

Toni Saarikoski

KAPILLAARISEN NOUSUKORKEUDEN MÄÄRITYSMENETELMÄT JA HYÖDYN- NETTÄVYYS RADAN ALUSRAKENNE- MATERIAALIEN LAADUN ARVIOINNISSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Toni Saarikoski: Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen ja hyödynnettävyys radan alusrakennemateriaalien laadun arvioinnissa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Huhtikuu 2020

Ratarakenteiden tutkimuksessa käytettäviä tutkimusmenetelmiä pyritään kehittämään. Tässä diplomityössä tarkasteltiin kapillaarisen nousun määrittäminen ja radan alusrakennemateriaalien kapillaaristen nousukorkeusmäärittäminen hyödynnettävyyttä materiaalien kuormituskestävyysominaisuuksien arvioinnissa. Eri koemenetelmien tuottamia tuloksia tarkasteltiin ja vertailtiin toisiinsa. Käytetyt koemenetelmät olivat putkessa tehty kapillaarisen nousun määrittäminen (suora menetelmä) sekä Sahi-tyyppisellä kapillaarimetrillä suoritettu kapillaarisen nousun määrittäminen. Näyte-materiaaleina käytettiin radan alusrakennemateriaaleja. Lisäksi tutkittiin kuvaako kapillaarisen nousukorkeusmäärittäminen tulos materiaalin kuormituskäyttäytymistä syklisessä kolmiaksaaliko-keessa, jossa näytteeseen kohdistettu kuormitus muistuttaa junakuormituksen alusrakenteeseen kohdistamaa syklistä kuormitusta.

Kapillaarimetrikokeiden yhteydessä näytteen tiiviystilan huomattiin vaikuttavan voimakkaasti kokeen tulokseen, joten kokeet tehtiin jokaisen näytemateriaalin kohdalla kahta eri tiiviystilaa edustaville näytteille. Täryraudalla tiivistetyt näytteet tuottivat lähes kaksi kertaa suuremmat tulokset kuin perinteiseen tapaan valmistellut näytteet, joissa tiivistyminen tapahtui vain veden vaikutuksesta ilman aktiivista tiivistystä.

Putkessa suoritettujen kapillaarisen nousun kokeet osoittivat, että kapillaarinen nousu voi jatkua huomattavan pitkään jopa pienen hienoainespitoisuuden omaavilla hiekoilla. Tiiviystilan havaittiin vaikuttavan kokeen tulokseen myös tämän koetyypin tapauksessa.

Putkikokeiden näytteiden tiiviystilat ja kokeista saadut tulokset olivat keskimäärin hieman suurempia kuin tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden vastaavat. Satunnaisuus oli kuitenkin voimakasta ja joidenkin näytemateriaalien kohdalla kokeen tulos tai näytteessä vallinnut kuivatilavuuspaino oli tärytiivistetyn näytteen kapillaarimetrikokeessa jopa suurempi kuin putkikokeessa. Perinteiseen tapaan valmistettujen kapillaarimetrikokeiden näytteiden tuottamat tulokset jäivät keskimäärin yli kaksi kertaa pienemmiksi kuin putkikokeiden tulokset.

Kapillaarimetrin tai putkikokeen tulosten ei havaittu luotettavasti kuvaavan materiaalien käyttäytymistä syklisessä kolmiaksaaliko-keessa. Myöskään materiaalin rakeisuuskäyrän perusteella tulkittu laatu ei kuvannut tarkasti materiaalin käyttäytymistä syklisessä kolmiaksaaliko-keessa. Kokeiden perusteella jää epäselväksi olisivatko kapillaarisuusmäärittäminen tulokset tai rakeisuuksiin perustuneet laatuarviot kuvanneet materiaalien kuormituskäyttäytymistä syklisissä kolmiaksaaliko-keissa, jos tutkittavien materiaalien laadullinen skaala olisi ollut laajempi.

Avainsanat: kapillaarisuus, kapillaarimetri, kapillaarinen nousukorkeus, rata, kuormituskestävyys, kolmiaksaaliko-ke.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Toni Saarikoski: Capillary Rise – Determination Methods and Potential as Quality Assessment Parameter for Subballast Materials of Railway Track

Master's thesis

Tampere University

Masters Degree Programme in Civil Engineering

April 2020

In this master's thesis capillary rise values determined with two different methods were examined and compared with each other. It was also studied if capillary rise value would have potential as quality assessment parameter for subballast material of railway track. Methods used to determine capillary rise were determination of capillary rise in soil filled tubes (direct method) and test conducted with Sahi-type capillarimeter. Tested materials were subballast materials of railway track. It was also examined if capillary rise value would indicate the deformation level in cyclic triaxial test which was used to mimic the loading that railway traffic causes to the subballast.

It was discovered that density of the test sample had significant effect on the value of capillary rise on the capillarimeter test. Thus, capillarimeter tests were conducted to each material using two densities. Samples of higher density were compacted with compaction fork. On average these samples produced almost twice as high capillary rise values compared to the lower density samples which were prepared in a conventional way with no active compaction work.

Tube tests revealed that capillary rise can continue for considerably long time even on sands having low fines content. Soil density had impact on the capillary rise also when tube test was the method used.

Average capillary rise values and sample densities were slightly higher on tube tests than capillarimeter tests of high-density samples. However, deviations from the aforementioned trend were common and some sample materials had even higher capillary rise value or sample density on capillarimeter test than tube test. Capillarimeter tests performed to low-density samples produced on average over two times smaller values than tube tests.

Capillary rise value measured with capillarimeter or tube test was not reliably describing material's capability to resist permanent deformation in cyclic triaxial test. It was also discovered that materials' grading curve-based quality assessments were not in line with materials' capabilities to resist permanent deformation in cyclic triaxial tests. It remains unclear if the connection between capillary rise or grading curve-based quality assessment and material's deformation level in cycling triaxial test could have been found if sample materials would have had wider qualitative scale.

Keywords: capillarity, capillarimeter, capillary rise, railway track, load bearing capacity, triaxial test.

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen yliopiston maa-, pohja- ja ratarakenteiden yksikössä osana Tampereen yliopiston ja Väyläviraston välistä Elinkaaritehokas väylänpito-tutkimusohjelmaa. Kiitän työn ohjaajia Heikki Luomalaa ja Pauli Kolisojaa. Lisäksi kiitän Juha Latvalaa ja laboratorion henkilökuntaa.

Työn aihepiiri oli kiinnostava sekä teoreettisesta että kokeellisesta näkökulmasta tarkasteltuna. Kokeellinen osio piti sisällään laajoja koesarjoja ja tulosten tarkastelu oli mielenkiintoista ja osin haastavaa.

Tampereella 29.4.2020

Toni Saarikoski

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RADAN RAKENNE JA KUORMITUKSET	3
2.1 Radan rakennekerrokset ja alusrakennemateriaalien rakeisuusvaatimukset.....	3
2.2 Radan kuormitukset	5
3. VESI MAAPERÄSSÄ JA MAARAKENTEISSA.....	9
3.1 Veden kiertokulku ja maassa vallitsevat vesivyöhykkeet	9
3.2 Vesi maamateriaalissa	11
3.2.1 Maaveden jaottelu sitoutumismuotojen mukaisesti.....	11
3.2.2 Maaveden potentiaalimalli.....	15
3.2.3 Maassa vallitseva imupaine ja sen mittaaminen.....	18
3.3 Vesi ratarakenteissa.....	20
3.3.1 Radan vedenlähteet.....	20
3.3.2 Radan kuivatuksen periaatteet.....	22
3.3.3 Kuivatuspuutteiden aiheuttamat ongelmat radassa	25
3.3.4 Radan kuivatuksen nykytila ja tulevaisuus Suomessa.....	27
4. KAPILLAARISUUS	28
4.1 Kapillaarisuuden teoreettinen tausta	28
4.2 Kapillaarisuus maamateriaalissa	35
4.3 Veden virtaus sekä imeytymis- ja uudelleenjakautumisprosessi.....	42
4.4 Kapillaarisuuden ja routimisilmion suhde.....	48
5. ALUSRAKENTEEN KUORMITUSKÄYTTÄYTYMINEN.....	50
5.1 Maamateriaalin kuormituskäyttämisen perusteet	50
5.2 Kitkamaalajien muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät	53
5.3 Maamateriaalin lujuuden muodostuminen ja vesipitoisuuden vaikutus muodonmuutuskäyttämiseen	55
6. KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN KOEMENETELMÄT JA MATERIAALIT	64
6.1 Kokeellisten tutkimusten tausta ja kokeissa käytetyt materiaalit	64
6.2 Kapillaarisen nousun määrittäminen putkessa	64
6.3 Kapillaarisen nousun määrittäminen Sahi-mallin kapillaarimetrillä.....	66
6.4 Sykliset kolmiaksiaalikoeket.....	68
6.5 Proctor-kokeet.....	70
7. KOETULOSTEN TARKASTELU	72
7.1 Yleistä	72
7.2 Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen kapillaarimetrillä.....	73
7.2.1 Kvi-Kot-radnan näytteille, rantaradnan näytteille sekä referenssimateriaalille tehdyt kokeet	73
7.2.2 Kvi-Kot yhdistenäytteille tehdyt toistettavuuskokeet	83
7.3 Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen putkimenetelmällä.....	83
7.3.1 Yleistä.....	83
7.3.2 Pitkäkestoiset kokeet	84
7.3.3 Putkikokeiden tulosten yhtenäistarkastelu.....	88
7.4 Kapillaarimetri- ja putkikokeiden tulosten vertailu	93
7.5 Kolmiaksiaalikoetulosten tarkastelu suhteessa kapillaarisuuksiin ja rakeisuuksiin	99
7.5.1 Materiaalien kapillaarisuudet ja rakeisuudet.....	99

7.5.2 Osittain kyllästyneiden näytteiden syklisten kolmiakksiaalikoekiden tulosten tarkastelu.....	100
7.5.3 Täysin kyllästyneiden näytteiden syklisten kolmiakksiaalikoekiden tulosten tarkastelu.....	105
7.6 Proctor-kokeet ja tiiviystilan merkityksen arviointi.....	108
7.7 Vertailu muihin tutkimuksiin.....	112
8.JOHTOPÄÄTÖKSET	116
LÄHTEET	120
LIITE A: PITKÄKESTOISTEN PUTKIKOKEIDEN NÄYTTEIDEN KUIVATILAVUUSPAINOT.....	124
LIITE B: KAPILLAARINEN NOUSU AJAN SUHTEEN PITKÄKESTOISISSA KOKEISSA.....	125
LIITE C: PROCTOR KOKEIDEN TULOKSET	126
LIITE D: LANEN JA WASHBURNIN KOKEIDEN AINEISTOT	129
LIITE E: RANTARADAN MATERIAALIEN, KVL-KOT YHDISTEMATERIAALIEN JA REFERENSSIMATERIAALIN RAKEISUUSKÄYRÄT	137

