun jälkeen samana. Vesipitoisuuden arvo kasvoi kastelun seurauksena 2,3 %-yksikköä ja kuivairtoteiheys kasvoi hieman vaikka rakennetta ei tiivistetty välissä.

Koerakenteelle tehtiin mittauksia vielä tätä seuraavalla viikolla 19.2.2021. Ennen näitä mittauksia rakennetta kasteltiin runsaasti kolmena edeltävänä päivänä sekä mittauspäivän aamuna. Koerakenteelle tehtiin edellisten mittauskertojen tapaan 9 Troxler-mittausta ja 3 levykuormituskoetta. Levykuormituskoepisteet sijaitsivat rakenteen keskilinjalla. Mittausten tuloksena kantavuudeksi saatiin 166,8 MPa, tiiviyssuhteeksi 2,85, kuivairtoteiheydeksi 2127,6 kg/m³, tiiviyssasteeksi 96,9 % ja vesipitoisuudeksi 3,9 %. Troxler-laite mittaa pintamittauksessa vesipitoisuutta ainoastaan rakenteen pinnasta, minkä takia vesipitoisuus oli vastaava kuin aiemmissa mittauksissa, vaikka rakennetta oli kasteltu runsaasti. Kantavuus laski hieman runsaan kastelun seurauksena. Rakennushallin koerakenteen kaikki tulokset on kootusti esitetty taulukossa 6.11.

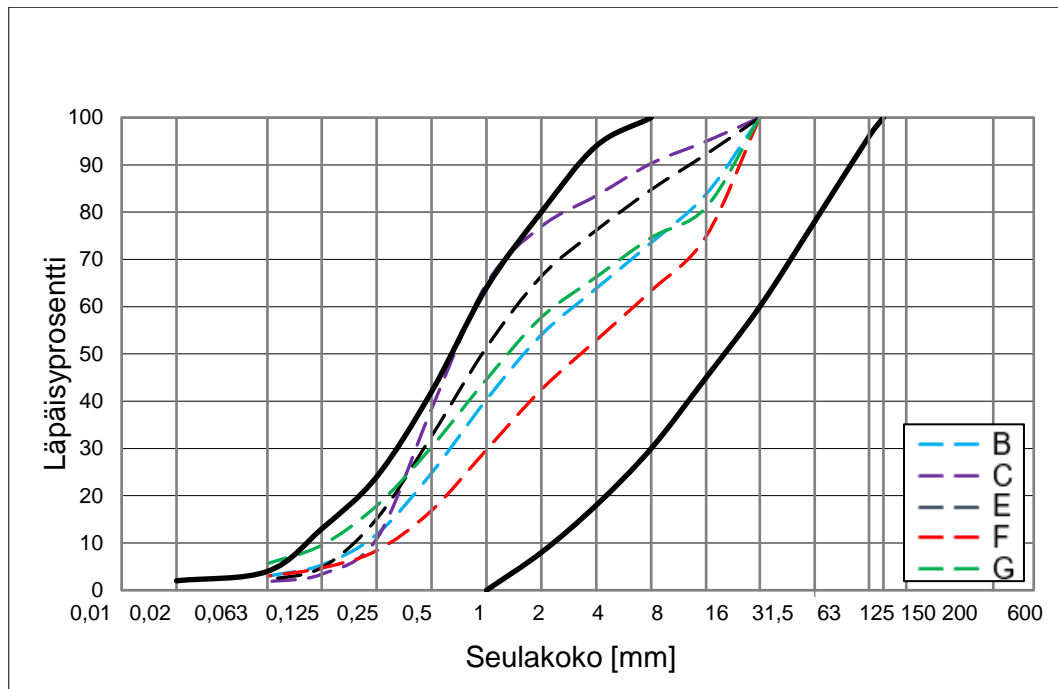
Taulukko 6.11: Rakennushallin koepenkeren mittaustulokset

| | E_2 [MPa] | E_2/E_1 | ρ_d [kg/m ³] | Tiiviyssaste [%] | w [%] |
|-------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|------------------|-------|
| 22.1.2021 | 142,2 | 3,01 | 2255,3 | 103,0 | 4,2 |
| 12.2.2021 | 205,9 | 2,67 | 2117,9 | 96,7 | 1,9 |
| 12.2.2021 kasteltu | 204,6 | 2,75 | 2162,2 | 98,7 | 4,1 |
| 19.2.2021 runsaasti kasteltu | 166,8 | 2,85 | 2127,6 | 97,2 | 3,9 |

Tuloksista nähdään, että rakenteen kantavuus parani ajan kuluessa ja se pysyi samana myös heti rakenteen kastelun jälkeen. Runsas kastelu useana päivänä johti kantavuuden alenemiseen. Kantavuus jäi kuitenkin ensimmäisiä mittauksia hieman korkeammaksi.

6.5 Kiertotiivistyskokeet laboratoriossa

Koepenkereiden B, C, E, F ja G materiaaleille tehtiin laboratoriossa kiertotiivistyskokeita. Kokeilla tutkittiin materiaalien tiivistymistä ja sitä, että voiko leikkausvastusta hyödyntää materiaalin kantavuuden arvioinnissa. Kokeissa 6000 g näyttemateriaalia tiivistettiin 150 mm halkaisijaltaan olevassa sylinterissä. Kiertokulma oli 40 mrad, aksiaalipaine 400 kPa ja kierroslukumäärä 80. Koepenkereistä otetut näytteet säilytettiin suljetuissa astioissa ja näytteitä ei kuivattu ennen laboratoriokokeita, joten näytteiden vesipitoisuudet olivat koepenkereitä vastaavat. Kokeita varten näytteistä poistettiin yli 31,5 mm rakeet. Katkaistujen näytteiden rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 6.23.



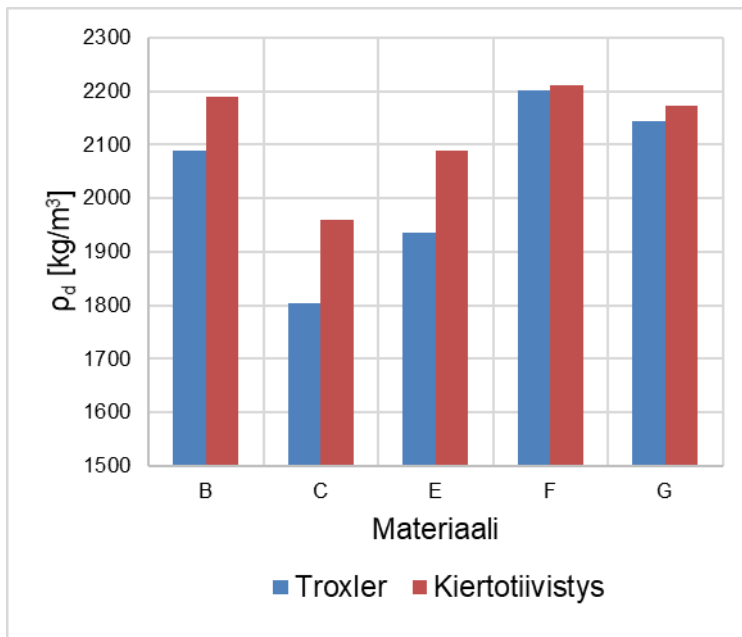
Kuva 6.23: Kiertotiivistyskokeen näytteiden rakeisuuskäyrät

Taulukossa 6.12 on esitetty koemateriaalien vesipitoisuudet, saavutetut kuivairto-
tiheydet ja leikkausvastuksen huippuarvot.

Taulukko 6.12: Kiertotiivistyskokeiden tulokset

| Materiaali | w [%] | ρ_d [kg/m ³] | Leikkausvastus max [kN/m ²] |
|------------|--------|-------------------------------|---|
| B | 4,69 % | 2189 | 312 |
| C | 4,86 % | 1959 | 256 |
| E | 7,64 % | 2090 | 272 |
| F | 4,61 % | 2210 | 287 |
| G | 6,59 % | 2174 | 298 |

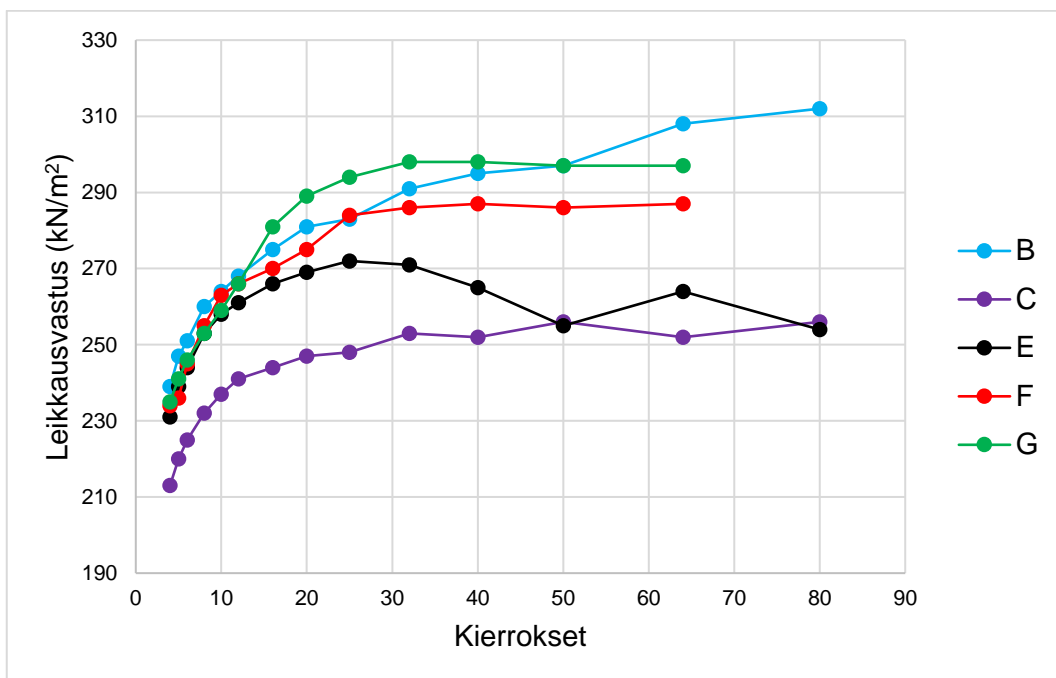
Kokeissa saavutetut kuivairtoteiheydet sekä vastaavien materiaalien Troxler-laitteella koepenkereistä mitatut kuivairtoteiheydet on esitetty kuvassa 6.24.



Kuva 6.24: Koepenkereistä ja kiertotiivistyskokeista saatujen kuivairtoteiheyksien vertailu

Kiertotiivistyskokeissa saavutettiin keskimäärin 4,6% korkeammat kuivairtoteiheydet. Tiiviimmillä materiaaleilla saavutettujen kuivairtoteiheyksien ero oli pienempi kuin löyhimmillä materiaaleilla.

Leikkausvastuksen kehittyminen kierrosten suhteen kullakin näytteellä on esitetty kuvassa 6.25.



Kuva 6.25: Leikkausvastuksen kehittyminen kiertotiivistyskokeen aikana

Materiaaleista E saavutti leikkausvastuksen huippuarvon noin 25 kierroksen kohdalla, jonka jälkeen se alkaa laskea. Mahdollinen syy vastuksen alenemiselle on materiaalin hienoneminen. Materiaalit G, F ja C saavuttavat leikkausvastuksen huippuarvon noin 30–40 kierroksen kohdalla, jonka jälkeen se pysyy lähes samana. Materiaalilla B leikkausvastus on huipussaan kokeen lopussa ja olisi mahdollisesti voinut saavuttaa huippuarvonsa yli 80 kierroksella. Materiaaleilla F ja G koelaitteisto ei tulostanut leikkausvastusta 80 kierroksen kohdalla.

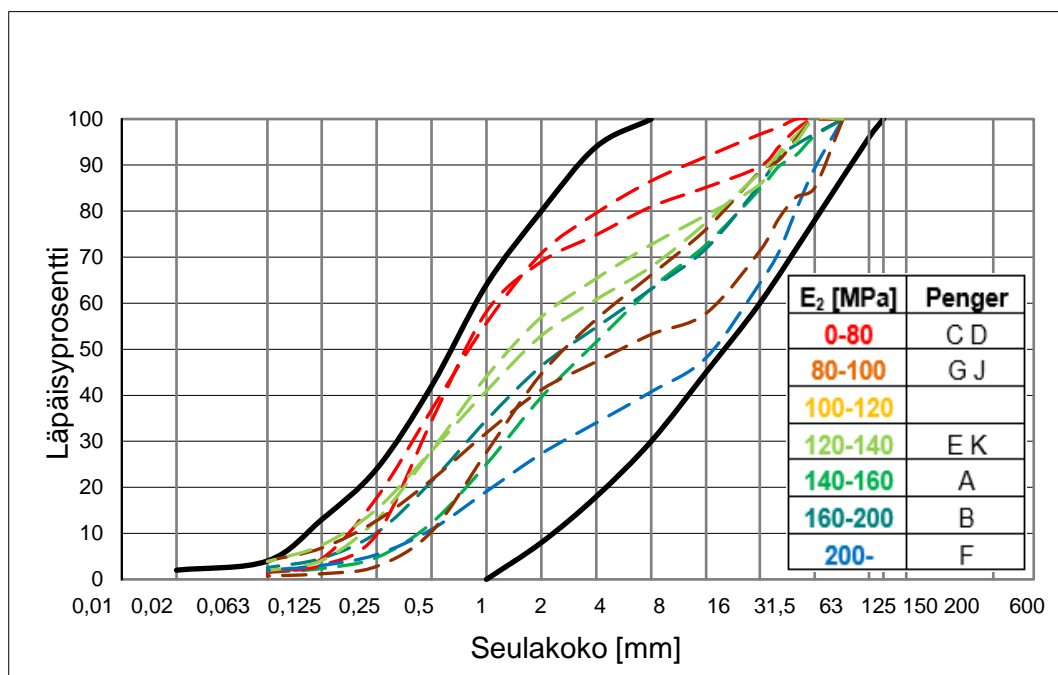
Materiaali C:llä sekä koepenkereen kantavuus että kiertotiivistyskokeen leikkausvastus olivat heikoimpia tutkituista materiaaleista. Vastaavasti taas materiaali F:llä koepenkereen kantavuus oli selvästi korkein, mutta leikkausvastus oli heikempi kuin materiaaleilla G ja E. Koekappaleiden leikkausvastukset ja vastaavien koepenkereiden kantavuudet eivät vastaa toisiaan, joten kiertotiivistyskokeita ei tehty tässä tutkimuksessa lisää. Mahdollisena syynä tuloksien erolle on, että koenäytteistä poistetaan kaikki yli 31,5 mm rakeet, jotka ovat materiaalin käyttäytymisen kannalta hyvin olennaisessa roolissa.

7 Tulosten analysointi

7.1 Kantavuuteen vaikuttavat tekijät yleisesti

Koepenkereistä saatujen mittaustulosten perusteella kantavuuteen keskeisesti vaikuttavia tekijöitä ovat rakenteen tiiviys, materiaalin rakeisuus ja rakeisuuskäyrän muoto. Muita kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kosteustila, raemuoto, rakeiden pinnankarkeus ja hienoainespitoisuus. Kantavuuteen vaikuttaa myös pohjamaa sekä penkereen paksuus ja leveys. Pohjamaa oli samanlainen kaikilla koepenkereillä. Pengerpaksuuden vaikutusta arvioitiin rakentamalla penkereet A ja B kahdessa kerroksessa. Levykuormituskokeiden tulokset olivat kummassakin kerroksessa vastaavat, joten noin 500 mm kerroksen todettiin olevan riittävä luotettavien mittaustulosten saamiseksi. Pengerleveyden vaikutusta pyrittiin hallitsemaan rakentamalla kaikki penkereet vähintään kahden valssijyrän levyisiksi ja tekemällä mittaukset penkereen keskilinjalta.

Rakeisuuden vaikutusta kantavuuteen on havainnollistettu kuvassa 7.1, jossa rakeisuuskäyrän värillä ilmaistaan kyseisestä koepenkereestä levykuormituskokeella saatua E_2 -arvoa.

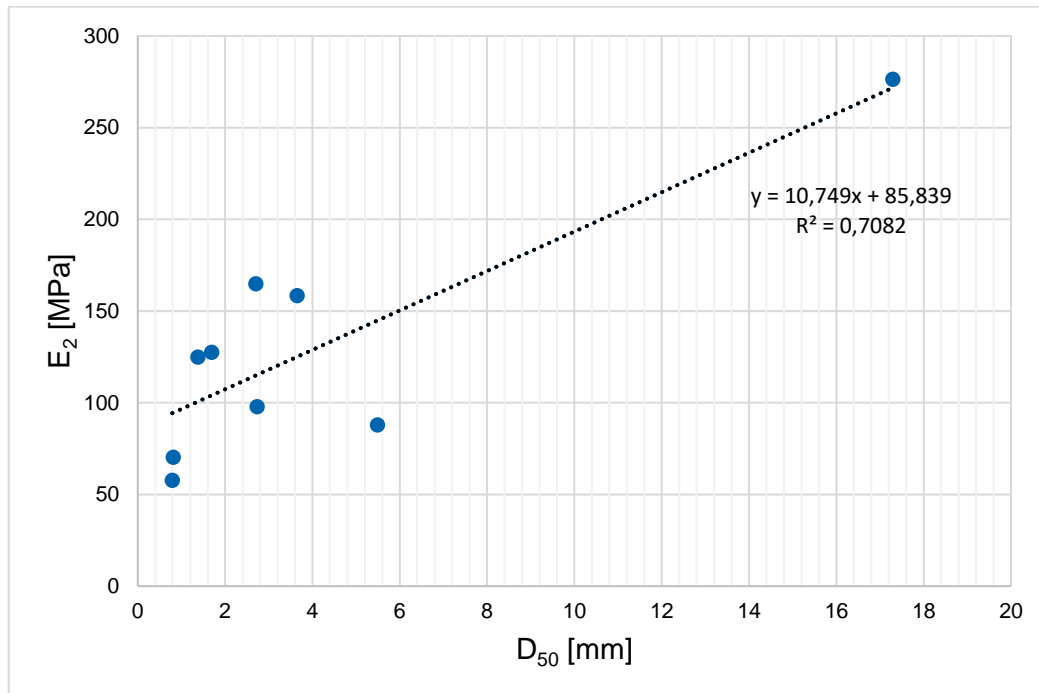


Kuva 7.1: Koepenkereiden kantavuudet rakeisuuskäyrien mukaan

Ohjealueen vasemmassa reunassa olevat, paljon hiekkalajitteita sisältävät materiaalit ovat selvästi kantavuudeltaan heikoimpia. Materiaalien käyttäytyminen määrytyy suurilta osin hiekkalajitteiden mukaan, koska karkeiden rakeiden osuus materiaaleista on pieni. Seinäjoki–Ruha-ratahankkeen Hipin koepenkereiden eristyskerroksen eri materiaalit ovat myös rakeisuudeltaan lähellä ohjealueen vasenta reunaa ja niistä saadut kantavuusarvot olivat välillä 72–98 MPa. Myös Kaitjärven liikennepaikan välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyrästä useat ovat ohjealueen vasemmassa reunassa ja niistä saadut kantavuusarvot olivat välillä 42–92 MPa. Tu-

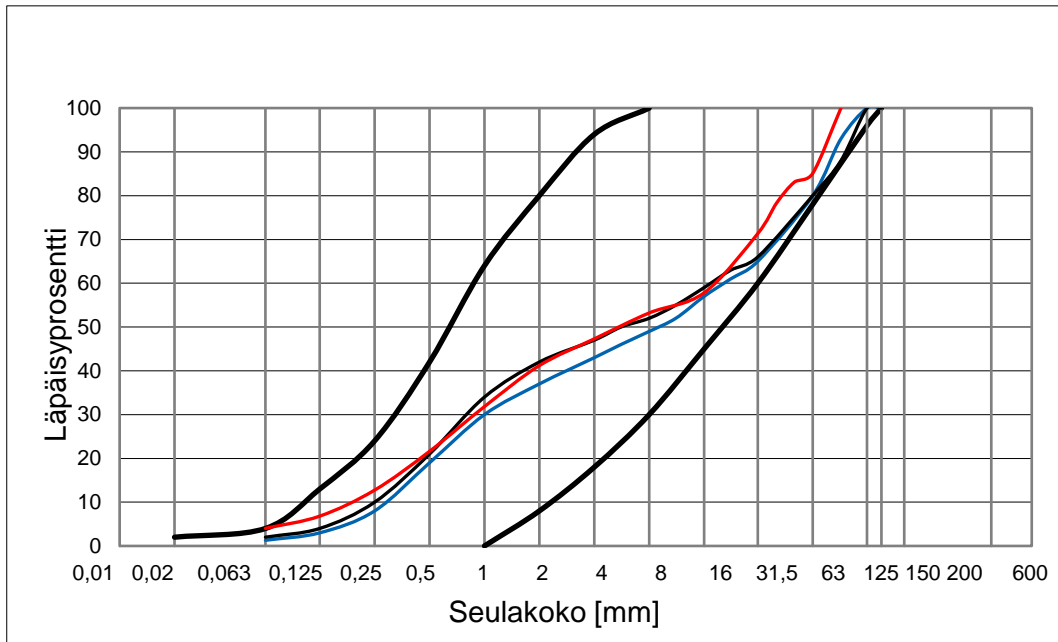
lostien perusteella voidaan päätellä, että ohjealueen vasemman reunan materiaaleilla ei ole mahdollista päästä eristys- ja välikerroksille asetettuihin kantavuusvaatimuksiin.

Yleisesti ottaen kantavuusarvot ovat sitä parempia, mitä lähempänä ohjealueen oikeaa reunaa rakeisuuskäyrä sijaitsee. Koepenkereen F materiaalissa oli runsaasti karkeita rakeita ja sillä saavutettiin vaatimukset reilusti ylittävä kantavuus. Ohjealueen keskellä sijaitsevilla rakeisuuskäyrillä päästiin ääripäiden välissä oleviin kantavuusarvoihin. Keskiraekoon vaikutus kantavuuteen koepenkereillä on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2: Keskiraekoon vaikutus kantavuuteen

Kuvasta nähdään, että keskiraekooilla voi olla vaikutusta kantavuuteen, mutta monessa tapauksessa se ei riitä selittämään kantavuuksien välisiä eroja. Penkereen G materiaalin rakeisuuskäyrä sijaitsee lähellä alueen oikeaa reunaa, mutta sillä saavutettiin heikko kantavuus. Heikon kantavuuden todennäköisimpänä syynä on rakeisuuskäyrän muoto. Materiaalissa noin 4–16 mm lajitteiden osuus on suhteellisen pieni, mikä johtaa jo aiemmin ongelmaksi havaittuun ”hiekkapattiin”. Penkereen G rakeisuuskäyrä muistuttaa muodoltaan Rauhan asema 1:n koepenkereiden materiaaleja. Kuvassa 7.3 on esitetty penkereen G rakeisuuskäyrä punaisella ja Rauhan asema 1:n koepenkereiden materiaalien materiaalitoimittajan määrittämät rakeisuuskäyrät sinisellä.



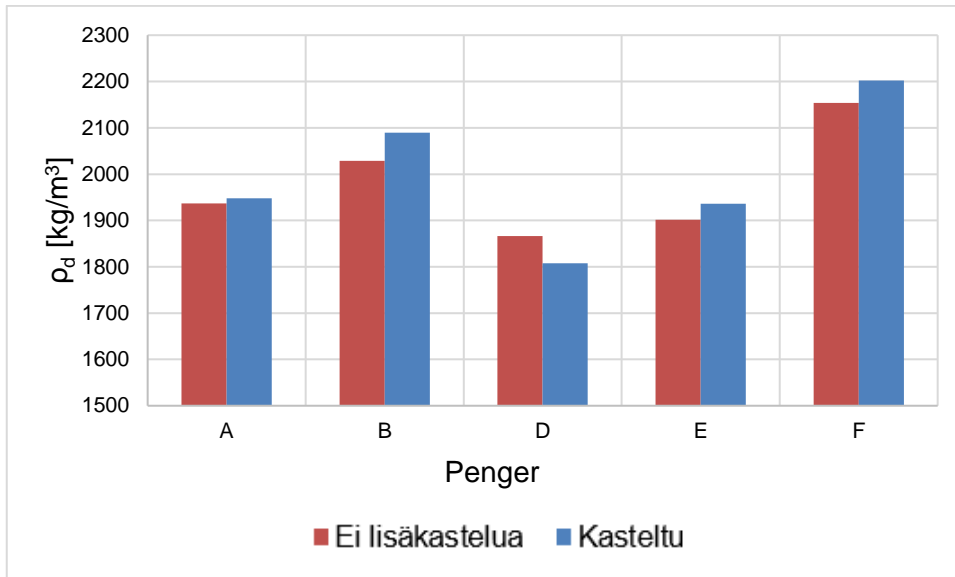
Kuva 7.3: Penkerein G ja Rauhan asema 1:n koepenkereiden rakeisuuskäyrien vertailu

Penkereellä G saavuttiin kantavuus $E_2 = 87,9$ MPa ja tiiviyssuhde 6,4. Rauhan aseman koepenkereellä päästiin kantavuuteen $E_2 = 92,45$ MPa ja tiiviyssuhteeseen 5,34. Rakeisuuskäyrien muodot ja kantavuusarvot vastaavat hyvin toisiaan.

Penkereellä J kantavuus jäi myös huonoksi. Tämän penkerein materiaalissa 0,5–2 mm lajitteiden osuus on merkittävä ja hienoainespitoisuus pienin kaikista koepenkereiden materiaaleista.

Koepenkereiden materiaalien hienoainespitoisuudet ovat välillä 0,7–4,0%. Hienoainespitoisuudella ei havaittu olevan vaikutusta tämän tutkimuksen koepenkereistä mitattuihin kantavuuksiin. Näitä selvästi suuremmilla pitoisuuksilla hienoaines voi kuitenkin olla merkittävämpi kantavuuteen vaikuttava tekijä.

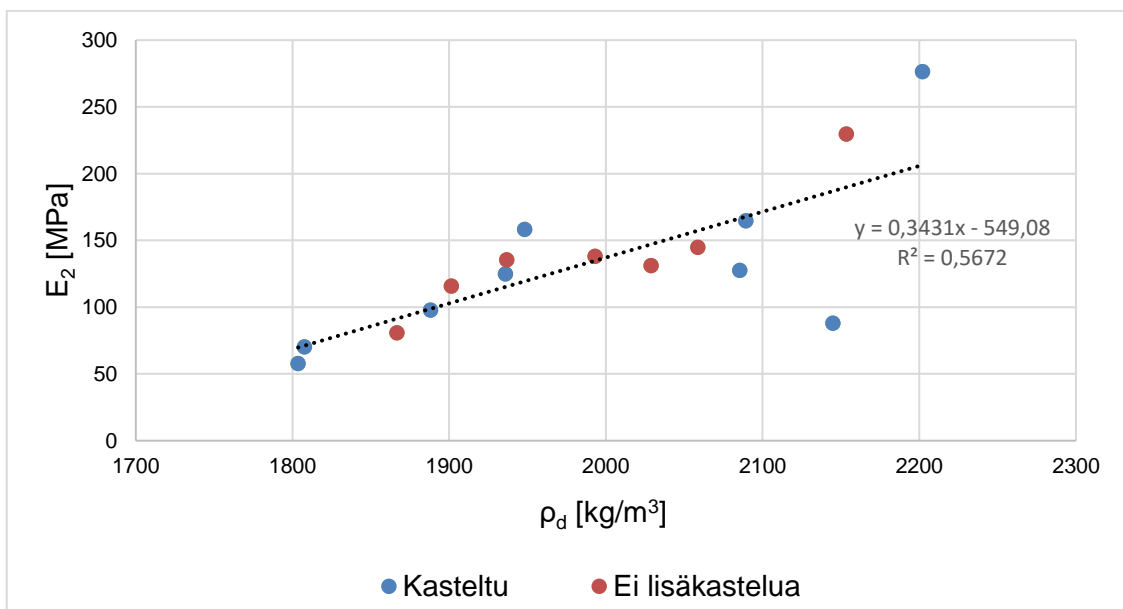
Vesipitoisuudella havaittiin olevan merkittävä vaikutus siihen, mihin kuivairtitiheyteen penger on mahdollista tiivistää. Penkereet A, B, D, E ja F tiivistettiin aluksi ilman kastelua, jonka jälkeen niille tehtiin levykuormituskokeet ja Troxler-mittaukset. Tämän jälkeen penkereet kasteltiin ja tiivistettiin uudelleen. Kuvassa 7.4 on esitetty tiivistettyjen penkereiden kuivairtitiheydet ennen kastelua ja sen jälkeen.