TERMIT

$(u_a - u_w)$	matriisi-imupaine murtotasossa murron tapahtuessa
$(\sigma_T - u_a)$	netto normaalijännitys murtotasossa murron tapahtuessa
$\partial h_w / \partial y$	hydraulinen gradientti y-suunnassa
\emptyset_g	gravitaatiopotentiaalienergia tilavuuden suhteen
\emptyset_o	osmoottinen potentiaali
\emptyset_p	painepotentiaali
\emptyset_t	kokonaispotentiaali
D10	tehokas raekoko
d	halkaisija
e	huokosluku
E_g	gravitaatiopotentiaalienergia massan suhteen
F	voima
g	putoamiskiihtyvyys
h_c	kapillaarinen nousukorkeus
K_1	moduuliluku
K_2	moduuliekspONENTTI
k_w	vedenläpäisevyyskerroin
L	pituus
M_r	resilient-moduuli
n	huokoisuus
r	säde
R_s	meniskuksen kaarevuussäde
t	aika
T_s	veden pintajännitys
u_w	huokosveden paine
V	tilavuus
W	työ
v_w	veden virtausnopeus
Z	korkeus
α	kontaktikulma
ϵ_r	palautuva muodonmuutos
θ	pääjännitysten summa
θ_0	vertailujännitys
ρ_w	veden tiheys
σ	jännitys/pintajännityskerroin
σ_1	suurempi pääjännitys
σ_3	pienempi pääjännitys
σ_d	deviatorinen jännitys
σ_T	kokonaisjännitys
Φ'	tehokas maan sisäinen kitkakulma
Φ_b	leikkauslujuuden kasvun suhteessa matriisi-imupaineen kasvuun il- maiseva kulma

1. JOHDANTO

Radan raidegeometrian heikkeneminen voi johtaa radan palvelutason laskuun ja lukuisiin tästä aiheutuviin ongelmiin. Radan raidegeometrian heikkeneminen voi aiheutua monista eri tekijöistä. Yksi näistä tekijöistä on alusrakennemateriaalien huono laatu, joka voi aiheuttaa liiallisten pysyvien muodonmuutosten muodostumista. Ongelmia rataverkolla aiheuttavat myös liialliset palautuvat muodonmuutokset, joiden syy voi myös olla alusrakennemateriaalien laadussa. Nykyiset ohjeet pyrkivät määrittelemään tarkasti alusrakennemateriaalina käytettävältä maa-ainekselta vaadittavat ominaisuudet. Suurin osa Suomen rataverkosta on kuitenkin rakennettu aikana, jolloin alusrakenteeseen sijoitettavien materiaalien laatua ei määriteltä tarkasti.

Alusrakennemateriaalin laadun tutkiminen toteutetaan yleensä rakeisuusmäärytyksillä. Tarkempaa tietoa alusrakennemateriaalien laadusta voidaan kuitenkin saada syklistä kolmiakσιαalikokeilla, jotka simuloivat raideliikenteen tuottamaa syklistä kuormitusta ja paljastavat materiaalin muodonmuutuskäyttäytymisen piirteet kyseisenlaisessa kuormitustilanteessa.

Koska syklisen kolmiakσιαalikokeen tekeminen koetaan kalliiksi ja vaativaksi, nähtiin tarpeelliseksi tehdä tässä työssä esitettävä tutkimus maamateriaalin kapillaarisuutta mittaavan Sahi-mallisen kapillaarimetrin hyödyntämismahdollisuuksista alusrakennemateriaalien laadun arvioinnissa. Asian tutkiminen toteutetaan vertaamalla kuuden erityyppisen radan alusrakennemateriaalina käytettävän hiekan kapillaarimetrikotuloksia ja syklisten kolmiakσιαalikokeiden tuloksia, joista jälkimmäisten oletetaan paljastavan materiaalien todellinen laatu. Myös putkessa tehtyjen kapillaarisen nousun kokeiden tuloksia ja rakeisuustietojen pohjalta arvioitua laatua verrataan syklisten kolmiakσιαalikokeiden tuloksiin. Tarkastelu tehdään käyttäen hypoteesina väittämää, jonka mukaan suuri kapillaarisen nousukorkeuden arvo viittaa heikkoon kuormituskäyttäytymiseen syklistä kolmiakσιαalikokeessa.

Kapillaarimetrikokeet eivät rajoitu edellä mainitussa vertailussa käytettäviin näytteisiin vaan käsittävät kaikkiaan 50 materiaalia. Suurimmalle osalle kyseisistä materiaaleista on aikaisempien projektien yhteydessä tehty putkimenetelmällä suoritettavat kapillaarisen nousun arvoinnit ja rakeisuusmäärytykset. Näitä aineistoja hyödyntäen kapillaarisuutta tutkitaan työssä laaja-alaisesti. Tavoitteena on tutkia, miten eri koemenetelmien antamat tulokset suhteutuvat rakeisuuksista laskettavaan tunnuslukuihin ja toisiinsa. Tarkasteluissa hyödynnetään materiaalien rakeisuustietoja ja esimerkiksi tiiviystilan merkityksestä tehdään huomioita.

Ennen kokeellista osiota työssä esitetään radan pengermateriaaleissa olevaan kosteuteen keskittyvä teoriaosio. Aluksi käydään yleisellä tasolla läpi radan rakenne ja siihen kohdistuvat kuormitukset. Tämän jälkeen huomio kohdistetaan maaperässä ja maarakenteissa olevaan veteen keskittyen erityisesti erilaisiin veden sitoutumismuotoihin maamateriaalissa. Teoreettisesti kattavamman näkökulman edellä mainittuun asiaan antaa maaveden potentiaalimalli. Muita käsiteltäviä asioita ovat esimerkiksi imupaine, radan vedenlähteet ja radan kuivatustekniset periaatteet.

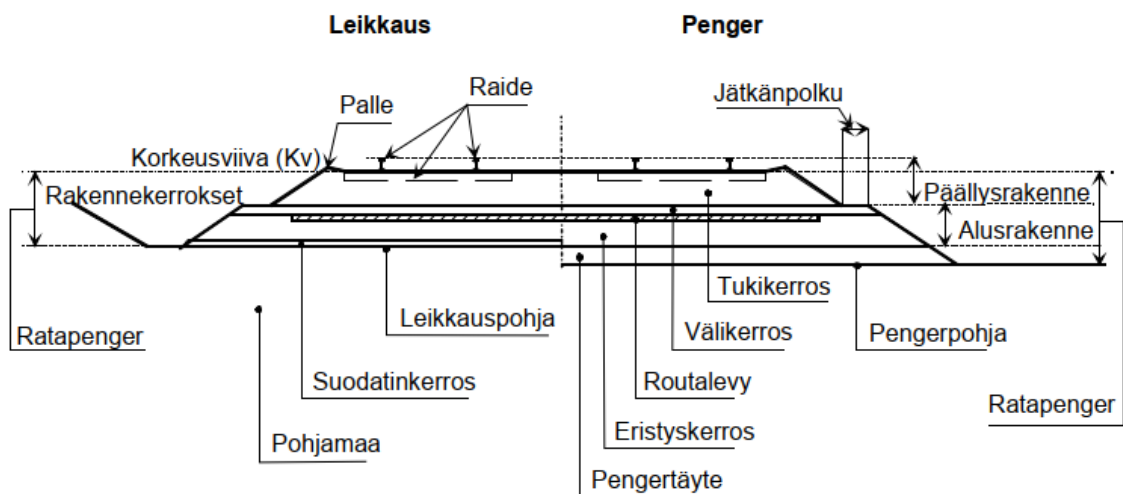
Seuraavaksi tarkastelun kohteeksi otetaan kapillaarisuus, jonka suhteen edetään teoreettisten perusasioiden kautta maamateriaalissa ilmenevän veden kapillaarisen käyttäytymisen yksityiskohtiin. Teemaksi nousee myös matriisi-imupaine, joka merkityksestä tehdään havaintoja liittyen esimerkiksi veden imeytymiseen ja liikkeisiin maamateriaa-

lissa. Myös kapillaarisuuden ja routimisilmiön suhdetta tarkastellaan lyhyesti. Teoreettisen osuuden päättää radan alusrakennemateriaalien kuormituskäyttäytymistä käsittelevä osio, jossa käydään läpi tärkeimmät kuormituskäyttäytymistä käsittelevät teoreettiset mallit sekä muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät. Erityishuomio kohdistetaan siihen, miten vesipitoisuus vaikuttaa muodonmuutuskäyttäytymiseen.

2. RADAN RAKENNE JA KUORMITUKSET

2.1 Radan rakennekerrokset ja alusrakennemateriaalien rakeisuusvaatimukset

Kuvassa 1 on esitetty nykyisen suunnittelukäytännön mukaiset radan rakenneosat ja niiden nimitykset. Kuormien jakamisen lisäksi jokaisella rakennekerroksella voidaan nähdä olevan omat ratapenkereen toimivuutta palvelevat tehtävänsä. Tarkastellaan seuraavaksi radan rakenneosia keskittyen erityisesti alusrakennemateriaalien vaatimuksiin.