Kuva 7.4: Koepenkereiden kuivairtoteiheydet ilman kastelua ja kastelun avulla tiivistettyinä

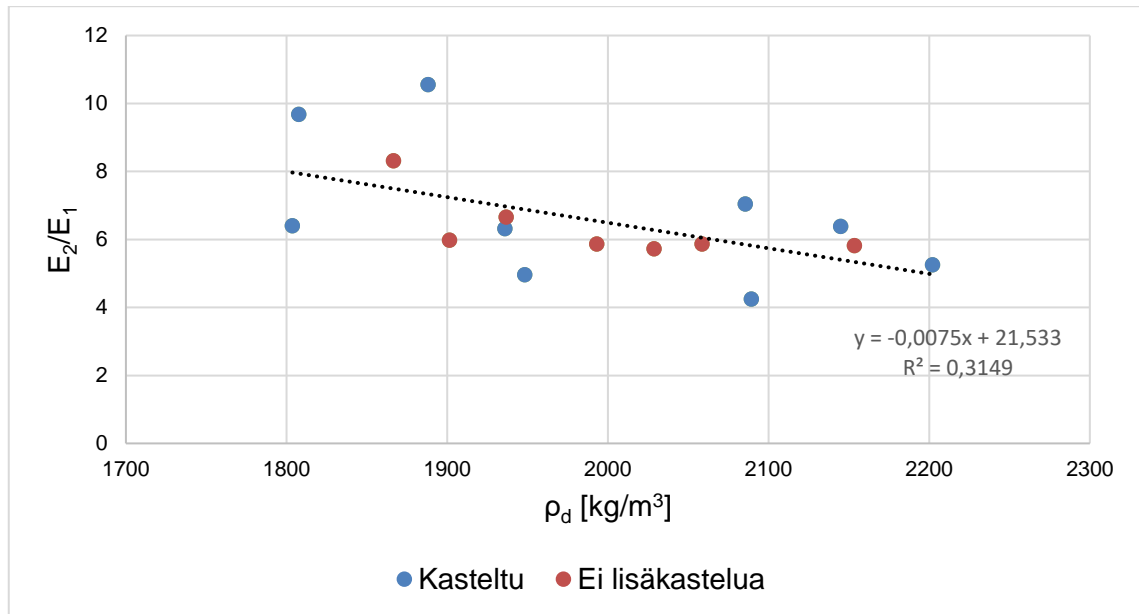
Penkereillä A, B, E ja F saavutettiin 0,6–3,0% korkeampi kuivairtoteiheys kastelun jälkeen. Penkereellä D kuivairtoteiheys oli kastelun jälkeen 3,2% matalampi.

Yksi merkittävimmistä kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä oli se, mihin kuivairtoteiheyteen penger pystyttiin tiivistämään. Kuvassa 7.5 on esitetty E_2 :n suhde kuivairtoteiheyteen.



Kuva 7.5: Kuivairtoteiheyden vaikutus kantavuuteen

Kuvassa 7.5 on punaisella merkittynä ilman kastelua ja sinisellä kastelua käyttämällä tiivistettyjen koepenkereiden mittaustulokset. Kuvasta nähdään, että mitä suurempaan kuivairtitiheyden arvon päästään, sitä parempi kantavuus yleensä saavutetaan. Kuivairtitiheyden avulla voidaan tehdä suuntaa antavia arvioita kantavuudesta esimerkiksi Troxler-mittausten perusteella. Kuivairtitiheys ei kuitenkaan ole ainoa vaikuttava tekijä, koska esimerkiksi penkereellä G saavutettiin korkea kuivairtitiheys (2144,8 kg/m³), mutta matala kantavuus (87,9 MPa). Kuvassa 7.6 on esitetty kuivairtitiheyden yhteys tiiviyssuhteeseen.

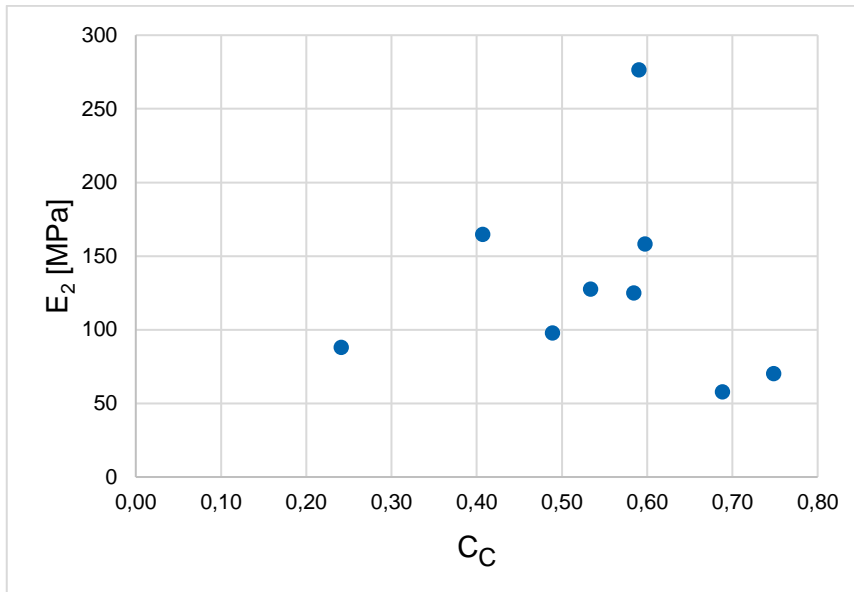


Kuva 7.6: Kuivairtitiheyden vaikutus tiiviyssuhteeseen

Kuvasta nähdään, että tiiviyssuhde on osittain yhteydessä kuivairtitiheyteen. Korkeilla kuivairtitiheyksillä tiiviyssuhde on keskimäärin matalampi kuin matalan kuivairtitiheyden rakenteilla.

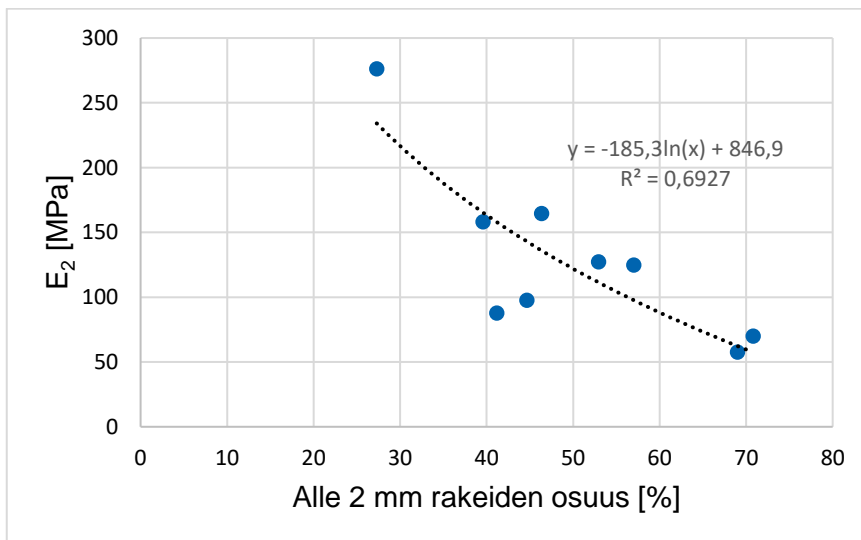
7.2 Rakeisuusparametrien vaikutus

Koepenkereiden mittaustulosten perusteella voidaan tutkia erilaisten rakeisuuskäyristä määritettävien parametrien yhteyttä kantavuuteen ja tiiviyteen. Rakeisuuskäyrän muotoa kuvaavaa parametria C_c , joka on esitelty työssä aiemmin kappaleessa 2.3 Luonnonmateriaalien rakeisuus ja raemuoto, ei koetulosten perusteella voi käyttää ennustamaan kantavuutta. Tutkittavat rakeisuuskäyrät ovat melko suoria välillä d_{10} – d_{60} . Mahdollisesti selvästi enemmän koverilla tai kuperilla rakeisuuskäyrillä C_c :n ja kantavuuden välillä voisi olla yhteys. Koepenkereiden kantavuudet C_c :n suhteen esitetty kuvassa 7.7.



Kuva 7.7: Koepenkereiden kantavuuden ja rakeisuuskäyrän muotoparametrien välinen yhteys

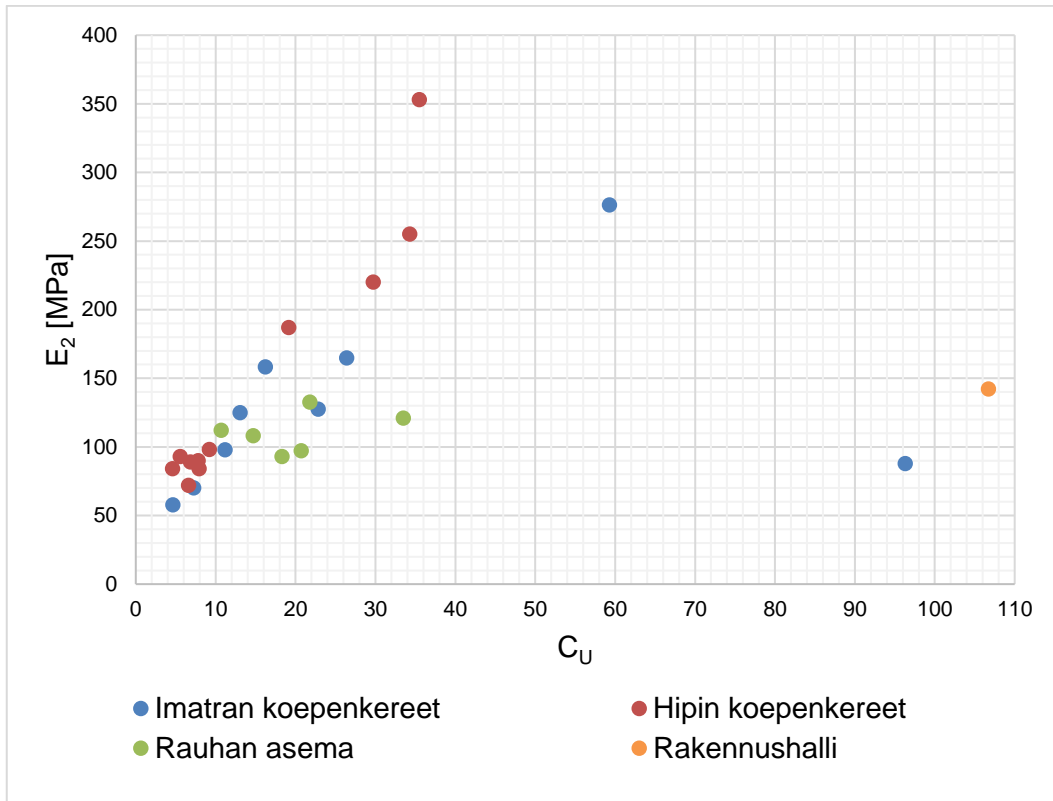
Koetuloksista tehtiin havainto, että 2 mm raekokoa vastaava läpäisyprosentti on yhteydessä rakenteen kantavuuteen kuvassa 7.8 esitetyllä tavalla.



Kuva 7.8: Kantavuuden riippuvuus alle 2 mm rakeiden osuudesta koepenkereillä

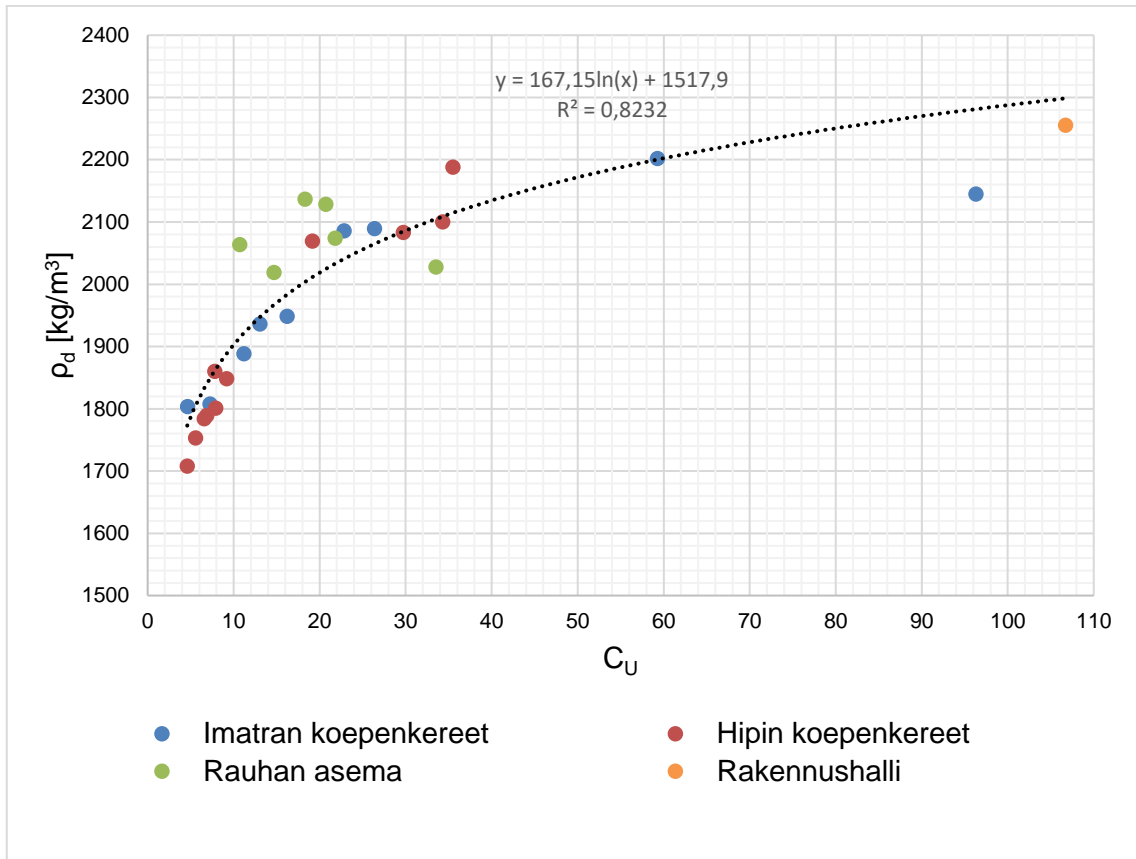
Tämä havainto on linjassa sen kanssa, että Yidetin et al. (2013a) esittämässä las-kentamenetelmässä 2 mm on primäärirakenteen alaraja. Sovitekäyrän alapuolelle jääneet pisteet ovat koepenkereiden G ja J mittaustulokset. Nämä materiaalit todettiin myös aiemmin esitettyjen tulosten perusteella ongelmallisiksi.