Kuva 1. Radan rakenneosien nimitykset. [1]

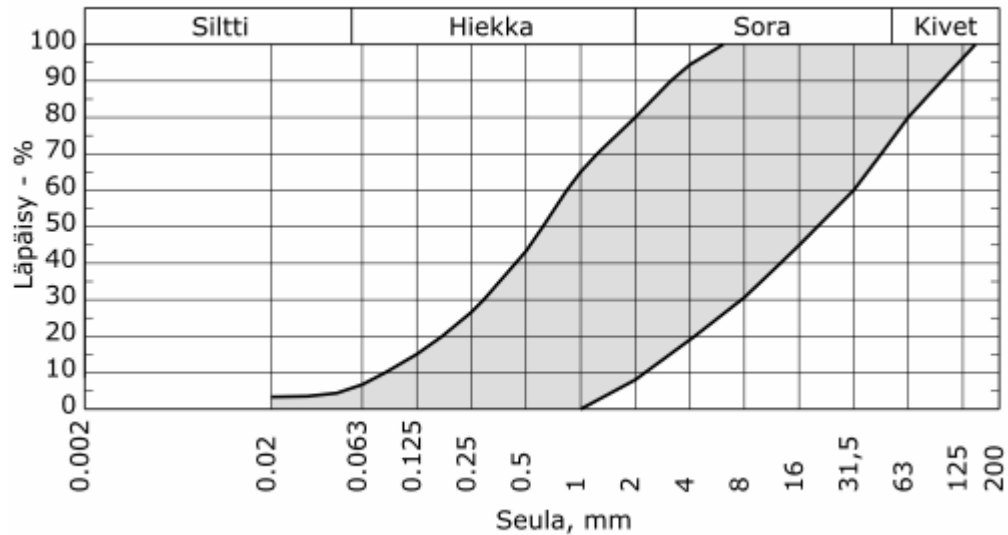
Päälysrakenne muodostuu tukikerroksesta ja raiteesta. Tukikerroksen tehtävänä on pitää raiteen geometria oikeassa asemassa, jakaa kuormia alusrakenteelle ja muodostaa raiteelle tasainen ja kantava alusta. Tukikerroksen materiaalina käytetään raidesepeäliä tai raidesoraa. Raide koostuu ratapölkystä, ratakiskosta, ratakiskojen kiinnitys- ja jatkosista sekä vaihteista ym. raiteen erikoisrakenteista. [1]

Alusrakenne muodostuu väli- ja eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevystä. Välikerroksen tehtävä on muodostaa tukikerrokselle tasainen ja kantava alusta ja estää tukikerroksen sekoittuminen alempiin rakennekerroksiin. Eristyskerroksen tehtävä on estää tai vähentää sen alla olevien maakerrosten routimista ja muodostaa välikerrokselle tasainen ja kantava alusta. Lisäksi eristyskerroksen on siirrettävä ja jaettava kuormat pohjamaalle, pysäytettävä veden kapillaarinen nousu kerroksen alaosaan ja toimittava suodatinkerroksena. [1]

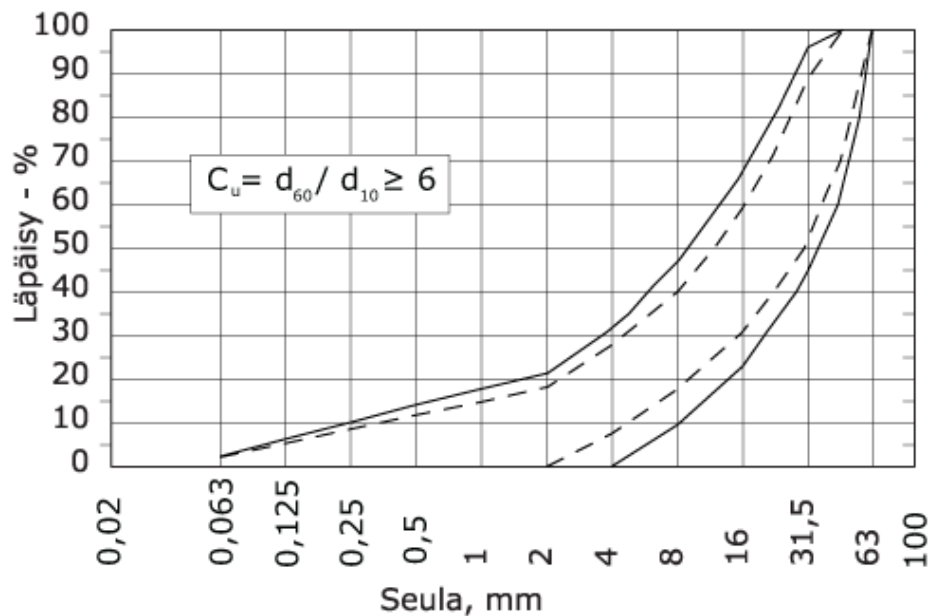
Routalevy voidaan asentaa ratapenkereeseen kahdella eri tavalla. Uutta rataa rakennettaessa se on aikaisemmin sijoitettu välikerroksen alapuolelle, missä se ei ole kontaktissa särmikkäiden raidesepeleirakeiden kanssa [2]. Nykyisin routalevyä ei kuitenkaan käytetä uusissa radoissa [3].

Asennuksen tapahtuessa vanhaan rataan aikaisemmin tapana oli sijoittaa routalevy välittömästi tukikerroksen alla sijaitsevan välikerroksen päälle [2]. Nykyään vanhojen ratojen tapauksessa suositetaan routalevyn sijoittamista välikerroksen alle, johon se on myös kuvassa 1 sijoitettu [3].

Eristys- ja välikerros voidaan rakentaa joko luonnonmateriaaleista tai kalliomurskeesta. Kalliomursketta käytettäessä materiaalin on oltava samaa sekä eristys- että välikerroksessa. Eristys- ja välikerroksissa käytettävien materiaalien nykyiset rakeisuusvaatimukset on esitetty kuvissa 2 ja 3. Rakeisuusvaatimusten lisäksi materiaalin on täytettävä infraRYL:ssä mainitut mineralogista rakennetta, lujuusteknisiä ominaisuuksia, jäätymsulamiskestävyysominaisuuksia ja vedenimeytymisominaisuuksia käsittelevät vaatimukset, joita ei tässä työssä tarkemmin käsitellä. [4]



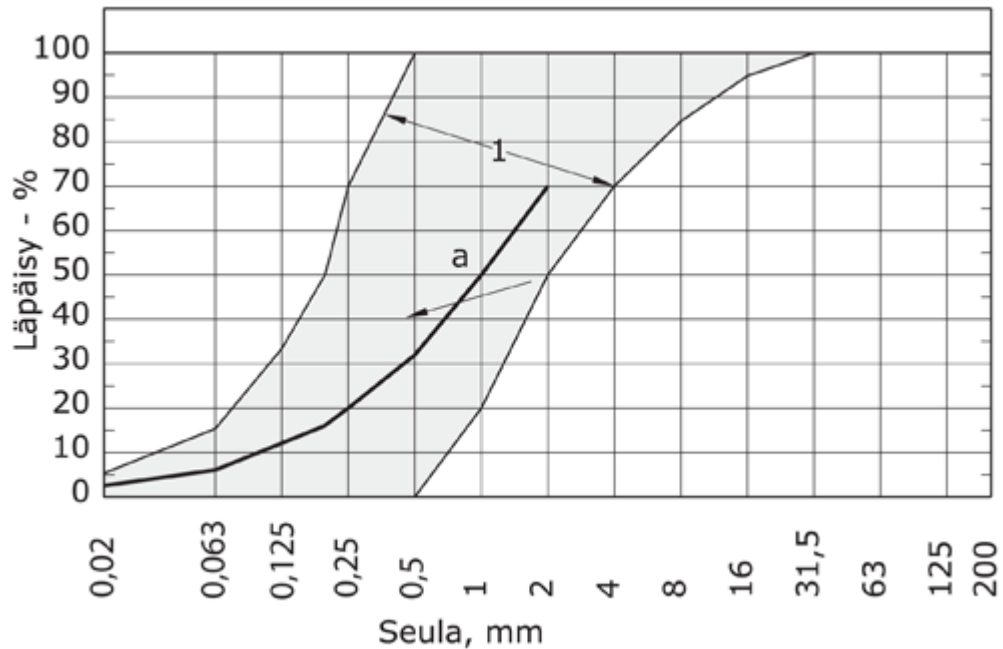
Kuva 2. Hiekasta tai sorasta rakennettavan eristys- ja välikerroksen rakeisuusohjealue. [4]



Kuva 3. Kalliomurskeesta rakennettavan eristys- ja välikerroksen rakeisuusohjealue. 90 % yksittäisten näytteiden rakeisuustuloksista on sijoitettava katkoviivojen rajaamalle alueelle ja toteutettava kuvassa esitetty rakeisuussuhdevaatiemus. [4]

Leikkauspohjalla sijaitessaan ratapenkereen alimman rakennekerroksen muodostaa suodatinkerros, jonka tehtävä on estää eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittuminen [1].

Suodatinkerros rakennetaan luonnonkiviaineksesta tai uusiomateriaalista, joiden rakeisuuden tulee olla kuvan 4 mukainen [4].



Kuva 4. Suodatinkerrososan rakeisuusohjealue. Rakeisuuskäyrän tulee normaalisti kulkea alueella 1. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksua viivaa nuolen suunnassa. [4]

Jos rata sijaitsee penkereellä, kutsutaan alusrakenteen alaista kerrosta pengertäytteeksi. Jos rata sijaitsee leikkauksessa, puuttuu pengertäyte ja alusrakenne sijoittuu suoraan leikkauksen pohjan päälle. [1]

Suomen rataverkko on pääosin varsin vanhaa. Esimerkiksi myöhemmin työssä käsiteltävä Kouvola-Kotka rata on valmistunut vuonna 1890 [5]. Tuolloiset rakennekerrosten rakeisuusvaatimukset eivät luonnollisestikaan vastaa nykyisiä. On myös oletettavaa, ettei rataa rakennettaessa olla käytetty nykyisenlaista rakennekerrosmallia.

2.2 Radan kuormitukset

Tärkein ratarakennetta kuormittava tekijä on raiteilla liikkuva kalusto. Tästä rataan kohdistuu pysty-, vaaka- ja pituussuuntaisia kuormituksia. Suomen olosuhteissa myös ilmastollisten kuormitusten merkitys on erittäin merkittävä verrattuna leudommilla alueilla sijaitseviin ratoihin. Talvisin routa tekee ratarakenteesta hyvin jäykän, jolloin päällysrakenteen komponentteihin kohdistuvat jännitykset kasvavat. Keväisin routaantunut ratarakenne alkaa sulaa ylhäältä alaspäin. Jo sulanut vesi ei pääse imeytymään alapuoliseen maahan tämän ollessa vielä jäässä. Tällöin rakenteessa voi vallita lähes täysin vedellä kyllästynyt tila. Kyseisenlaisessa sulamispehmenemisenä tunnetussa tilassa ratarakenne on kuormituskestävyyden kannalta heikoimmillaan. Alusrakenteen kerrosten sulien osien rasitustensietokyvyn laskun seurauksena myös ratarakenteen muiden komponenttien taipumat ja rasitukset kasvavat kuormituksen alaisina. [6]

Liikkuva kalusto aiheuttaa suurimman osan rataa kuormittavista pystysuuntaisista kuormituksista, mutta myös radan rakennekerrokset ja päällysrakenteen komponentit aiheuttavat staattinen kuorman pohjamaalle ja komponentin tai rakenneosan alapuolisille rakenteille. Kaluston massasta aiheutuvat kuormitukset välittyvät rataa akselikuormien

kautta. Akselikuorma ei välttämättä ole vakio vaunun kaikilla akseleille, vaan kuorma voi olla epätasaisesti jakautunut sekä vaunun pituus- että poikittaissuunnassa. [6]

Rataan kohdistuvien dynaamisten voimien voidaan nähdä syntyvän pääasiassa kahdesta lähteestä. Lyhytkestoiset dynaamiset rasitukset syntyvät erinäisistä iskevistä voimista, jotka aiheutuvat joko pyörän vioista (esim. pyörän lovisuus tai soikeus) tai raiteesta (esim. liitoskohtien notkokohtat, kulkupinnan epäjatkuvuuskohtat tai vioittuneet hitsausaumamat). Edeltävät vauriot aiheuttavat lyhyen kuormituspiikin, johon jousitus tai radan pohjarakenne eivät ehdi reagoida ja dynaamisesta kuormituksesta muodostuu paikallinen kyseisen kohdan kiskossa ja pölkkyssä. Pidemmän aallonpituuden epäsäännöllisyydet ratageometriassa saavat aikaan pidempikestoisen vasteen johon jousitus ehdi reagoida. Tällöin dynaamiset kuormitukset siirtyvät rakennekerroksille ja pohjamaalle. [7]

Kuitenkin myös jo ratapölkkyjen käyttö itsessään voimien siirtämiseen kiskoilta rakennekerroksille tuottaa dynaamisen herätevaikutuksen. Tämä johtuu kiskon alapuolisen radan jäykkyyden vaihtelusta pölkkyjaon mukaisesti. Kyseisen dynaamisen herätteen taa juus riippuu ratapölkkyjen jaosta ja junan nopeudesta. [6]

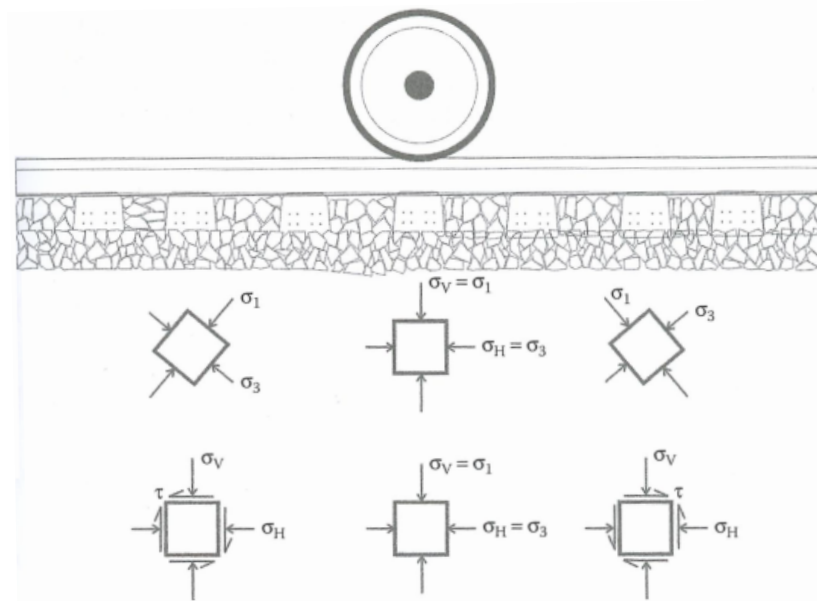
Poikkisuuntaisia voimia rataa aiheuttavat pyörän ja kiskon keskinäinen kontakti ja lähinnä kaarteissa esiintyvä pölkkyjä sivusuunnassa työntämään pyrkivä voima, joka syntyy, kun kisko lämpölaajenee ja yrittää pidentyä kiskonkiinnikkeiden kuitenkin estäessä tämän. Pyörän ja kiskon kontaktissa syntyvät poikkisuuntaiset voimat välittyvät joko kiskon yläpinnan ja pyörän kulkupinnan kontaktissa tai kiskon sisäpinnan ja pyörän laipan kontaktissa. Jälkimmäisen merkitys korostuu kaarteissa. Pyörän ja kiskon kontaktissa syntyvän sivusuuntaisen voiman suuruuteen vaikuttavat:

- junan nopeus
- raidegeometria
- kiskojen korkeusero
- hunting-ilmiönä tunnetun, junan pyöräkerran siniaallon muotoisen sivuttaisliikkeen, luonne [9]

Liikkuva kalusto ja rataa kohdistuvat lämpötilan muutoksista johtuvat voimat tuottavat rataa pituussuuntaisia rasituksia. Liikkuvan kaluston tuottamat rasitukset ovat lähtöisin kiihdytys- ja jarruvoimista. Lämpötilan muutokset tuottavat kiskoihin veto- ja puristusjännityksiä. [6]

Tapaan, jolla radan kuormitukset välittyvät syvemmälle ratarakenteessa, vaikuttavat voimakkaasti radan alusrakenteen jäykkyys ja lujuusominaisuudet. Näiden ominaisuuksien ollessa tarpeeksi hyvät eivät kuormitukset aiheuta radan rakennekerrosten murtumista tai saa niissä aikaan liiallisia muodonmuutoksia. [7]

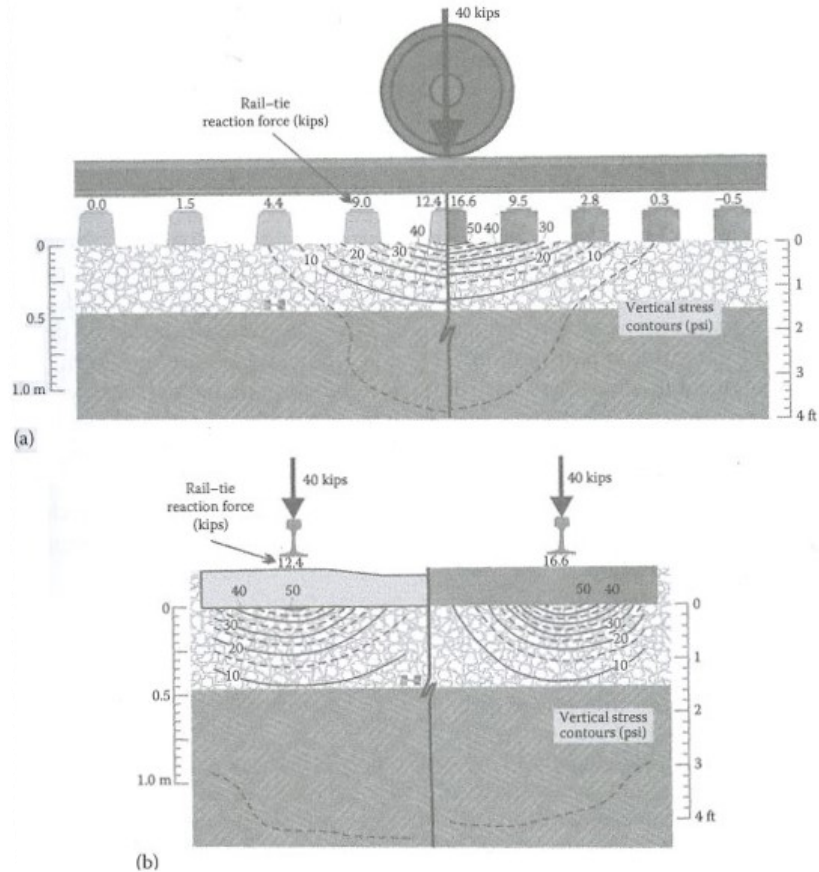
Kuvassa 5 on esitetty radan tukikerroksen alaisten kerrosten jännitystila suhteessa pyöräkuorman sijaintiin. Jännityselementin pääjännitysten suunnat ilmaisevat elementin asennon, jossa leikkausjännitykset katoavat. Pääjännitykset ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Suurempi pääjännitys ilmaistaan symbolilla σ_1 ja pienempi symbolilla σ_3 . Kuvan 5 alemmat elementit kuvaavat leikkausjännitysten muodostumista. Suoraan pyöräkuorman alla pääjännitykset ovat pystysuunnassa (σ_1) ja vaakasuunnassa (σ_3). Pyöräkuorman etu- ja takapuolella jännityselementin pääjännitykset ovat kuitenkin kääntyneet kuvan mukaisesti. [7]



Kuva 5. Jännitykset radan rakennekerroksissa. [7]

Kun pyörä etenee, kääntyvät pääjännitysten suunnat tietyssä kohdassa rataa sen mukaisesti, missä asemassa pyörä on suhteessa juuri siihen kohtaan. Tällainen pääjännityssuuntien kiertyminen voi vaikuttaa esimerkiksi radan rakennemateriaalien toimintaan ja kuormituskestävyyteen.

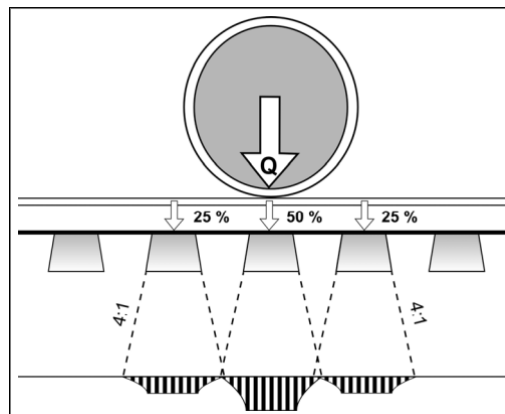
Kuvassa 6 a on esitetty, kuinka 40 kip suuruinen (~18 t) staattinen pyöräkuorma jakautuu ratapölkkyihin ja rakennekerrokseen radan pituussuunnassa sekä puu- että betonipölkkyjen tapauksessa. Kyseessä on Geotrack-ohjelmalla toteutettu simulointi, jossa 46 cm paksun tukikerroksen moduuliarvo on 60 000 psi (~414 MPa) ja tämän alla sijaitsevan maakerroksen moduuliarvo on 8 000 psi (~55 MPa). Betonipölkkyillä 31 % (12,4 kip) kuormasta välittyy tukikerrokselle pyörän kohdalla sijaitsevan pölkyn kautta. Puupölkkyjen tapauksessa kyseinen luku on 42 % (16,6 kip). Betonipölkkyjen tapauksessa kuorma jakautuu pyörästä nähden neljännelle pölkylle asti, siinä missä puupölkkyt levittävät kuormaa käytännössä vain kolmannen pölkyn etäisyydelle. Jännitystasoja rakennekerroksissa esittävästä käyristä huomataan jännitystason olevan suoraan pyörän kohdalla jokseenkin merkittävä vielä hieman yli metrin syvyydellä. [7]



Kuva 6. Geotrack-ohjelmalla toteutettu mallinnusesimerkki staattisen pyöräkuorman välittämisestä radassa betonipölkkyjä (vasen) ja puupölkkyjä (oikea) käytettäessä. [7]

Kuvassa 6 b on esitetty kuorman jakautuminen radan poikkileikkauksessa. Jännitysjauman voidaan nähdä olevan betonipölkkyllä tasaisempi kuin puupölkkyllä. Betonipölkky luo myös korkeamman jännityksen pölkyn päähän verrattuna puupölkkyyn. [7]