Raekokosuhte C_U vaikuttaisi olevan jossain määrin yhteydessä kantavuuteen. Kuvassa 7.9 on esitetty tämä yhteys tämän tutkimuksen, Rauhan asema 3:n ja Seinäjoki–Ruha-hankkeen Hipin koepenkereiden ja rakennushallin koerakenteen tutkimustuloksissa.



Kuva 7.9: Koepenkereiden kantavuuden ja raekokosuhteen välinen yhteys

Riittävän pienillä C_U :n arvoilla vaikuttaisi tulosten perusteella siltä, että kantavuus kasvaa C_U :n kasvaessa. Koemateriaaleista vain yksi Imatran koepenkereen materiaali ja rakennushallin materiaali olivat erittäin sekarakeisia, joten tulosten perusteella ei voi päätellä, kuinka kantavuus riippuu raekokosuhteesta silloin, kun raekokosuhte on suuri. Tämän tutkimuksen, Rauhan asema 3:n, Seinäjoki–Ruuhankkeen Hipin koepenkereiden ja rakennushallin koerakenteen mittaustulosten perusteella nähdään, että raekokosuhte vaikuttaa etenkin alle 40:n arvoilla selvästi kuivairtitiheyteen. Kuvassa 7.10 on esitetty raekokosuhteen ja kuivairtitiheyden yhteys.



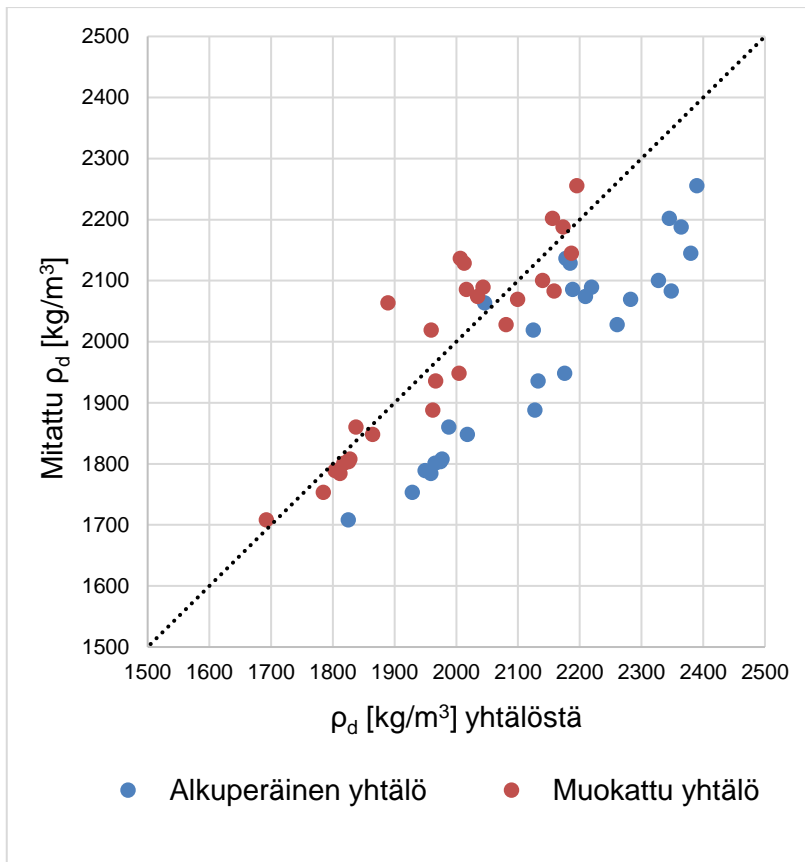
Kuva 7.10: Kuivairtotiheyden riippuvuus raekokosuhteesta

Kuvassa 7.9 esitetty riippuvuus vastaa melko hyvin kuvassa 2.11 esitettyä Proctor-kokeella määritetyn maksimikuivairtotiheyden ja raekokosuhteen välistä riippuvuutta. Havainto on linjassa Zou et al. (2011) esittämän pakkautumisteorian mukaisen periaatteen kanssa, missä karkearakeisilla materiaaleilla raekokojakauman laajentuessa huokoisuus pienenee. Ilmiötä, jossa huokoisuus alkaa jälleen kasvaa hyvin sekarakeisilla materiaaleilla, ei voida koetuloksista havaita. Koemateriaaleja, joiden raekokosuhte on yli 40 on vain vähän, joten hyvin sekarakeisten materiaalien käyttäytymisestä on hankala tehdä varmoja johtopäätöksiä. Havaittu yhteys on vastaava kuin Proctor-kokeella määritettävän maksimikuivatilavuuspainon yhtälö (kaava 6), jossa muuttujina ovat raekokosuhte ja läpäisyprosenttia d_{80} vastaava raekoko. Proctor-kokeella määrittävät kuivairtotiheydet ovat kuitenkin järjestelmällisesti hieman kenttäolosuhteissa mitattavia tiivyyksiä suurempia.

Yhtälöä (kaava 6) muokataan siten, että sitä voidaan hyödyntää eristys- ja välikerroksen luonnonmateriaalin kuivairtotiheyden arviointiin rakeisuuskäyrän perusteella. Yhtälön luonnollisten logaritmien kertoimien painoarvo pidetään samana kuin alkuperäisessä yhtälössä kertomalla kumpikin kertoimella 0,89. Tällä kertoimella mittaustulokset saadaan parhaimmin vastaamaan yhtälöllä laskettuja arvoja. Lisäksi vakiota 1694 kg/m^3 lasketaan arvoon 1575 kg/m^3 , jolloin saadaan kaava 26.

$$\rho_d = 1575 + 63,546 \ln d_{80} + 81,2036 \ln C_U \quad (26)$$

Alkuperäinen yhtälö on esitetty maksimikuivairtoteiheytenä, mutta muokatussa kaavassa suurena on kuivairtoteiheyys. Kuvassa 7.11 on esitetty alkuperäisellä ja muokatulla yhtälöllä lasketut kuivairtoteiheyden arvot verrattuna mitattuihin arvoihin.



Kuva 7.11: Kuivairtoteiheyys alkuperäisen ja muokatun yhtälön perusteella

Korjatulla yhtälöllä lasketut arvot vastaavat enimmäkseen hyvin rakenteesta mitattuja arvoja. Yhtälöä käytetään kuivairtoteiheyden ennustamiseen Yidetin et al. (2013a) esittämän laskentamenetelmän soveltamisessa kantavuuden ennustamiseen.

7.3 Yidetin esittämän laskentamenetelmän soveltaminen

Yidetin et al (2014) väitöskirjassa ja siihen liittyvissä artikkeleissa (2013a, 2013b, 2013c) esiteltiin laskentamenetelmä, jolla rakeisuuskäyrästä pääteltiin erilaisia parametreja, jotka korreloivat kokeellisesti mitattujen suureiden kanssa. Tutkittuja suureita olivat resilient-moduuli, CBR ja pysyvät muodonmuutokset. Tässä työssä tutkitaan, onko rakeisuuskäyrästä määritettävien parametrien ja levykuormituskoella määritettävän E_2 -arvon välillä riippuvuussuhdetta.

Laskentamenetelmä perustuu lajitteiden osuuksiin kokonaistilavuudesta. Koepenkereistä on tiedossa Troxler-mittauksilla määritetyt kuivairtoteiheydet, joiden lisäksi kiviaineksen tilavuusosuuden määrittämiseen tarvitaan kiviaineksen kiintoteiheyys. Penkereistä A–F ja rakennushallin koerakenteesta määritettiin Troxler-mittauksilla

huokoisuus, jonka perusteella voidaan laskea materiaalin kiintotiheys. Huokoisuuden määrittäminen Troxler-mittauksen perusteella ei ole tarkka menetelmä, mutta se antaa suuntaa antavia tuloksia. Kiintotiheydet eri penkereiden materiaaleilla vaihtelevat välillä 2630–2676 kg/m³. Kiintotiheys on suurin hienorakeisimmalla materiaalilla D ja alhaisin karkeimmalla materiaalilla F. Kiintotiheyksien keskiarvo on 2660 kg/m³, jota käytetään muiden penkereiden materiaalien kiintotiheytenä sekä myöhemmin kiintotiheyden vakioarvona laskentamenetelmän soveltamisessa. Jos kiviaineksen kiintotiheys on selvästi tästä vakioarvosta poikkeava, tulee laskelmissa käyttää tätä poikkeavaa arvoa. Kiintotiheyden ja kuivairtitiheyden avulla koepenkereille voidaan määrittää kiviaineksen tilavuusosuus V_{agg} prosentteina ja huokoisuus, jonka tunnuksena Yidetin et al. (2013a) menetelmässä on V_{voids} . Huokokset ovat joko ilmalla tai vedellä täyttyneitä.

Primäärirakenteen V_{PS} määrittämistä varten ensin tulee määrittää seulakokoja vastaavat ylä- ja alarajat huokosten läpimitan painotetulle keskiarvolle $d_{w,avg}$ kaavalla 19. Taulukossa 7.1 on esitetty standardiseulakokoja vastaavat rajat.

Taulukko 7.1: $d_{w,avg}$ ala- ja ylärajat standardiseuloille

| seula [mm] | $d_{w,avg}$ min [mm] | $d_{w,avg}$ max [mm] |
|------------|----------------------|----------------------|
| 125 | - | - |
| 63 | 51,14 | 63,46 |
| 31,5 | 25,58 | 31,79 |
| 16 | 12,98 | 16,09 |
| 8 | 6,50 | 8,07 |
| 4 | 3,25 | 4,04 |
| 2 | 1,62 | 2,02 |

Kaavalla 17 määritetään kahden peräkkäisen seulakoon lajitteiden tilavuusosuuksilla painotettu keskiarvo $D_{w,avg}$. Sen perusteella kaavalla 18 määritettyä huokosten läpimitan painotettua keskiarvoa $d_{w,avg}$ verrataan ylä- ja alarajoihin 2 mm seulakoon asti. Disruptiivisiin materiaaleihin (DM) kuuluvat sekundäärirakenteen lajitteet, joiden raekoko on enemmän kuin 0,225 kertaa primäärirakenteen pienin raekoko. Taulukossa 7.2 on esitetty penkereen A rakeisuuskäyrälle tehtyjen laskelmien tulokset.

Taulukko 7.2: Primäärirakenteen ja DM:n määrittäminen penkereen A materiaalille

| Seula [mm] | Seulalle jäänyt [%] | $D_{w,avg}$ [mm] | $d_{w,avg}$ [mm] | $d_{w,avg}$ min [mm] | $d_{w,avg}$ max [mm] |
|------------|---------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| 125 | 0 | | | | |
| | | 63,00 | 46,12 | 51,14 | 63,46 |
| 63 | 3,67 | | | | |
| | | 34,09 | 24,96 | 25,58 | 31,79 |
| 31,5 | 11,54 | | | | |
| | | 19,24 | 14,08 | 12,98 | 16,09 |
| 16 | 12,07 | | | | |
| | | 10,01 | 7,33 | 6,50 | 8,07 |
| 8 | 9,51 | | | | |
| | | 4,73 | 3,46 | 3,25 | 4,04 |
| 4 | 11,62 | | | | |
| | | 2,41 | 1,77 | 1,62 | 2,02 |
| 2 | 12,00 | | | | |
| 1 | 14,53 | | | | |
| 0,5 | 12,80 | | | | |
| 0,25 | 7,49 | | | | |
| 0,125 | 2,39 | | | | |
| 0,063 | 0,85 | | | | |
| < 0,063 | 1,51 | | | | |

Taulukossa on vihreällä esitetty rajojen sisällä olevat $d_{w,avg}$ arvot ja punaisella rajojen ulkopuolelle jäävät arvot. Sinisellä pohjalla ovat ne raekoot, jotka kuuluvat primäärirakenteeseen ja oranssilla pohjalla on merkitty DM:n raekoot. Penkereen A materiaalista 3,67% on ylisuuria rakeita, 56,75% on primäärirakennetta ja 39,58% sekundäärirakennetta. Disruptiivisia materiaaleja ovat kaikki 0,5–2 mm lajitteet, joiden osuus on yhteensä 27,34%. Taulukossa 7.3 on esitetty kaikkien tämän tutkimuksen, Rauhan asema 3:n, Seinäjoki–Ruha-hankkeen Hipin koepenkereiden ja rakennushallin koerakenteen materiaalien kuivairtotiheydet ρ_d , kiintoitiheydet ρ_s , kiviaineksen määrät V_{agg} , huokoisuudet V_{voids} , primäärirakenteen ja DM:n raekokoalueet, primäärirakenteen osuudet koko tilavuudesta V_{PS} , sekundäärirakenteen osuudet V_{SS} , ylisuurten rakeiden osuudet $V_{>PS}$, ja DM:n osuudet V_{DM} .