Suomessa ratojen suunnittelussa käytettävän RATO 3:n mukaan pystysuoran junakuorman voidaan ajatella jakautuvan ratapenkereeseen kolmen pölkyn kautta (kuva 7), ellei jakaumaa olla tapauskohtaisesti tarkemmin selvitetty. Tukikerroksessa kuorman voidaan olettaa jakautuvan 4:1 kaltevuudessa ja muissa maakerroksissa 2:1 kaltevuudessa. [1]

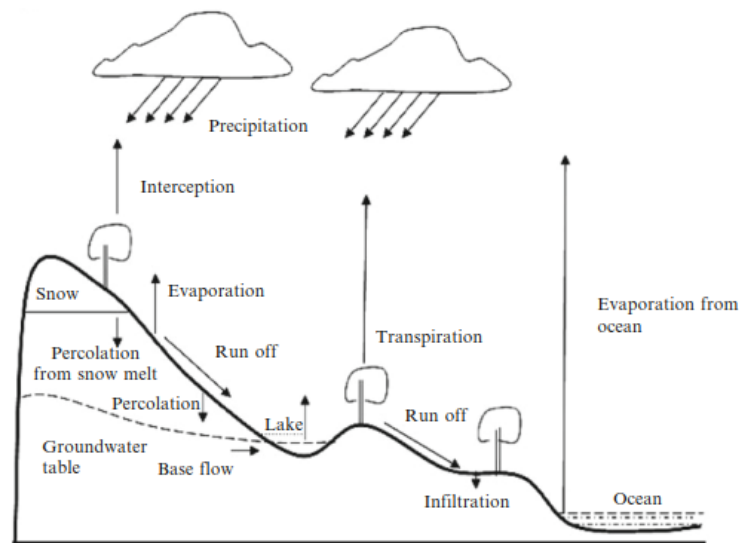


Kuva 7. RATO 3:n mukainen oletus pystysuoran junakuorman jakautumisesta ratapölkkyistä tukikerrokseen. Ratapölkyn pituussuussa kuormituksen ajatellaan kohdistuvan molemmilla päissä hieman yli kolmasosalle pölkyn pituudesta. [1]

3. VESI MAAPERÄSSÄ JA MAARAKENTEISSA

3.1 Veden kiertokulku ja maassa vallitsevat vesivyöhykkeet

Kuvassa 8 on esitetty veden kiertokulku pääpiirteittäin. Suurin osa vedestä haihtuu valtameristä ja liikkuu ilmvirtausten mukana mantereiden ylle. Ilman jäähtyessä se tiivistyy ja sataa maahan. Osa vedestä valuu pintavesivirtauksena suoraan takaisin mereen, osa haihtuu uudelleen ilmaan ja osa painuu maan sisään muuttuen osin pohjavedeksi, joka purkautuu vesialtaisiin. [10]

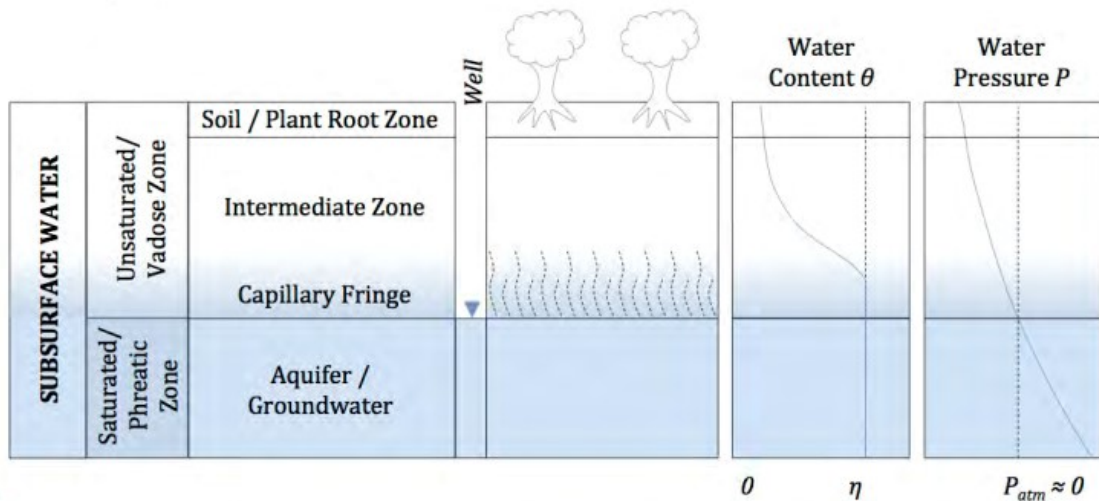


Kuva 8. Veden kiertokulku. [11]

Suomen vuotuinen sademäärä on noin 600 mm. Tästä haihtuu noin puolet. Keskimäärin 20 % sadannasta päätyy pohjavedeksi, joka sijaitsee yleisimmin 2-4 metrin syvyydessä. Kuitenkin esimerkiksi harjualueilla pohjavesi voi sijaita useiden kymmenien metrien syvyydessä. Pohjaveden pinnan korkeus vaihtelee voimakkaasti vuodenaikasta ja sademäärästä riippuen. [10]

Pintavedellä tarkoitetaan sade- ja lumensulamisvesiä niiden virratessa maanpinnalla. Rakennetulla alueilla kyseisenlainen vesi tunnetaan hulevetenä. Maaperässä alaspäin pohjaveden yläpuolella laskeutuvaa vettä nimitetään vajovedeksi. Pohjavedellä tarkoitetaan vettä, joka sijaitsee maan sisässä täysin kyllästyneessä vyöhykkeessä, jossa kaikki rakeiden väliset huokokset ovat täysin veden kyllästävät [7]. Vajovesien lisäksi maata pohjavedenpinnan yläpuolella kostuttaa pohjavedestä kapillaarisesti nouseva vesi. [10]

Maa voidaan yleisesti ottaen jakaa pystysuunnassa neljään vyöhykkeeseen kyllästysasteen, vedenpaineen, veden liikkuvuuden ja veden sitoutumistavan mukaan. Vyöhykkeet on esitetty kuvassa 9. [12]



Kuva 9. Maaperän vesivyöhykkeet sekä niissä vallitsevat vesipitoisuudet ja vedenpaineet. [13]

Juurivyöhyke (eng. soil/plant root zone) ulottuu maanpinnasta kasvillisuuden pääjuuriston syvyyteen saakka. Vettä imeytyy tähän vyöhykkeeseen sadannan ja mahdollisen kastelun kautta sekä pintavesien tulvien aikana. Tällöin vesi virtaa alaspäin ja pintakerrokset saattavat olla ainakin lyhytaikaisesti veden kyllästämiä. Ilman lämpötila, kosteus ja routa vaikuttavat juurivyöhykkeeseen. Haihdunta ja kasvien transpiraatio saavat veden liikkumaan juurivyöhykkeessä myös ylöspäin. [12]

Väliwyöhyke (eng. intermediate zone) ulottuu juurivyöhykkeen alareunasta kapillaarivyöhykkeeseen. Väliwyöhykkeen paksuus vaihtelee voimakkaasti. Suurimmillaan se voi olla useita kymmeniä metrejä mutta toisaalta se voi joskus puuttua kokonaankin, mikäli pohjavedenpinta nousee juurivyöhykkeeseen asti. [12]

Kapillaarivyöhyke (eng. capillary fringe) ulottuu pohjavedenpinnasta kapillaarisen nousun verran ylöspäin. Sen vahvuus riippuu maalajin ominaisuuksista ja huokosten kokojen tasaisuudesta. Karkeissa maalajeissa kapillaarikerroksen paksuus voi olla hyvin pieni mutta esimerkiksi savessa kyseisen kerroksen paksuus voi olla jopa yli 10 metriä. Kapillaarikerroksen alaosaan kaikki huokokset ovat veden täyttämiä. Siirryttäessä ylöspäin pienenee vesipitoisuus kapillaarisen nousun tapahtuessa vain pienimmässä huokosissa. Kapillaarivyöhykkeessä vedenpaine on ilmakehän painetta pienempi. [12]

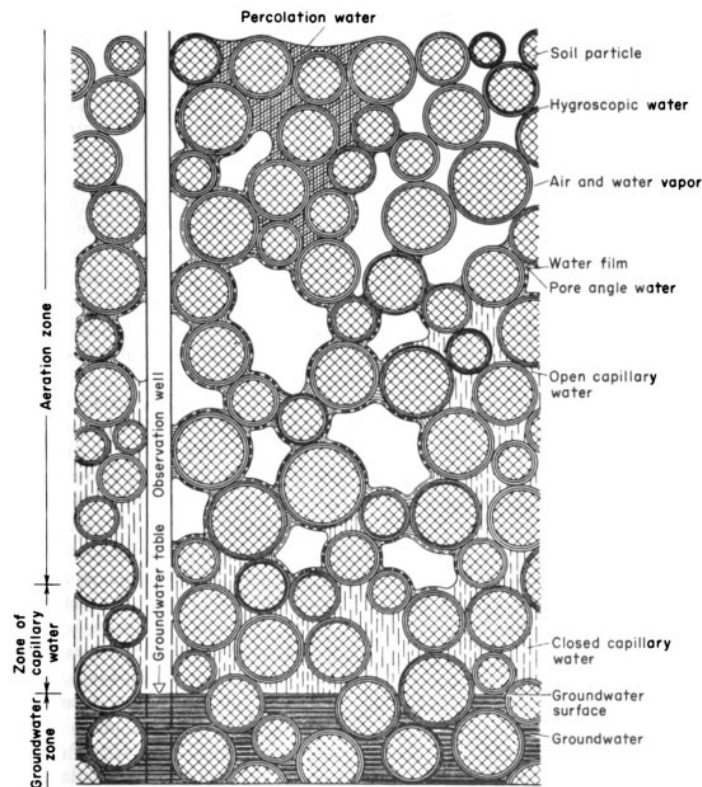
Juuri-, väli- ja kapillaarivyöhykkeet muodostavat yhdessä maavesi- eli kyllästäättömän vyöhykkeen (eng. unsaturated/vadose zone). Tässä vyöhykkeessä veden virtaus kaikkiin suuntiin on mahdollista. Kyseisen vyöhykkeen alla sijaitsee pohjavesivyöhyke (eng. aquifer/groundwater), joka päättyy alhaalla vettä läpäisemättömään kerrokseen. Vesi virtaa tässä vyöhykkeessä likipitään vaakasuoraan ja pohjavedenpinnan suuntaisesti. Pohjavesivyöhykkeen (eng. saturated/phreatic zone) voidaan otaksua olevan täysin veden kyllästämiä. [12]

Yleisen käsityksen mukaan myös kapillaarivyöhykkeen alaosaan muodostuu täysin kyllästynyt kapillaarisesti nousevan veden täyttämä vyöhyke. Joissain lähteissä [14] käsiteltäessä osittain kyllästyneen maan ominaisuuksista ja käyttäytymisestä osittain kyllästynyt maa määritellään sellaisena maamateriaalina, jossa vallitsee negatiivinen huokosvedenpaine. Tällöin vaikka kapillaarivyöhykkeen alapintaan syntyisi vyöhyke, jossa kaikki huokokset olisivat täysin kapillaarisesti nousseen veden täyttämät, käsiteltäisiin tätä osittain kyllästyneenä.