Taulukko 7.3: Koepenkereille määritetyt parametrit

| Penger | ρ_d [kg/m ³] | ρ_s [kg/m ³] | V_{agg} (%) | V_{voids} (%) | PS (mm) | DM (mm) | V_{ps} (%) | V_{ss} (%) | $V_{>ps}$ (%) | V_{DM} (%) |
|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Tämän tutkimuksen koepenkeret | | | | | | | | | | |
| A | 1948 | 2668 | 73,0 | 27,0 | 63–2 | 2–0,5 | 41,4 | 28,9 | 2,7 | 20,0 |
| B | 2089 | 2663 | 78,5 | 21,5 | 63–2 | 2–0,5 | 39,6 | 36,4 | 2,5 | 19,7 |
| C | 1804 | 2668 | 67,6 | 32,4 | 63–2 | 2–0,5 | 20,9 | 46,7 | 0 | 23,4 |
| D | 1808 | 2678 | 67,5 | 32,5 | 63–2 | 2–0,5 | 19,7 | 47,8 | 0 | 22,9 |
| E | 1936 | 2654 | 72,9 | 27,1 | 63–2 | 2–0,5 | 31,4 | 41,6 | 0 | 21,2 |
| F | 2202 | 2630 | 83,7 | 16,3 | 63–2 | 2–0,5 | 51,9 | 22,9 | 8,9 | 13,8 |
| G | 2145 | 2660 | 80,6 | 19,4 | 90–16 | 16–4 | 34,0 | 46,6 | 0 | 8,5 |
| J | 1888 | 2660 | 71,0 | 29,0 | 63–2 | 2–0,5 | 39,3 | 31,7 | 0 | 24,3 |
| K | 2086 | 2660 | 78,4 | 21,6 | 63–2 | 2–0,5 | 36,9 | 41,5 | 0 | 19,6 |
| Rauhan asema 3 | | | | | | | | | | |
| EK 1 (6+2) | 2028 | 2660 | 76,2 | 23,8 | 90–2 | 2–0,5 | 39,6 | 36,6 | 0 | 21,0 |
| EK 1 (8) | 2019 | 2660 | 75,9 | 24,1 | 63–2 | 2–0,5 | 31,9 | 44,0 | 0 | 26,0 |
| EK 2 (6+2) | 2063 | 2660 | 77,6 | 22,4 | 63–2 | 2–0,5 | 26,4 | 51,2 | 0 | 27,0 |
| EK 2 (8) | 2074 | 2660 | 78,0 | 22,0 | 90–2 | 2–0,5 | 34,3 | 43,7 | 0 | 22,0 |
| EK 3 (6+2) | 2136 | 2660 | 80,3 | 19,7 | 31,5–2 | 2–0,5 | 35,3 | 37,7 | 7,2 | 26,0 |
| EK 3 (8) | 2128 | 2660 | 80,0 | 20,0 | 31,5–2 | 2–0,5 | 41,6 | 32,8 | 5,6 | 27,0 |
| Hipun koepenkeret, eristyskerros | | | | | | | | | | |
| KR 4 | 1860 | 2660 | 69,9 | 30,1 | 8–2 | 2–0,5 | 33,6 | 34,3 | 2,1 | 35,0 |
| KR 5 | 1784 | 2660 | 67,1 | 32,9 | 8–2 | 2–0,5 | 20,8 | 44,3 | 2,0 | 45,0 |
| KR 6 | 1848 | 2660 | 69,5 | 30,5 | 8–2 | 2–0,5 | 34,0 | 30,6 | 4,9 | 30,0 |
| KR 11 | 1801 | 2660 | 67,7 | 32,3 | 8–2 | 2–0,5 | 21,0 | 46,0 | 0,7 | 42,0 |
| KR 12 | 1789 | 2660 | 67,3 | 32,7 | 8–2 | 2–0,5 | 16,8 | 48,4 | 2,0 | 43,0 |
| KR 13 | 1753 | 2660 | 65,9 | 34,1 | 8–2 | 2–0,5 | 17,1 | 47,4 | 1,3 | 50,0 |
| KR 14 | 1708 | 2660 | 64,2 | 35,8 | 4–2 | 2–0,5 | 0,6 | 62,9 | 0,6 | 52,0 |
| Hipun koepenkeret, välikerros | | | | | | | | | | |
| KR 4 | 2100 | 2660 | 78,9 | 21,1 | 125–2 | 2–0,5 | 57,6 | 15,8 | 5,5 | 13,2 |
| KR 11 | 2188 | 2660 | 82,3 | 17,7 | 150–2 | 2–0,5 | 70,2 | 12,1 | 0 | 10,9 |
| KR 12 | 2083 | 2660 | 78,3 | 21,7 | 125–2 | 2–0,5 | 49,3 | 13,3 | 15,7 | 12,0 |
| KR 13 | 2069 | 2660 | 77,8 | 22,2 | 150–2 | 2–0,5 | 64,6 | 13,2 | 0 | 12,0 |
| Rakennushallin koerakenne | | | | | | | | | | |
| - | 2255 | 2647 | 85,2 | 14,8 | 150–2 | 16–4 | 41,0 | 44,2 | 0 | 8,5 |

Kaikilla tämän tutkimuksen koepenkereillä pengertä G lukuun ottamatta primääri-rakenne koostuu yli 2 mm lajitteista. Penkereillä A, B ja F yli 63 mm lajitteiden osuus on melko pieni, joten ne lasketaan ylisuuriksi rakeiksi. Penkereellä G 8–16 mm rakeiden osuus on vain 4,6 %, joten sen ja 16–32 mm rakeiden välillä ei ole

riittävää vuorovaikutusta. Tästä syystä primäärirakenteeseen kuuluvat vain yli 16 mm lajitteet.

Primäärirakenteen huokostilavuus V_{free}^{PS} lasketaan kertomalla huokostilavuus primäärirakenteen osuudella kiintoaineksesta. Vastaavalla tavalla lasketaan myös sekundäärirakenteen huokostilavuus V_{free}^{SS} . Disruptiopotentiali DP lasketaan primäärirakenteen huokostilavuuden ja disruptiivisten materiaalien osuuden V_{DM} avulla kaavan 20 mukaisesti. Esitettyjen parametrien perusteella voidaan laskea myös primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} , koordinaatioluku cn_{PS} ja raerungon huokoisuus e_s kaavojen 21, 22 ja 23 mukaisesti. Lasketut arvot on esitetty taulukossa 7.4.

Taulukko 7.4: Koepenkereiden rakeisuuksien perusteella määritetyt suureet

| Penger | V_{free}^{PS} [%] | V_{free}^{SS} [%] | DP | n_{PS} | cn_{PS} | e_s |
|--|---------------------|---------------------|--------|----------|-----------|-------|
| Tämän tutkimuksen koepenkereet | | | | | | |
| A | 15,3 % | 10,7 % | 1,30 | 57 % | 5,12 | 0,37 |
| B | 10,9 % | 10,0 % | 1,81 | 59 % | 4,93 | 0,27 |
| C | 10,0 % | 22,4 % | 2,33 | 79 % | 3,63 | 0,48 |
| D | 9,5 % | 23,0 % | 2,42 | 80 % | 3,57 | 0,48 |
| E | 11,6 % | 15,4 % | 1,82 | 69 % | 4,23 | 0,37 |
| F | 10,1 % | 4,4 % | 1,37 | 43 % | 6,97 | 0,19 |
| G | 8,2 % | 11,2 % | 1,04 | 66 % | 4,41 | 0,24 |
| J | 16,1 % | 13,0 % | 1,51 | 61 % | 4,82 | 0,41 |
| K | 10,2 % | 11,4 % | 1,93 | 63 % | 4,62 | 0,28 |
| Rauhan asema 3 | | | | | | |
| EK 1 (6+2) | 12,4 % | 11,4 % | 1,70 | 60 % | 4,85 | 0,31 |
| EK 1 (8) | 10,1 % | 14,0 % | 2,57 | 68 % | 4,26 | 0,32 |
| EK 2 (6+2) | 7,6 % | 14,8 % | 3,54 | 74 % | 3,92 | 0,29 |
| EK 2 (8) | 9,7 % | 12,3 % | 2,27 | 66 % | 4,43 | 0,28 |
| EK 3 (6+2) | 8,7 % | 9,3 % | 3,00 | 62 % | 4,72 | 0,25 |
| EK 3 (8) | 10,4 % | 8,2 % | 2,60 | 56 % | 5,26 | 0,25 |
| Hipin koepenkereet, eristyskerros | | | | | | |
| KR 4 | 14,4 % | 14,7 % | 2,42 | 66 % | 4,43 | 0,43 |
| KR 5 | 10,2 % | 21,7 % | 4,41 | 79 % | 3,65 | 0,49 |
| KR 6 | 15,0 % | 13,4 % | 2,01 | 64 % | 4,54 | 0,44 |
| KR 11 | 10,0 % | 22,0 % | 4,20 | 79 % | 3,64 | 0,48 |
| KR 12 | 8,2 % | 23,6 % | 5,25 | 83 % | 3,46 | 0,49 |
| KR 13 | 8,9 % | 24,6 % | 5,64 | 83 % | 3,47 | 0,52 |
| KR 14 | 0,4 % | 35,1 % | 145,29 | 99 % | 2,85 | 0,56 |

| Penger | V _{free} ^{PS} [%] | V _{free} ^{SS} [%] | DP | n _{PS} | cn _{PS} | e _s |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------|-----------------|------------------|----------------|
| Hipin koepenkerreet, välikerros | | | | | | |
| KR 4 | 15,4 % | 4,2 % | 0,86 | 39 % | 7,74 | 0,27 |
| KR 11 | 15,1 % | 2,6 % | 0,72 | 30 % | 10,30 | 0,22 |
| KR 12 | 13,7 % | 3,7 % | 0,88 | 42 % | 7,24 | 0,28 |
| KR 13 | 18,4 % | 3,8 % | 0,65 | 35 % | 8,57 | 0,29 |
| Rakennushallin koerakenne | | | | | | |
| - | 7,1 % | 7,7 % | 1,20 | 59 % | 4,97 | 0,17 |

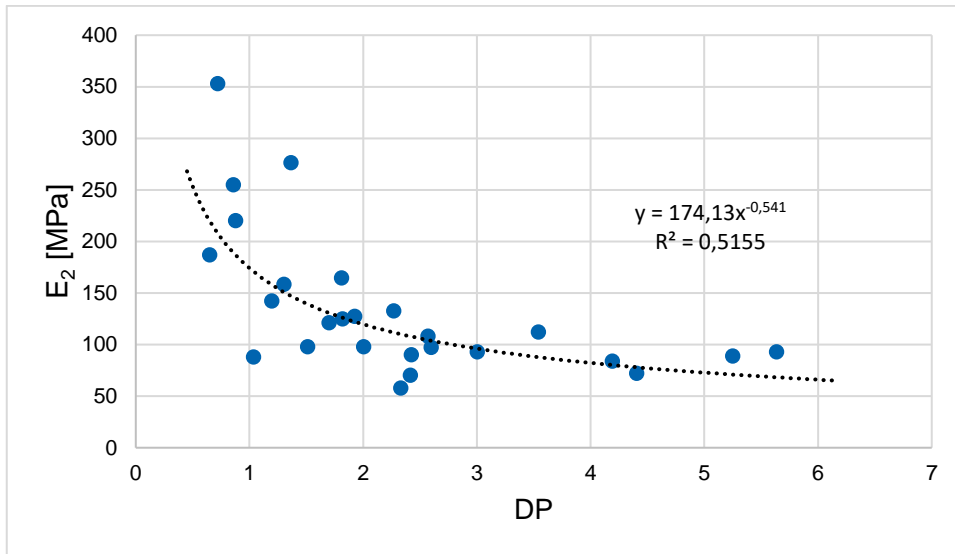
Hipin koepenkerreiden paksuudeltaan 0,3 m olevien välikerrosten kantavuuksiin vaikuttaa merkittävästi alapuolisen eristyskerroksen päältä saatava kantavuus. Välikerrosten levykuormituskokeiden tulosten hyödyntämistä varten niiden tarkempaa kantavuutta arvioidaan Odemarkin mitoitusten menetelmällä tehtävällä takaisinlaskennalla. Tarkoituksena menetelmällä on löytää kantavuudet, jotka voitaisiin saavuttaa pelkästään välikerrosmateriaalista rakennettavilla penkereillä. Taulukossa 7.5 on esitetty välikerrosten päältä mitattu kantavuus, alapuolisen eristyskerroksen päältä mitattu kantavuus sekä välikerroksen moduuliarvo, jolla rakenteesta saadaan mitattu kantavuus.

Taulukko 7.5: Odemarkin mitoitusten menetelmällä korjatut Hipin koerakenteiden välikerrosten kantavuudet

| Koerakenne | E ₂ mitattu [MPa] | E ₂ eristyskerros [MPa] | Välikerroksen E-moduuli [MPa] |
|------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| KR 4 | 171 | 98 | 255 |
| KR 11 | 187 | 84 | 353 |
| KR 12 | 151 | 89 | 220 |
| KR 13 | 141 | 93 | 187 |

Taulukossa esitettyjä korjattuja arvoja käytetään tulosten analysoinnissa Hipin koerakenteiden välikerrosten kantavuuksina.

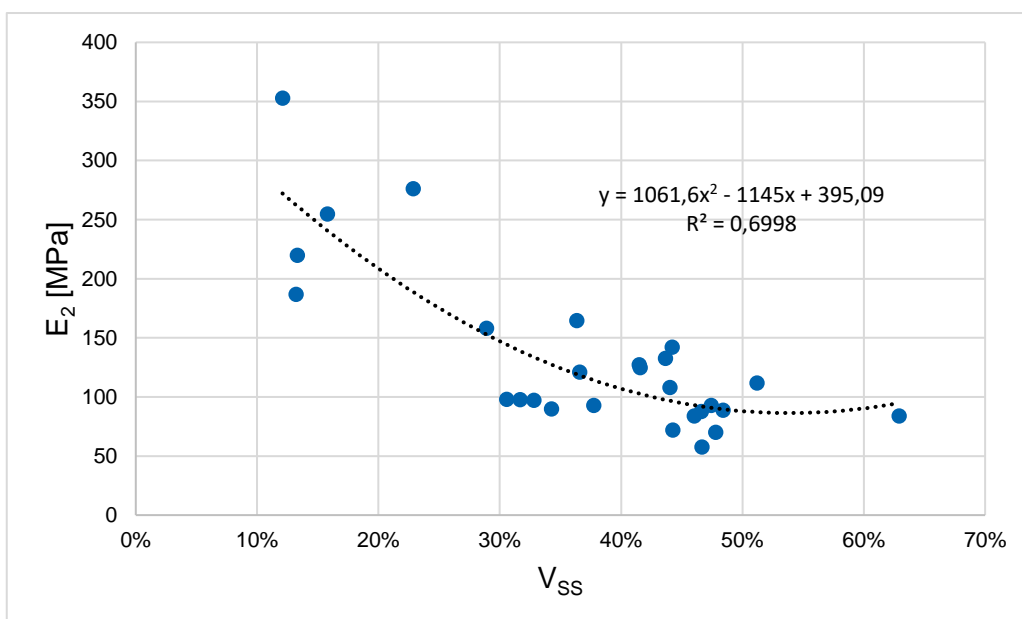
Yideti et al. (2013a) esitti, että disruptiopotentialin ja pysyvien muodonmuutosten välillä on yhteys. DP:n arvoilla 0,5–0,9 pysyvien muodonmuutosten pitäisi olla pienimmillään. Tätä suuremmilla tai pienemmilla arvoilla pysyvät muodonmuutokset noudattavat kasvavaa trendiä. Kuvassa 7.12 on esitetty levykuormituskokeista määritetyn E₂-arvon ja DP:n välinen yhteys.



Kuva 7.12: Kantavuuden riippuvuus disruptiopotentialista

Tuloksista on jätetty pois Hipin koerakenne 14:n eristyskerroksen DP, joka on 145,29, ja jonka kantavuudeksi on mitattu 84 MPa. Tutkimustuloksista on osittain havaittavissa Yidetin et al. (2013a) havaintoja vastaava yhteys. E_2 -arvo laskee DP:n kasvaessa noin arvosta 0,5 ylöspäin. Kantavuuden alenemista DP:n ollessa alle 0,5 ei tutkimustuloksista voida päätellä. Yidetin et al. (2013c) mukaan myös CBR-arvo kasvaa DP:n kasvaessa välillä 0,1–1,0, mutta vastaavaa yhteyttä ei voida tämän tutkimuksen tuloksista havaita DP:n ja E_2 -arvon välillä.

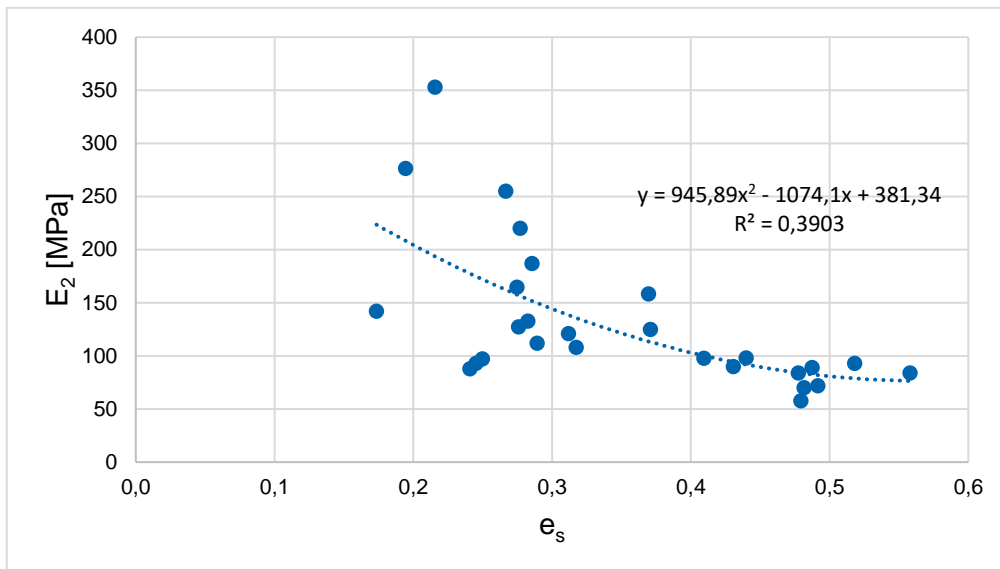
Yidetin et al. (2013a) artikkelissa esitettiin, että pysyvät muodonmuutokset ovat riippuvaisia sekundäärirakenteen määrästä. Sekundäärirakenteen osuuden vaikutus kantavuuteen on esitetty kuvassa 7.13.



Kuva 7.13: Sekundäärirakenteen osuuden vaikutus kantavuuteen

Optimimäärää suuremmilla tai pienemmillä määrillä sekundäärirakennetta pysyvät muodonmuutokset ovat suurempia (Yideti et al. 2013a). Koeaineistossa ei ole mukana matalan, alle 12 % V_{SS} :n materiaaleja. Kantavuuden laskemista matalilla V_{SS} :n arvoilla ei siksi voida havaita.

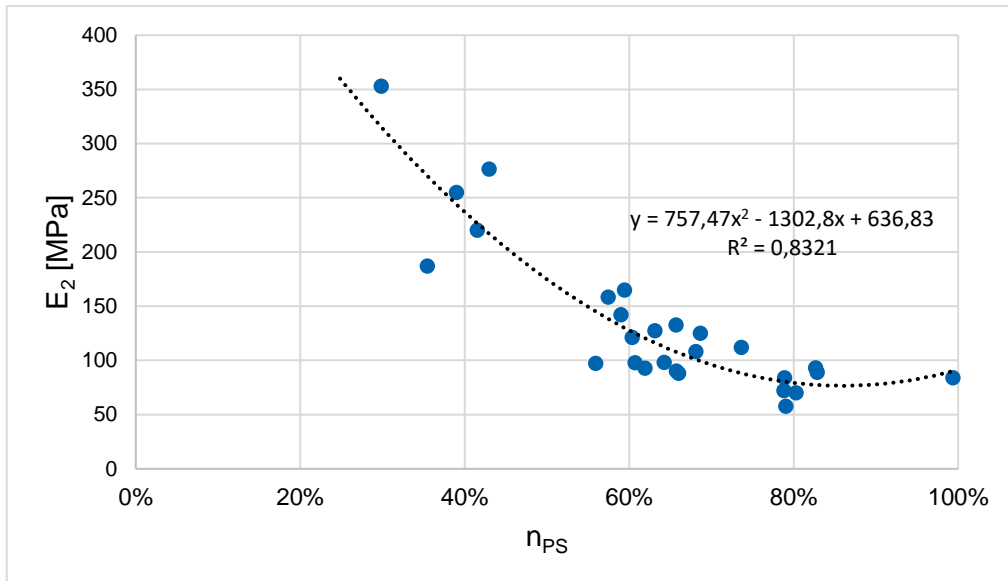
Raerungon huokoisuus e_s on Yidetin et al. (2013c) mukaan CBR-arvoon vaikuttava tekijä. Kuvassa 7.14 on esitetty koepenkereiden E_2 -arvojen riippuvuus raerungon huokoisuudesta.



Kuva 7.14: Raerungon huokoisuuden vaikutus kantavuuteen

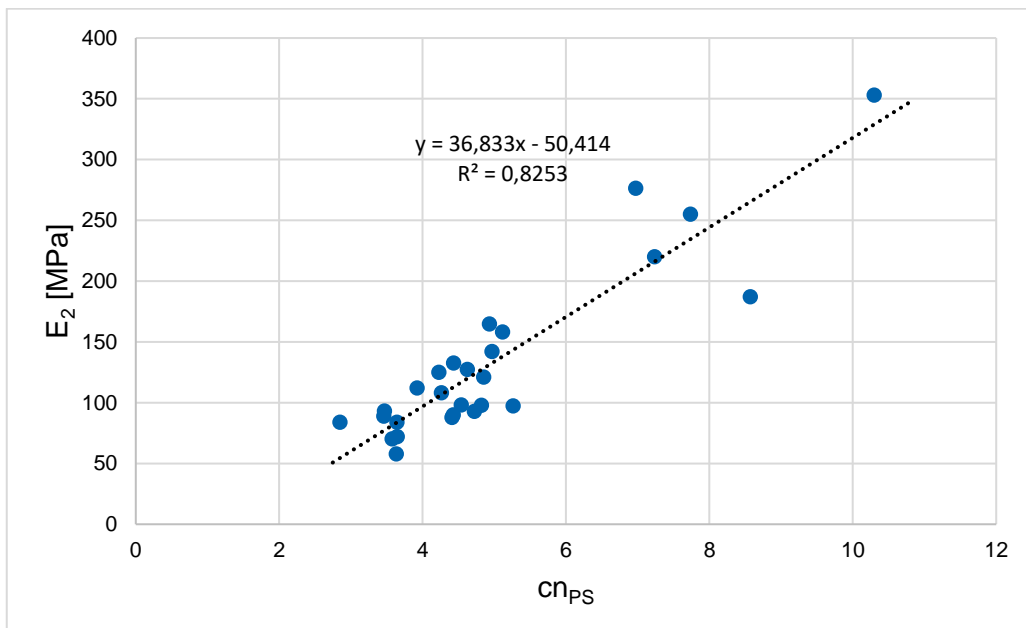
Kuvasta nähdään, että raerungon huokoisuuden kasvaminen heikentää kantavuutta. Yhteys ei kuitenkaan ole yhtä johdonmukainen kuin Yidetin et al. (2013c) esittämä e_s :n korrelaatio CBR-arvon kanssa.

Primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} on Yidetin et al. (2013b) mukaan resilient-moduulin kanssa korreloiva tekijä. Resilient-moduuli laskee lineaarisesti n_{PS} :n kasvaessa noin 30:sta 70 %:iin. Koepenkereiden mittaustuloksissa on havaittavissa vastaava yhteys, jossa E_2 laskee n_{PS} :n kasvaessa noin 30 %:sta 100 %:iin. Tämä yhteys on esitetty kuvassa 7.15.



Kuva 7.15: Primäärirakenteen huokoisuuden vaikutus kantavuuteen

Primäärirakenteen huokoisuuden avulla määritettävä primäärirakenteen koordinaatioluku cn_{PS} on tutkimusaineiston perusteella n_{PS} :n ohella selvimmin kantavuuteen vaikuttava tekijä. Tämä yhteys on esitetty kuvassa 7.16.



Kuva 7.16: Koordinaatioluvun vaikutus kantavuuteen

Koemateriaalien primäärirakenteen koordinaatioluvut ovat välillä 2,8–10,3. Tällä välillä kantavuus kasvaa cn_{PS} :n kasvaessa. Korrelaation perusteella määritettyä yhtälöä voidaan mahdollisesti hyödyntää eristys- ja välikerrosten rakeisuusohjealueella tai lähellä sitä sijaitsevien luonnonmateriaalien kantavuuden arviointiin kaavan 27 mukaisesti.

$$E_2 = 36,833cn_{PS} - 50,414, \quad (27)$$

Yhtälö on esitetty yksiköttömässä muodossa. Tuloksena saatavan E_2 :n yksikkönä on MPa. Koordinaatioluvun kaavasta 22 pienin mahdollinen saatava cn_{PS} on 2,827 silloin, kun primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} on 100%, joten pienin mahdollinen kaavalla 27 saatava E_2 on 53,7 MPa.

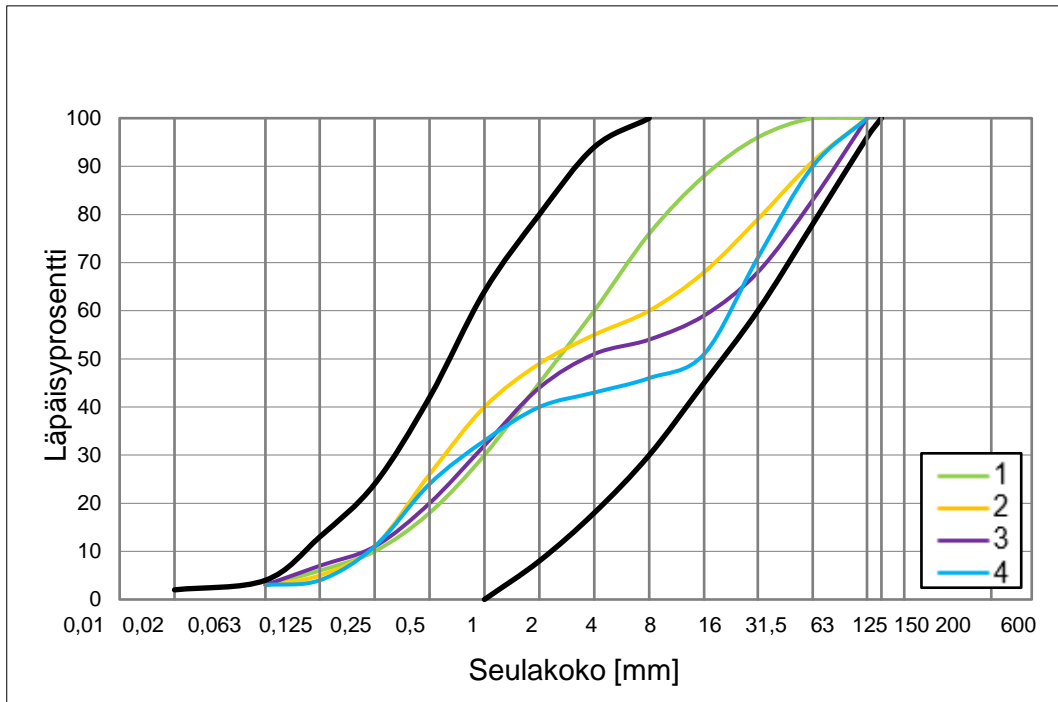
7.4 Kantavuuden arviointi laskentamenetelmällä

Esitellyn laskentamenetelmän hyödyntämisessä kantavuuden arviointiin tulee ensin määrittää raekokosuhte C_U ja läpäisyprosenttia d_{80} vastaava rakeisuus-käyrästä. Kaavalla 26 saadaan arvio siitä, mihin kuivairtitiheyteen materiaali on mahdollista tiivistää C_U :n ja d_{80} :n perusteella. Kiviaineksen kiintotiheyden ja lasketun kuivairtitiheyden avulla voidaan määrittää kiviaineksen ja huokosten osuudet tiivistetystä rakenteesta. Tässä työssä kiintotiheyden arvona käytetään Troxlermittauksilla määritettyä koepenkereiden materiaalien kiintotiheyksien keskiarvoa 2660 kg/m³.