3.2 Vesi maamateriaalissa

3.2.1 Maaveden jaottelu sitoutumismuotojen mukaisesti

Maassa olevaa vettä voidaan jaotella erilaisten sitoutumismuotojen mukaisesti. Tällöin tietyllä tavalla maa-ainekseen sitoutuneen veden ajatellaan omaavan kyseisestä sitoutumistavasta aiheutuvat tietynlaiset ominaisuudet. Kirjallisuudesta on löydettävissä useita hieman toisistaan poikkeavia malleja veden erilaisista sitoutumistavoista ja tietynlaisella tavalla sitoutunutta vettä kuvaavilla termeillä saatetaan tarkoittaa eri lähteissä hieman eri asioita. Veden sitoutumistavoista on laajasti kirjoittanut esimerkiksi Jumikis [15], jonka mallia havainnollistava kuva on esitetty alla. Jumikisken malli mukailee ainakin sitoutumistyyppien lajittelun osalta Zunkerin [16] mallia. Tarkastellaan seuraavaksi erilaisilla sitoutumistavoilla sitoutuneita vesikerroksia käyttäen tarkastelun runkona Jumikisken näkemystä kuitenkin siten, että myös muiden tutkijoiden malleista tehdään huomioita.



Kuva 10. A. R. Jumikisken mallin mukaiset veden esiintymismuodot maassa. Alkuperäislähteestä [16] muokattu versio [15].

Adsorptiovesi kuvastaa voimakkaasti maa-ainesrakeisiin kiinnittynyttä vettä. Jumikisken mukaan adsorptiovedellä tarkoitetaan sekä hygroskooppista vettä että kalvovettä (eng. film moisture). [15]

Silmämääräisesti tarkasteltuna kuivaltakin vaikuttavan maa-aineksen rakeita peittää ohut hygroskooppinen vesikerros (eng. adsorbed moisture, contact moisture, surface-bound moisture), joka muodostuu rakeiden pinnalle suoraan ilmasta. Kyseinen vesi sitoutuu rakeiden pinnalle adheesiovaikutuksesta. Jos uunikuivan näytteen annetaan vapaasti imeä kosteutta ilmasta, saavuttaa vesipitoisuus lopulta vakio arvon, joka kuvas-

taa hygroskooppisen veden maksimiarvoa kyseisissä olosuhteissa. Kyseinen maksimiarvo riippuu maamateriaalin ominaisuuksien lisäksi ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. [15]

Jumikisken mukaan hygroskooppinen vesi ei ole yhteydessä pohjaveden kanssa ja näin ollen pohjavedenpinnan vaihtelu ei vaikuta hygroskooppiseen veteen. Myöskään hydrostaattinen paine ei välity hygroskooppisen veden kautta. Jumikisken näkemys hygroskooppisen vesikerroksen paksuudesta on ristiriitainen. Vaikka Jumikis ilmaisee, ettei ole tietoa siitä, koostuuko kyseinen vesikerros yhdestä vai useammasta molekyylikerroksesta, esitetään teoksen myöhemmissä kappaleissa arvioita kerroksen paksuudesta olettaen sen koostuvan useista molekyylikerroksista. Lisäksi Jumikis kuvaa hygroskooppisen veden kiinnittyvän sitä lujemmin, mitä lähempänä se on partikkelin pintaa, mikä viittaa useita molekyylikerroksia sisältävään hygroskooppisen veden käsitteeseen. Hygroskooppinen vesi kiinnittyy partikkeleihin voimalla, joka vastaa jopa 10 000 kertaista ilmakehän painetta. Johtuen suuresta voimasta, jolla hygroskooppinen vesi kiinnittyy rakeiden pintaan, on kyseisessä vesikalvossa sijaitseva veden tiheys tavallista suurempi. [15]

Maan vetovoima tai kapillaarivoimat eivät liikuta hygroskooppista vettä. Se ei myöskään voi haihtua normaaleissa olosuhteissa. Kuitenkin maa-aineksen kuivaaminen 105 °C uunissa poistaa hygroskooppisen veden. Karkearakeisissa maalajeissa hygroskooppisen veden määrä jää pieneksi johtuen rakeiden pienestä kokonaispinta-alasta suhteessa niiden massaan. Mitä hienorakeisemmasta materiaalista on kysymys, sitä suurempi hygroskooppisen veden määrä on. Likimääräiset maksimaaliset hygroskooppisen veden määrät muutamille maalajeille suhteessa niiden kuivapainoon on esitetty taulukossa 1. Olosuhteita, joissa kyseiset likiarvot voidaan saavuttaa, ei ole lähteessä tarkemmin määritetty. [15]

Taulukko 1. *Likimääräiset hygroskooppisen veden maksimimäärät eri maalajeissa. [15]*

Materiaali	Likimääräinen hygroskooppisen veden maksimaalinen määrä (%)
hiekkä	1
siltti	7
savi	17

Hygroskooppisen vesikalvon paksuus voi muuttua seuraavien tekijöiden vaikutuksesta:

- elektrolyytti
- lämpötilan muutos
- ilmankosteuden muutos
- huokosveden paineen muutos
- maapartikkelien mekaanisen paineen muutos. [15]

Hygroskooppisen veden suurempi tiheys nostaa sen kiehumispisteen, viskositeetin ja pintajännityksen normaalia korkeammaksi. Hygroskooppisen veden lämpökapasiteetti on noin 0,9 ja suhteellinen permittiivisyys noin 2,2. Jumiskiksen mukaan hygroskooppinen vesi ei normaaleissa olosuhteissa jäädy mutta paksuuntuessaan se saavuttaa jäätympisteen -78 °C:ssa. Tämä on mahdollisesti tulkittavissa siten, että useampimole-

kyylikerroksisen hygroskooppisen vesikalvon uloimmat vesimolekyylit eivät ole sitoutuneet yhtä suurella voimalla kuin sisimmäiset molekyylit ja tämän seurauksena uloimmat molekyylikerrokset jäätyvät helpommin kuin sisemmät. [15]

Kalvovesi (eng. film moisture) muodostuu rakeiden pinnalle vesihöyryn kondensaation tai vapaan veden poistamisen jälkeen. Kyseinen vesikalvo kiinnittyy hygroskooppisen vesikalvon päälle. Kalvovesi on yhteydessä pohjavedenpintaan, mutta ei ole liikuteltevissa painovoiman vaikutuksesta. Kalvovesi ei välitä ulkoista hydrostaattista painetta. Kyseisen veden liikkeet ovat hyvin hitaita ja sen jäätympiste on alle 0 °C riippuen sen muodostaman vesikalvon paksuudesta, siihen kohdistuvasta kuormitustilasta ja jäätymissen ajallisesta kestosta. [15]

Mitä suurempi maa-ainesrakeiden kokonaispinta-ala on suhteessa massaansa, sitä enemmän kalvovettä kyseinen maa-aines pystyy sitomaan. Maa-ainespartikkelien pinnalle mahdollisesti kiinnittyneet rauta-, alumiini- ja silikakolloidit vaikuttavat muodostuvan kalvon paksuuteen. [15]

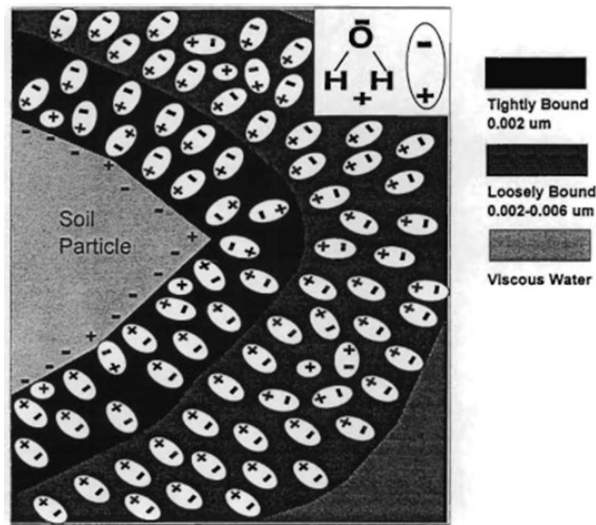
Jumiskiksen mallista jonkin verran eroavan näkemyksen rakeita ympäröivästä vedestä esittää Rétháti, joka perustaa käsityksensä Zunkerin [17] ja Roden [18] tutkimuksiin. Rétháti näkee hygroskooppisen veden pitävän sisällään sekä adsorptioveden että tätä kevyemmin sitoutuneen, polaaristen-, elektrostaattisten- ja ioniperustaisten voimien vaikutuksesta paikallaan pysyvän veden (eng. solvate). Adsorptioveden paksuudeksi rakeen pinnalla Rethat ilmoittaa 1-10 molekyylikerrosta ja ulomman, kevyemmin sitoutuneen vesikerroksen paksuudeksi alle 200 molekyylikerrosta. Selkeää rajaa kyseisten kerrosten välille on Rethatin mukaan vaikea asettaa. [19]

Rakeiden ympärille voimakkaasti kiinnittyneen veden on maininnut myös Jääskeläinen [10], joka viittaa rakeiden pinnoille kemiallisten varausten ja vedessä olevien ionien välityksellä kiinnittyvään veteen termillä vaippavesi. Kyseisen vesikerroksen paksuudeksi ilmoitetaan alle 50 ångströmiä ($< 5 \cdot 10^{-6}$ mm). Jos yhden molekyylikerroksen paksuutena käytetään vesimolekyylin likimääräistä läpimittaa 2.8 Å [20] ja tarkemmat veden sisäiset sitoutumistaparakastelut jätetään tekemättä, voidaan vaippaveden nähdä muodostuvan noin 18 molekyylikerroksen paksuisen kalvon, mikä ei paksuutensa puolesta sovi kuvaamaan tarkasti kumpaakaan Rethatin esittämistä vesikerroksista. [10]

Suomalaisesta kirjallisuudesta on löydettävissä myös Airaksisen, eräiden muiden lähteiden pohjalta muodostama, lyhyt näkemys aihepiiriin liittyen. Airaksinen esittää hygroskooppisen veden sitoutuvan suoraan ilmasta ja olevan elektrostaattisten voimien ansiosta erittäin tiukasti kiinnittyntä. Hygroskooppisen veden määrän kerrotaan riippuvan ilman kosteudesta, raekoostumuksesta ja erityisesti kolloidiaineksen määrästä. Airaksinen kuvaa adsorptioveden ja vaippaveden ilmentävän samaa adsorptio- ja kapillaarivoimien maarakeiden pintaan ohuiksi kalvoiksi sitomaa vettä. Adsorptioveden määrän ja kalvon vahvuuden kerrotaan olevan sitä suurempi mitä hienorakeisempaa kyseinen maalaji on. [12]