Rakeisuuskäyrästä tunnistetaan seuraavaksi primäärirakenteen, sekundäärirakenteen ja ylisuurten rakeiden raekokoalueet ja määritetään niiden osuudet koko rakenteen tilavuudesta. Kaavalla 21 määritetään sekundäärirakenteen osuuden V_{SS} , huokoisuuden V_{voids} ja ylisuurten rakeiden osuuden $V_{>PS}$ avulla primäärirakenteen huokoisuus n_{PS} , jonka avulla lasketaan kaavalla 22 primäärirakenteen koordinaatioluku cn_{PS} . Kaavalla 27 voidaan lopuksi määrittää arvio levykuormituksella mitattavasta E_2 -arvosta cn_{PS} :n perusteella.

Laskentamenetelmää voidaan arvioida soveltamalla sitä erilaisille kokeellisille rakeisuuskäyrille. Soveltamalla menetelmää rakeisuuskäyrälle, joka vastaa eristys- ja välikerroksen materiaalin ohjealueen alarajaa (vasen reuna) kantavuudeksi E_2 saadaan 54 MPa. Materiaalilla primäärirakenteen osuus on 0 % ja sekundäärirakenteen 100 %, joten kantavuus on heikoin mahdollinen laskentamenetelmällä saatava arvo. Vastaavasti ohjealueen ylärajan (oikea reuna) mukaiselle rakeisuuskäyrälle kantavuudeksi saadaan 329 MPa. Tällä rakeisuuskäyrällä primäärirakenteen osuus on 88 %, sekundäärirakenteen osuus 8 % ja ylisuurten rakeiden osuus 4 %. Koordinaatioluku cn_{PS} tällä rakeisuuskäyrällä on 10,31.

Eristyskerroksesta levykuormituskokeella mitattujen kantavuusarvojen keskiarvo vaatimus on InfraRYLin mukaan 130 MPa. Rakeisuuskäyrät 1, 2, 3 ja 4 ovat esimerkkejä rakeisuuskäyristä, joilla laskentamallin mukaan saavutetaan tämä kantavuus. Kaikilla rakeisuuskäyrillä hienoainespitoisuus on 3 %. Rakeisuuskäyrät 1–4 on esitetty kuvassa 7.17.



Kuva 7.17: Kokeelliset rakeisuuskäyrät 1–4

Rakeisuuskäyrä 1 on ohjekäyrien suuntainen ja suunnilleen niiden puolivälissä. Tällä rakeisuuskäyrällä primäärirakenne koostuu kaikista yli 2 mm lajitteista. Rakeisuuskäyrillä 2–4 on eri muotoinen ”hiekkapatti”. Rakeisuuskäyrä 2:lla kaikki yli 2 mm lajitteet kuuluvat primäärirakenteeseen. Rakeisuuskäyrä 3:lla 2–4 mm lajitetta on liian suuri määrä suhteessa 4–8 mm lajitteeseen, joten primäärirakenteeseen kuuluvat kaikki yli 4 mm lajitteet. Rakeisuuskäyrä 4:llä primäärirakenteen muodostavat kaikki yli 16 mm lajitteet. Tässä materiaalissa 8–16 mm osuus on liian pieni 16–31,5 mm osuuteen verrattuna. Rakeisuuskäyrillä 2–4 karkearakeinen osuus on selvästi suurempi kuin käyrällä 1, mutta laskennallinen kantavuusarvo on sama rakeisuuskäyrien epäedullisten muotojen takia. Taulukossa 7.6 on esitetty laskentamenetelmässä käytettävät rakeisuuskäyrästä tunnistettavat parametrit ja arvioitu kantavuusarvo.

Taulukko 7.6: Kokeellisilla rakeisuuskäyrillä saadut parametrit ja kantavuudet

| Rakeisuus- käyrä | ρ_d [kg/m ³] | V_{agg} [%] | V_{voids} [%] | PS [mm] | V_{PS} [%] | V_{SS} [%] | $V_{>PS}$ [%] | n_{PS} [%] | c_{nPS} | E_2 [MPa] |
|---------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------|----------------|
| Alaraja | 1796 | 67,5 | 32,5 | - | 0,0 | 67,5 | 0,0 | 100,0 | 2,83 | 54 |
| Yläraja | 2056 | 77,3 | 22,7 | 2-125 | 68,0 | 6,2 | 3,1 | 29,8 | 10,31 | 329 |
| 1 | 1947 | 73,2 | 26,8 | 2-63 | 40,3 | 32,9 | 0,0 | 59,7 | 4,90 | 130 |
| 2 | 2089 | 78,5 | 21,5 | 2-125 | 40,0 | 38,5 | 0,0 | 60,0 | 4,88 | 130 |
| 3 | 2187 | 82,2 | 17,8 | 4-125 | 40,3 | 41,9 | 0,0 | 59,7 | 4,91 | 130 |
| 4 | 2186 | 82,2 | 17,8 | 8-125 | 40,3 | 41,9 | 0,0 | 59,7 | 4,90 | 130 |

7.5 Laskentamenetelmän arviointi

Laskentamenetelmällä on mahdollista saada parempia arvioita luonnonmateriaaleista rakennettujen penkereiden kantavuuksista kuin muilla arviointimenetelmillä, kuten ohjekäyrästöillä tai rakeisuuskäyrästä määritettävillä yksinkertaisilla tunnusluvuilla. Kantavuuteen vaikuttaa olennaisesti rakeisuuskäyrän sijainti ohjealueella, eli se kuinka hieno- tai karkearakeista materiaali on. Lähellä vasenta reunaa olevilla materiaaleilla saavutetaan heikkoja kantavuuksia ja lähellä oikeaa reunaa olevilla materiaaleilla korkeita kantavuuksia. Menetelmä ottaa tämän huomioon ensisijaisesti primääri- ja sekundäärirakenteiden osuuksilla, joiden rajaksi on asetettu 2 mm. Menetelmällä tunnistetaan myös ylisuuret rakeet, jotka eivät juurikaan vaikuta materiaalin käyttäytymiseen.

Toinen kantavuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä on rakeisuuskäyrän muoto. Menetelmällä on mahdollista tunnistaa tilanteet, jossa tiettyä lajitetta on joko liikaa tai liian vähän suhteessa viereisten raekokojen lajitteisiin. Näissä tapauksissa kyseinen lajite ei toimi osana kantavaa raerunkoa. Käytännössä tämä tulee kyseen silloin, kun rakeisuuskäyrässä on selvästi muuta rakeisuuskäyrää loivempi tai jyrkempi osuus yli 2 mm rakeisuusalueella. Alle 2 mm alueella rakeisuuskäyrän muodon merkitys ei ole enää yhtä suuri.

Menetelmää voi tässä työssä esitetyillä empiirisillä yhtälöillä soveltaa ainoastaan eristys- ja välikerrosten ohjealueen luonnonmateriaaleille. Kaikki koeaineiston materiaalit ovat lisäksi peräisin harjuista tai reunamuodostumista ja ne ovat raemuodoltaan pääasiassa pyöreähköjä. Partikkelien pakkautumismalli on kuitenkin laadittu täysin pyöreille partikkeleille, mikä ei täysin vastaa luonnonmateriaaleja. Laskentamenetelmää voi olla mahdollista soveltaa esimerkiksi moreenimaalajeille tai kalliomurskeille, mutta niitä varten tulisi määrittää uudet empiiriset korrelaatiot.

Mahdollisesti merkittävin menetelmän heikkous on se, että se voi joissain tapauksissa olla herkkä pienillekin lajitteiden prosenttiosuuksien muutoksille. Pienikin muutos voi vaikuttaa siihen, kuuluuko jokin raekoko primääri- vai sekundäärirakenteeseen ja siten vaikuttaa merkittävästi ennustettuun kantavuuteen. Todellisuudessa jonkin lajitteen osuuden kasvattaminen tai laskeminen prosentilla vaikuttaa kantavuuteen laskentamenetelmään verrattuna selvästi vähemmän. Tämä ongelma koskee vain joitain rakeisuuskäyriä.

Tutkimuksen tausta-aineistossa on hyvin vähän karkearakeisia materiaaleja, joiden rakeisuuskäyrä on lähellä ohjealueen oikeaa reunaa. Kantavuuden ja koordinaatioluvun c_{nPS} välinen yhteys ei tästä syystä ole yhtä varma kuin alemman koordinaatioluvun ($c_{nPS} < 6$) materiaaleilla. Tutkimusaineistossa ei myöskään ole mukana materiaaleja, joiden rakeisuuskäyrä sijoittuisi selvästi ohjealueen ulkopuolelle.

Laskentamenetelmä ei huomioi hienoainespitoisuuden vaikutusta kantavuuteen, vaikka se todellisuudessa on yksi kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä. Ohjealueen luonnonmateriaaleilla hienoainespitoisuus saa vaihdella välillä 0–4 %. Tällä vaihteluvälillä vaikutus kantavuuteen on oletettavasti kuitenkin melko pieni. Yhdelläkään tutkimuksen materiaaleista hienoainespitoisuus ei ollut nolla.

Yidetin et al. (2013a) mukaan liian alhainen sekundäärirakenteen osuus aiheuttaa sen, että primäärirakenne ei saa riittävästi tukea ja kantavuus on alhaisempi kuin ideaalitalanteessa. Tutkimuksessa ei ollut mukana materiaaleja, joilla olisi laskennallisesti havaittu tämä ilmiö. Materiaali J:n käyttäytymisessä mahdollisesti kuitenkin oli havaittavissa hienoaineksen puuttumisen vaikutus kantavuuteen, mutta sen tapauksessa kyse oli alle 0,5 mm lajitteiden vähäisestä määrästä. Luonnonmateriaalit, joilla alle 2 mm lajitepitoisuudet ovat hyvin alhaisia, lienevät harvinaisia.

8 Yhteenveto

Tämän työn keskeisimpänä tarkoituksena oli selvittää luonnonmateriaalin rakeisuuden vaikutus radan eristys- ja välikerroksen kantavuuteen. Nykyisiin InfraRYLin (2020) vaatimusten mukaisiin kantavuuksiin ei ole ollut mahdollista päästä kaikilla rakeisuusvaatimukset täyttävillä luonnonmateriaaleilla. Vaatimuksia heikompiin kantavuuksiin jäätiin silloin, kun materiaalin rakeisuuskäyrä on ollut lähellä ohjealueen vasenta reunaa tai kun materiaalissa on ollut suhteessa muihin lajitteisiin liian pieni osuus keskikokoisia lajitteita. Jälkimmäisessä tapauksessa on kyse jo aiemmin ongelmalliseksi havaitusta hiekkapattirakeisuuskäyrästä. Tässä työssä tutkittiin lisäksi ajan ja vesipitoisuuden vaikutusta luonnonmateriaalista rakennetun eristys- ja välikerroksen kantavuuteen.

Koerakenteiden perusteella tehdyt havainnot

Luonnonmateriaalin rakeisuuden vaikutusta kantavuuteen tutkittiin koepenkereillä ja Tampereen yliopiston rakennushallissa tehdyllä koerakenteella. Lisäksi käytössä oli aiempien tutkimusten tuloksia, joissa pystyttiin yhdistämään levykuormituskokeella mitattu kantavuus materiaalin rakeisuuskäyrään. Koepenkereille tehtyjen Troxler-mittausten, levykuormituskokeiden sekä rakeisuusmääritysten perusteella tehtiin seuraavia havaintoja:

- Rakenteesta mitattu kuivairtotiheys on kantavuuteen vaikuttava tekijä. Osalla koepenkereistä kantavuus jäi kuitenkin alhaisemmaksi kuin mitä kuivairtotiheyden perusteella olisi voinut olettaa, mikä johtui materiaalin rakeisuuskäyrän ongelmallisesta muodosta
- Rakenteen kuivairtotiheyteen vaikuttaa tiivistettävän materiaalin ominaisuuksien lisäksi tiivistystyö. Kastelua käyttämällä päästiin suurempiin kuivairtotiheyden arvoihin ja siten myös parempiin rakenteen kantavuuksiin kuin ilman kastelua tiivistetyillä rakenteilla.
- Painavammalla jyrällä tiivistämiseen riittää pienempi ylityskertamäärä. Tiivistämällä rakenne 23 t jyrällä päästiin pienemmällä ylityskertamäärällä samaan kuivairtotiheyteen kuin kevyemmällä 13 t jyrällä.
- Kuivairtotiheys on riippuvainen tiivistystyön lisäksi myös materiaalin raekosuhteesta ja 80% läpäisyä vastaavasta raekoosta.

Proctor-kokeella määritettävän maksimikuivatilavuuspainon ennustamiseen käytettävää yhtälöä muokattiin vastaamaan kenttäolosuhteissa saavutettavaa luonnonmateriaalin kuivairtotiheyttä. Tätä yhtälöä hyödynnettiin myöhemmin kantavuuden arviointiin käytettävän laskentamenetelmän soveltamisessa.

Kaikki tämän tutkimuksen koepenkereiden materiaalit olivat Salpausselän reuna- muodostumasta peräisin olevia raemuodoltaan pyöreähköjä materiaaleja. Rakennushallin koerakenteen materiaali oli harjasta otettua ja raemuodoltaan pyöreähköä. Raemuodon ja rakeiden pinnankarkeuden vaikutusta kantavuuteen ei tässä työssä tutkittu. Se on kuitenkin yksi kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä.