Saarenketo ja Scullion esittävät käsityksensä maapartikkelia ympäröivästä vedestä koostaen vesimolekyylien suuntautumista. Saarenketo ja Scullion esittävät rakeita ympäröivän sidotun veden koostuvan kahden tyyppisestä adsorptiovedestä ja viskoosisesta vedestä (kuva 11). Sisemmässä adsorptiovesikerroksessa vesimolekyylit ovat suuntautuneet siten, että niiden positiiviset päät osoittavat kohti pääsääntöisesti negatiivisesti varautunutta kivirakeen pintaa. Tämän kerroksen mainitaan omaavan korkean tiheyden ja olevan tiukasti kiinnittyntä. Alemman adsorptiovesikerroksen päällä sijaitsee kevyemmin sitoutunut adsorptiovesikerros, jossa vesimolekyylien kiinnitysvoima on sitä heikompi, mitä kauempana ne ovat rakeen pinnasta. Adsorptiovesikerrosten päällä sijaitsee

viskoosinen vesikerros, jota tekijät nimittävät myös kapillaarivesikerrokseksi. Tämän vesikerroksen kerrotaan eroavan adsorptiovedestä siten, että se ei kykene adsorboimaan vettä ilmasta sekä siten että haihdunta voi vähentää sen määrää lämpimän ja kuivan kauden aikana. [21]



Kuva 11. Adsorptioveden rakenne Saarenkedon ja Scullionin mukaan. [21]

Gravitaatiovesi voidaan Jumikisen mukaan jakaa vapaaseen veteen ja kapillaariseen veteen. Vapaa vesi voidaan edelleen jakaa vapaaseen pintaveteen ja pohjaveteen. [15]

Jumikis kuvailee gravitaatiovettä maamateriaalin vedenpidätyskyvyn ylittävänä vetenä ja väittää sen olevan poistettavissa maasta painovoimaisesti [15]. Kun otetaan huomioon, että Jumikis lukee kapillaarisen veden lukeutuvan mukaan gravitaatioveteen, väite voidaan nähdä ristiriitaisena.

Vapaan veden ominaisuudet kuvaavat normaalisti veteen liitettäviä ominaisuuksia parhaiten. Se liikkuu alati painovoiman ja hydrostaattisen paineen ohjaamana. [15]

Kapillaarivesi on rakeiden välisissä huokosissa ja rakeiden kontaktikohdissa sijaitsevaa vettä, jonka liikkeet ovat kapillaarivoimien määrittämiä. Jumikis kuvaa kapillaariveden nousevan maan huokosverkostossa veden haihtuessa kapillaarivesipatsaiden yläpäästä ja kapillaariveden olevan yhteydessä pohjaveteen tai orsiveteen. Kapillaarisesti nouseva vesi pyrkii liikkumaan maassa joka suuntaan. [15]

Kapillaariveden jäätymispisteeksi mainitaan $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jumikis mainitsee kapillaariveteen kuuluvan myös huokoskulmavetenä (eng. pore corner moisture, neck moisture) tunnetun maarakeiden kontaktikohtiin jäävän veden. [15] Siinä missä Jumikis käsittää kapillaariveden ja vapaan veden gravitaatioveden alamuodoiksi, näkee Rétháti kapillaariveden olevan usein luettavissa vapaaseen veteen. Rétháti jakaa kapillaariveden pohjavedenpintaan yhteydessä olevaan veteen ja pohjavedestä hydraulisesti erillään olevaan veteen. Jälkimmäisen Rétháti lajittelee vielä alakategorioihin. [19]

Maa-aineksen mineraalipartikkelin sisällä on kemiallisesti sitoutunutta vettä, joka voi vapautua ainoastaan kemiallisten prosessien kautta. Kyseinen vesi ei vaikuta maan fyysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin. [15]

Erityisesti rakeiden pinnassa olevien vesikerrosten osalta maaveden luokittelu sitoutumistapojen perusteella on epäselvää. Kirjallisuudessa saatetaan käyttää samaa termiä

kuvaamaan hieman eri asiaa. Kuitenkin kyseisen luokittelun yhteydessä useissa lähteissä [15,19] on mainittu jaottelun olevan ainakin joiltain osin tulkinnanvaraista. Kyseisenlainen sitoutumistapaan perustuva luokittelu antaa kuitenkin ymmärryksen siitä, että kaikki maassa oleva vesi ei käyttäydy samalla tavalla vaan erilaiset sitoutumistavat johtavat erilaisiin ominaisuuksiin.

3.2.2 Maaveden potentiaalimalli

Maaveden tarkastelu vain eri sitoutumismuotojen kautta johtaa osin puutteelliseen ymmärrykseen veteen vaikuttavista voimista ja sitä kautta veden liikkumisesta. Todellisuudessa veteen vaikuttavat voimat eivät ole niin selvärajaisia kuin sitoutumismuototarkastelu antaa olettaa. On helppo ymmärtää, että esimerkiksi painovoima vaikuttaa kaikkeen veteen maaperässä riippumatta siitä, minkä tyyppiseksi sen sitoutumistapa maa-ainekseen luokitellaan. Tarkempi tapa tarkastella maaveteen vaikuttavia voimia on maaveden potentiaalimalli. [22]

Veden liike maassa on niin hidasta, ettei sen kineettistä energiaa ole tarvetta tarkastella. Maaveden potentiaalienergia määrittää sen liikkeen maassa. Maaveden potentiaalienergioiden ero kahden pisteen välillä saa veden virtaamaan kohti pienempää energiatilaa. Tuntemalla veden suhteellinen energiatila eri kohdissa maan sisässä, voidaan ymmärtää veteen vaikuttavia voimia ja määrittää, kuinka kaukana vesi on tasapainotilastaan. Vesi pyrkii saavuttamaan tasaisen potentiaalienergiatilan koko tarkasteltavassa systeemissä. [22]

Tarkasteltaessa veden potentiaalienergiaa, on määritettävä vertailutaso, johon veden suhteellista potentiaalienergiatilaa verrataan. Vertailutasona käytetään yleensä vapaan veden pintaa. Maaveden potentiaalienergia ei ole luonteeltaan absoluuttinen vertailutason ollessa vapaasti valittavissa. [22]

Potentiaalienergia voidaan ilmaista usealla tavalla. Potentiaalienergia voidaan suhteuttaa massaan tai tilavuuteen. Lisäksi se voidaan ilmaista vesipatsaan korkeutena. [22]

Maaveden kokonaispotentiaalın voidaan nähdä muodostuvan useista osapotentiaaleista. Kirjallisuudesta on löydettävissä useita tulkintoja kokonaispotentiaalın muodostavista tekijöistä. Hillel kuvaa kokonaispotentiaalın muodostuvan kaavan 1 mukaisista osapotentiaaleista. Kaava sisältää yleisesti oleellisimpina pidetyt osapotentiaalit, mutta myös muita on löydettävissä, mikä on ilmaistu kaavan oikean puolen kolmella pisteellä. [22]

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_o + \dots, \quad (1)$$

jossa

ϕ_t on kokonaispotentiaali

ϕ_g on gravitaatiopotentiaali

ϕ_p on painepotentiaali

ϕ_o on osmoottinen potentiaali

Nostettaessa kappaletta maan vetovoimakentässä, on siihen tehtävä työtä, joka varastoituu potentiaalienergiana. Veden gravitaatiopotentiaali määritellään sen sijaintikorkeuden mukaan suhteessa mielivaltaisesti valittuun nollassoon, joka yleensä valitaan siten

että gravitaatiopotentiaalista ei muodostu negatiivista. Gravitaatiopotentiaali massan suhteen voidaan ilmaista kaavalla 2. [22]

$$E_g = Mgz = \rho_w Vgz, \quad (2)$$

jossa

E_g on gravitaatiopotentiaalienergia

M on veden massa

g on putoamiskiihtyvyys

z on korkeus suhteessa nolatasoon

ρ_w on veden tiheys

V on veden tilavuus

Gravitaatiopotentiaalienergia tilavuuden suhteen (ϕ_g) voidaan ilmaista kaavalla 3. [22]

$$\phi_g = \rho_w gz \quad (3)$$

Painepotentiaali voi olla joko positiivista tai negatiivista. Vapaan vedenpinnan alla sijaitsevassa vedessä vallitsee positiivinen painepotentiaali (eng. submergence potential). Tällöin tietyllä syvyydellä vallitseva paine P voidaan ilmaista kaavalla 4. [22]

$$P = \rho_w gh, \quad (4)$$

jossa

h on syvyys suhteessa vapaan veden pintaan (eng. piezometric head).

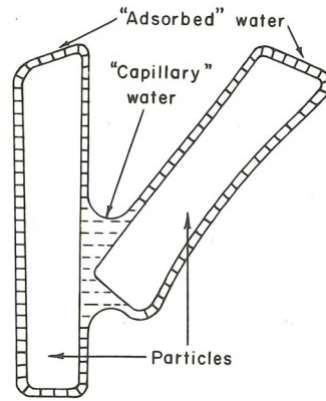
Tällöin veden potentiaalienergia voidaan ilmaista kaavan 5 kautta.

$$E = PdV \quad (5)$$

Positiivinen painepotentiaali tilavuusyksikköä kohden voidaan ilmaista kaavan 6 mukaisesti. [22]

$$\phi_{ps} = P \quad (6)$$

Negatiivinen painepotentiaali (eng. capillary potential, matric potential) eli matriisipotentiaali aiheutuu kapillaari- ja adsorptiovoimista. Kyseiset voimat sitovat vettä maahan ja laskevat sen potentiaalienergiaa. Kapillaarivoimat nostavat vettä maan huokosverkostossa ja pidättävät vettä rakeiden välissä. Adsorptio sitoo vettä rakeiden pinnalle ohuiksi kalvoiksi. Hienorakeisessa maa-aineksessa kummankin tyyppisten voimien alaisena olevan veden merkitys on huomattava. Hiekoissa lähinnä kapillaarivoimilla on merkitystä. Kapillaarivoimien alainen vesi on sisäisessä tasapainotilassa adsorptiovesikalvojen kanssa ja täten kyseisiä sitoutumismekanismia ei voi helposti erottaa toisistaan. Kuvassa 12 on esitetty matriisipotentiaalın muodostavat veden sitoutumismekanismit. [22]



Kuva 12. Kapillaari- ja absorptiovoimat sitovat vettä maahan ja muodostavat matriisipotentialin. [22]