Pakkautumisteoriaan perustuvan laskentamenetelmän soveltaminen

Työssä sovellettiin Yidetin esittämää partikkelien pakkautumisteoriaan perustuvaa laskentamenetelmää, jossa rakeisuusjakautumasta tunnistetaan primääri- ja sekundäärirakenne. Primäärirakenne on materiaalin karkearakeinen osuus, jonka kautta rakenteeseen kohdistuvat rasitukset pääasiassa välittyvät. Sekundäärirakenteeseen kuuluvat kaikki primäärirakenteen lajitteita pienemmät lajitteet. Sekundäärirakenteen osuuden ollessa liian suuri se häiritsee primäärirakennetta ja laskee siten rakenteen kantavuutta. Jos sen osuus taas on liian pieni, se ei anna riittävästi tukea primäärirakenteelle.

Yidetin väitöskirjassa rakeisuusjakautumasta tunnistettujen suureiden (DP , n_{PS} , cn_{PS} , e_s) osoitettiin korreloivan resilient-moduulin, CBR-arvon ja pysyvien muodonmuutosten kanssa. Tässä työssä havaittiin, että materiaalin primäärirakenteen koordinaatioluku cn_{PS} korreloi melko hyvin levykuormituskokeella määritettävän E_2 -arvon kanssa. Suuremmilla materiaalin koordinaatioluvun arvoilla saatiin suurempia kantavuuksia. Korrelaation perusteella määritettyä yhtälöä käytettiin kantavuuden ennustamiseen rakeisuusjakautuman perusteella.

Työssä käytetyn laskentamallin analysoinnin perusteella tehtiin kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä mm. seuraavat päätelmät:

- Kantavuuteen vaikuttaa vahvasti 2 mm läpäisyprosentti, joka Yidetin mukaan on primäärirakenteen pienin mahdollinen raekoko. Rakeisuuskäyrien ollessa toistensa kanssa samansuuntaiset ja -muotoiset, saavutettavat kantavuudet alenevat 2 mm läpäisyprosentin kasvaessa.
- Kantavuuteen voi vaikuttaa laskevasti tietyn lajitteen liian suuri tai pieni määrä suhteessa sen viereisiin lajitteisiin. Käytännössä tämä ilmenee rakeisuuskäyrässä lähes vaakasuorana osuutena yli 2 mm alueella. Tietyn lajitteen puuttuminen aiheuttaa kuormitukset kantavan primäärirakenteen katkeamisen ja siten heikentää koko rakenteen kantavuutta. Tämä ilmiö on havaittavissa esimerkiksi koepenkereellä G.
- Sekundäärirakenteen liian pieni määrä vaikuttaa laskevasti kantavuuteen. Oletettua alhaisempi kantavuus johtui penkereellä J oletettavasti alle 0,5 mm lajitteiden liian pienestä määrästä.

Ajan ja vesipitoisuuden vaikutus kantavuuteen

Luumäki-Imatra-ratahankkeella tehtiin valmiista radan eristys- ja välikerroksista PPL-mittauksia noin kilometrin pituiselta osuudelta. Kohteessa materiaali oli samaa koko mittausalueella, eikä rakenteen päällä ollut juurikaan ollut työmaaliikennettä. Tuloksista havaittiin, että mitä pidempi aika oli kulunut rakenteen tiivistämisestä, sitä parempi kantavuus ja matalampi tiiviyssuhde sillä oli.

Ajan ja vesipitoisuuden vaikutusta kantavuuteen tutkittiin lisää rakennushallissa tehdyllä koerakenteella. Heti rakentamisen jälkeen mitattu kantavuus oli 142,2 MPa. Kolmen viikon päästä ensimmäisistä mittauksista rakenteen kantavuus oli kasvanut arvoon 205,9 MPa eikä rakenteen kastelu laskenut kantavuutta. Kun rakennetta seuraavalla viikolla kasteltiin runsaasti kolmena päivänä ja mittauspäivän aamuna, sen kantavuus laski arvoon 166,8 MPa. Ajan ja vesipitoisuuden vaikutuksesta tehtiin seuraavat päätelmät:

- Ajan kuluessa ja vesipitoisuuden laskiessa rakenteen kantavuus kasvaa ja tiiviyssuhde alenee.

- Vähäinen rakenteen kastuminen ei vaikuta kantavuuteen, mutta runsas kastelu laskee kantavuutta selvästi.

Jatkotutkimustarpeet

Tämän työn yhteydessä tuli ilmi useita jatkotutkimustarpeita. Työssä käytetty laskentamalli soveltuu melko hyvin kantavuuden arviointiin, mutta joillakin materiaaleilla laskennallinen ja rakenteesta mitattu kantavuus eroavat enemmän kuin toisilla. Malli ei huomioi alle 0,5 mm lajitteiden alhaisen määrän aiheuttamaa matalampaa kantavuutta, mikä oletettavasti oli syynä penkereen J melko heikolle kantavuudelle. Kantavuuden arvioinnissa ei ole myös huomioitu raemuodon vaikutusta eikä hienoainespitoisuuden vaikutusta tarkemmin. Näiden asioiden huomiointi voi edellyttää uusien empiiristen kokeiden lisäksi myös käytetyn laskentamallin kehittämistä pakkautumisteorian näkökulmasta. Työssä käytetty malli perustui täysin pyöreiden rakeiden pakkautumiseen. Jatkotutkimuskohteena on pakkautumisteoriaan perustuvan mallin soveltaminen erilaisille materiaaleille, jotka eroavat luonnonmateriaaleista sekä raemuodon että rakeisuusjakautuman osalta.

Toinen selvä jatkotutkimustarve liittyy kantavuuden kasvuun ajan kuluessa ja sen muuttumiseen vesipitoisuuden vaikutuksesta. Ilmiön tarkempi teoreettinen kuvaaminen on edellytyksenä sille, että sen vaikutusta kantavuuteen pystytään arvioimaan. Tutkittavana kysymyksenä voi olla myös se, tuleeko rakenteen käytön aikaisena kantavuutena pitää välittömästi tiivistystyön jälkeen mitattua vai myöhemmin mitattua kantavuutta.

Tässä työssä havaittiin usealla penkereellä varsinkin levykuormituskokeella mitattuna heikkoja tiiviyssuhteiden arvoja. Jatkotutkimussuosituksena tämän perusteella on tiiviyssuhteeseen vaikuttavat tekijät ja tiiviyssuhteen vaikutus rakenteen käyttäytymiselle etenkin tilanteissa, joissa kantavuus on kuitenkin riittävä.

Lähdeluettelo

- /1/ Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Laukkanen, K., Petäjä, S., Pihlajamäki, J., Spoofo, H. (2001). Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001, Tiehallinto, Helsinki. 139 s. + liitt. 2 s.
- /2/ Arshad, M. (2019). Development of a Correlation between the Resilient Modulus and CBR Value for Granular Blends Containing Natural Aggregates and RAP/RCA Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. 16 s.
- /3/ Bao, D., Jiaqi, C., Wang, H., Liu, H., Zhang, J. (2019). Characterizing Skeleton Structure and Stacking Properties of Continuous and Gap Graded Aggregate Mixtures. *Advances in Civil Engineering*. 14 s.
- /4/ BART Facilities Standards (2018). Section 34 11 27. Ballasted Track. 14 s.
- /5/ Björkqvist, A. (2020) RU2 EV-kerroksen koekenttä raportti. GRK Infra Oy. 2 s. + liitt. 65 s.
- /6/ Chang, C. S., Deng, Y. (2017). A particle packing model for sand-silt mixtures with the effect of dual-skeleton. *Granular Matter*. 15 s.
- /7/ Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. Spon Press. 448 s.
- /8/ Dehlbom, B., Håkansson, S., Berggren, E. (2018). Förbättring av bärighet hos befintliga järnvägsanläggningar. Teori och praktik. Statens geotekniska institut, Linköping. 179 s. + liitt. 86 s.
- /9/ Erkkilä, J. (2010). Radan alusrakenteen kantavuus- ja tiiviys selvitys. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 107 s. + liitt. 7 s.
- /10/ Erlingsson, S. (2011). On Forecasting the Resilient Modulus from the CBR Value of Granular Bases. *Road Materials and Pavement Design*. s. 783-797.
- /11/ Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Delft University of Technology, MRT-Productions. 654 s.
- /12/ Forssblad, L. (2000). *Packning*. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 108 s.
- /13/ García-de-la-Oliva, J. L., Moreno-Robles, J. (2019) Granular sub-ballast compaction control methods in high-speed railway lines. Spanish experience. *Transportation Geotechnics*. s. 135-145.
- /14/ Hartikainen, O-P. (2007). *Maarakennustekniikka*. Otatieto, Helsinki. 196 s.
- /15/ Head, K. H., Epps, R. J. (2010). *Manual of Soil Laboratory Testing: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. Whittles Publishing. 512 s.
- /16/ Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*. CRC Press, The Netherlands. 414 s.
- /17/ InfraRYL (2020). *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset*. Rakennustieto Oy.

-
- /18/ Juvankoski, M., Laaksonen, R. (2001). Sitomattomat tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalien käyttäytymisestä. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 72 s. + liitt. 30 s.
- /19/ Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A., Kolisoja, A. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviyys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011, Liikennevirasto, Helsinki. 152 s.
- /20/ Kalliainen, A., Kolisoja, P., Nurmikolu, A. (2014). radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2014, Liikennevirasto, Helsinki. 174 s.
- /21/ Kolisoja, P. (1993). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen selvityksiä 38 /1993, Tielaitos, Helsinki. 147 s.
- /22/ Kolisoja P. (1996). Sitomattomien materiaalien moduulit. Muodonmuutosmoduulin arviointimenettely. Tielaitoksen selvityksiä 44/1996, Tielaitos, Helsinki. 84 s.
- /23/ Kolisoja, P., Levomäki, M., Mäkelä, E., Niskanen, P. (1999). Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 6/1999, Ratahallintokeskus, Helsinki. 135 s.
- /24/ Kolisoja, P., Järvenpää, I., Mäkelä, E., Levomäki, M. (2000). Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 5/2000, Ratahallintokeskus, Helsinki. 137 s. + liitt. 15 s.
- /25/ Koppana, T. (2017). Pudotuspainolaitteen ja levykuormituskokeen vertailu. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 118 s.
- /26/ Korkiala-Tanttu, L. (2008). Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. VTT Publications 702, Espoo. 92 s. + liitt. 84 s.
- /27/ Kuskelin, A., Orama, R., Pouttu, P. (1994). Rakentamisen laadunvarmistus. Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Tielaitos, Geokeskus, Helsinki. 41 s. + liitt. 122 s.
- /28/ Kuula, P. (2021). Haastattelu 27.5.2021 ja haastatteluun liittyvät sähköpostikeskustelut.
- /29/ Lankinen, M. (2020) Eristys- ja välikerrosten koekenttäraportti (RU 2). GRK Infra Oy, Imatra. 15 s.
- /30/ Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A. (2000). State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. Journal of Transportation Engineering. s. 66-75
- /31/ Liikennevirasto (2018a). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3. Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018, Liikennevirasto, Helsinki. 38 s. + liitt. 56 s.
- /32/ Liikennevirasto (2018b). Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018, Liikennevirasto, Helsinki. 127 s. + liitt. 7 s.
- /33/ Rantamäki, R., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. (2009). Geotekniikka. Otatieto, Helsinki. 307 s.
- /34/ Selig, E. T., Waters, J. M. (1994). Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford, Lontoo. 463 s.

-
- /35/ SFS-EN 13286-7 (2004). Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 7: syklinen Kolmiaksaalikoe sitomattomia kiviainesseoksia varten. Suomen standardoimisliitto SFS. 37 s.
- /36/ SFS-EN 13286-2 (2011). Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction. Suomen standardoimisliitto SFS. 29 s.
- /37/ Shako, A. (2018) Characterization of Soils. In: Bobrowsky P.T., Marker B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.
- /38/ Spoof, H., Petäjä, S., (2000). Pudotuspainolaitemittaus. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, VTT Yhdyskuntatekniikka. 15 s. + liitt. 2 s.
- /39/ Sweere, G. (1990). Unbound granular bases for roads. Delft University of Technology. 384 s. + liitt. 48 s.
- /40/ Thom, N. (1988). Design of Road Foundations. University of Nottingham. 307 s. + 45 s.
- /41/ Törnqvist, J., Jauhiainen, P. (2001). ICT-koe tien rakennekerros materiaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001, Tiehallinto, Helsinki. 47 s. + liitt. 14 s.
- /42/ Union Pacific (2020). Union Pacific Railroad Industrial Track Specifications. 26 s.
- /43/ UPRR Std. Dwg. 0010E (2011). Ballast & Subballast Gradation Table. Union Pacific Railroad.
- /44/ UPRR Std. Dwg. 0013A (2006). Grain Size Distribution for Subgrade Soils. Union Pacific Railroad.
- /45/ Yideti, T. F., Birgisson, B., Jelagin, D. & Guarin, A., (2013a). Packing theory-based framework to evaluate permanent deformation of unbound granular materials. International Journal of Pavement Engineering. s. 309-320.
- /46/ Yideti, T. F., Birgisson, B., Jelagin, D. & Guarin, A., (2013b). Packing theory-based framework for evaluating resilient modulus of unbound granular materials. International Journal of Pavement Engineering. s. 689-697
- /47/ Yideti, T. F., Birgisson, B., Jelagin, D. & Guarin, A., (2013c). Influence of aggregate packing structure on California bearing ratio values of unbound granular materials. Road Materials and Pavement Design. s. 102-113
- /48/ Yideti, T. F. (2014). Packing theory-based Framework for Performance Evaluation of Unbound Granular Materials. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. 59 s.
- /49/ Youd, T. L. (1973). Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. ASTM STP 525, American Society for Testing and Materials. s. 98-112.
- /50/ Zou, R. P., Gan, M. L., Yu, A. B. (2011). Prediction of the porosity of multi-component mixtures of cohesive and non-cohesive particles. Chemical Engineering Science. s. 4711-4721.



Väylävirasto
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745
ISBN 978-952-317-908-0
www.vayla.fi