Positiivinen painepotentiaali esiintyy vapaan vedenpinnan alapuolella ja negatiivinen painepotentiaali vapaan vedenpinnan yläpuolelle kapillaarisesti nousseessa vedessä. Vesi ei voi olla samaan aikaan sekä positiivisen että negatiivisen painepotentiaalissa. Painepotentiaaliin voidaan nähdä kuuluvaksi myös ilman paineen muutoksista syntyvä pneumaattinen potentiaali. Ilmanpaineen pysyessä lähes stabiilina, voidaan tämä osapotentiaali jättää usein kuitenkin tarkastelun ulkopuolelle. [22]

Osmoottinen potentiaali (eng. osmotic potential, solute potential [23]) aiheutuu veteen liuenneista aineista, jotka muuttavat sen termodynaamisia ominaisuuksia ja alentavat sen potentiaalienergiaa. Osmoottisella potentiaalilla on merkitystä lähinnä, mikäli asetelmaan liittyy puoliläpäisevä kalvo, jonka läpi veden virtaus tapahtuu. [22]

Jury ja Horton kuvaavat potentiaalimallia tavalla, jossa potentiaalien jaottelu mukailee ISSS:n (=International Soil Science Society) terminologiakomitean suosituksia. Kyseisessä lähteessä potentiaalien kuvaamiseen käytetyt symbolit eroavat aikaisemmin esitetystä Hillelin mallista, joten ne esitetään osapotentiaalien määrittelyn yhteydessä. W. Jury ja R. Horton kuvaavat kaikkien muiden kuin gravitaatio (Ψ_z) ja osmoottisen (Ψ_s) potentiaalien kuuluvan tensiometriseen painepotentiaaliin (eng. tensiometer pressure potential, Ψ_{tp}). Kyseinen potentiaali pitää sisällään Hillelinkin mainitseman matriisipotentialin (Ψ_m) ja ilmanpainepotentiaaliksi (Ψ_a) sekä hydrostaattisesta paineesta aiheutuvan potentiaaliksi (Ψ_p). Lisäksi tensiometripotentialiin luetaan vedessä ilman keskinäistä kontaktia olevien kiintoainepartikkelien vedelle tuomasta lisäkuormasta aiheutuva potentiaali (eng. overburden pressure potential, Ψ_b), sekä kosteuspotentiaaliksi nimitetty osapotentiaali (eng. wetness potential, Ψ_w), jonka kuvataan edustavan matriisipotentialin arvoa ilmanpaineen ja vedessä ilman keskinäistä kontaktia olevien kiintoainepartikkelien vedelle tuoman lisäkuorman ollessa nolla. [23]

Taulukossa 2 on esitetty maaveden kokonaispotentialin muodostavat osapotentiaalit erityyppisille maalajeille sekä osittain että täysin kyllästyneessä tilanteessa Juryn ja Hortonin mallin mukaisella jaottelulla. Taulukossa esiintyvällä paisuvalla maalla (eng. swelling soil) tarkoitetaan tyypillisesti vettä absorboivia savimineraaleja sisältäviä maalajeja, joiden tilavuus kasvaa vesipitoisuuden lisääntyessä [24].

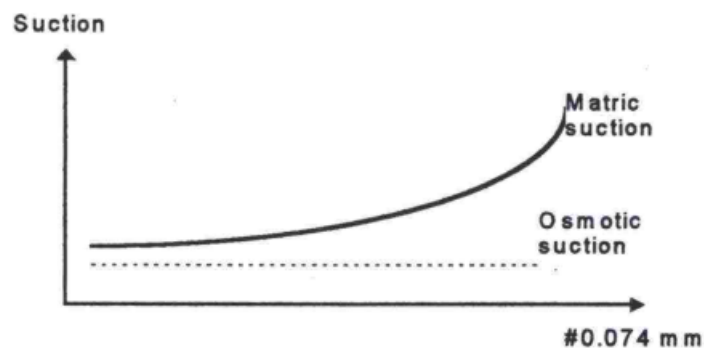
Taulukko 2. Kokonaispotentiaalain muodostavat osapotentiaalit eri tilanteissa W. Juryn ja R. Hortonin mallin mukaan. [23]

Application	Components
Unsaturated swelling soil	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_{ip}$
	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_a + \psi_m$
	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_a + \psi_b + \psi_w$
Unsaturated rigid soil	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_{ip}$
	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_a + \psi_m$
Saturated swelling soil	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_{ip}$
	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_p + \psi_b$
Saturated rigid soil	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_{ip}$
	$\psi_T = \psi_z + \psi_s + \psi_p$

3.2.3 Maassa vallitseva imupaine ja sen mittaaminen

Osittain kyllästyneen maan yhteydessä saatetaan usein puhua potentiaalien sijaan maassa vallitsevasta imupaineesta (eng. soil suction), joka muodostuu matriisi-imupaineesta ja osmoottisesta imupaineesta [14]. Tällöin painepotentiaali oletetaan negatiiviseksi tämän ollessa veden luonteenomainen tila osittain kyllästyneessä maassa.

Matriisi-imupaine määräytyy paljolti materiaalin pintaominaisuuksien kuten ominaispinta-alan ja hienoaineksen määrän kautta. Osmoottinen imupaine puolestaan liittyy huokosveden kemiallisiin ominaisuuksiin kuten suolan määrään ja kationinvaihtokapasiteettiin. Kuvasta 13 huomataan matriisi-imupaineen kasvavan hienoaineksen lisääntyessä osmoottisen imupaineen sen sijaan ollessa riippumaton hienoaineksen määrästä. [25]



Kuva 13. Hienoainespitoisuuden vaikutus kokonaisimupaineen osatekijöihin. [25]

Maamateriaalin imupaineominaisuuksia voidaan tutkia esimerkiksi Tube Suction-kokeen avulla. Tällöin materiaali tiivistetään aluksi optimivesipitoisuudessa kiertotiivistimen avulla muottiin, minkä jälkeen näyte kuivataan uunissa. Näyte asetetaan altaaseen, jonka pohjalla oleva vesi pääsee kosketuksiin näytteiden alaosan kanssa. Vesi alkaa nousta näytteessä ja tämä muuttaa sen dielektrisyys- ja sähkönjohtokykyominaisuuksia, joiden arvoja mitataan säännöllisin väliajoin dielektrisyys- ja sähkönjohtokykysondia käyttäen. Koejärjestelyt on esitetty kuvassa 14. [25]



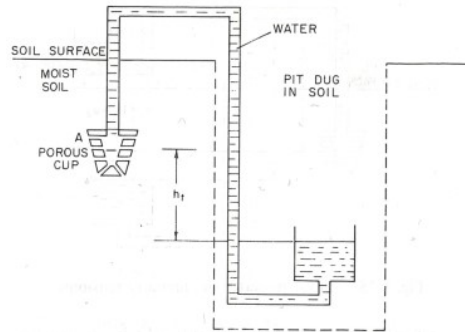
Kuva 14. Imupainekokeen järjestelyt. [25]

Saarenketo ja Scullion ovat tutkineet erityyppisten teiden rakennekerroksissa käytettävien materiaalien dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusominaisuuksia selvittäessään näiden ominaisuuksien suhdetta materiaalien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Tutkimuksen tarkoituksena on ollut myös dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusominaisuuksien tutkiminen maatutkadatan tulkinnan kehittämisen näkökulmasta. Kyseisten ominaisuuksien on todettu kokeiden mukaan korreloivan maamateriaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien sekä routimiskäyttämisen kanssa. Saarenkedon ja Scullionin mukaan dielektrisyysarvot kertovat materiaalin vesipitoisuudesta ja sähkönjohtavuusarvot antavat tietoa siitä, onko materiaalin vesipitoisuus pienenevässä vai suurenevassa. Taulukossa 3 on esitetty tulkintaohje dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusominaisuuksien suhteesta teiden sitomattomien rakennekerrosten laadullisiin ominaisuuksiin. [26]

Taulukko 3. Teiden sitomattomien rakennekerrosten lajittelu sähköisten ominaisuuksien perusteella. [26]

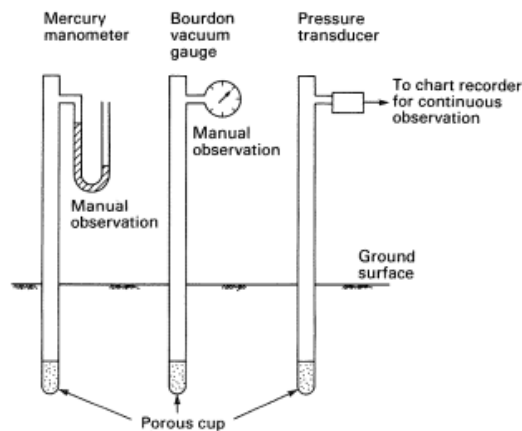
Dielectric value	Electrical conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Material	Strength and deformation properties	Frost susceptibility and water sensitivity
<5	< 10	-dry and open graded base with low water adsorption and large air - solid ratio	-low tensile strength, might be sensitive to permanent deformation by compaction	-non frost susceptible, non water sensitive
5 - 6.5	< 50	-dry base with low water adsorption value and optimum dry density	-optimum strength properties	-non frost susceptible, non water sensitive
6.5 - 9	< 100	-slightly moist base with high suction value	-high shear strength because of suction, hysteresis has great effect on strength value	-might become water sensitive and frost susceptible if drainage stops working
9 - 16	< 150	-moist base	-reduced shear strength because of reduced suction	-frost susceptible and water sensitive
> 16	< 150	-wet or water saturated base	-adequate shear strength, no positive pore water pressure under dynamic load	-may form ice lenses
> 16	> 150	-wet or water saturated base	-under a dynamic load plastic deformation may occur because of high pore water pressure and low shear strength	-extremely frost susceptible

Maavedessä vallitseva matriisi-imupaine voidaan mitata tensiometrillä, mikäli maa ei ole liian kuivaa. Tensiometri ei mittaa osmoottista imupainetta [14]. Tensiometrin toiminta on esitetty periaatteellisella tasolla kuvassa 15, jossa maan sisään sijoitettu huokoinen kuppi mahdollistaa tensiometrin sisäisen vesipatsaan ja maaveden yhteyden. Kuvassa esitetty korkeus h_t kertoo maavedessä vallitsevan alipaineen suuruuden vesipatsaan korkeutena. [27]



Kuva 15. Tensiometrin toiminta periaatetasolla esitettynä. [27]

Käytännössä tensiometrin mittaustekninen ratkaisu toteutetaan siten, ettei maahan tarvitse kaivaa kuoppaa, jonka periaatekuvassa esitetty vesipatsaalla toteutettu tensiometri vaatisi. Tensiometrin mittausratkaisu toteutetaan esimerkiksi elohopeamanometrillä, bourbon-painemittarilla tai sähköisiä antureita käyttäen kuvan 16 mukaisesti. [14]

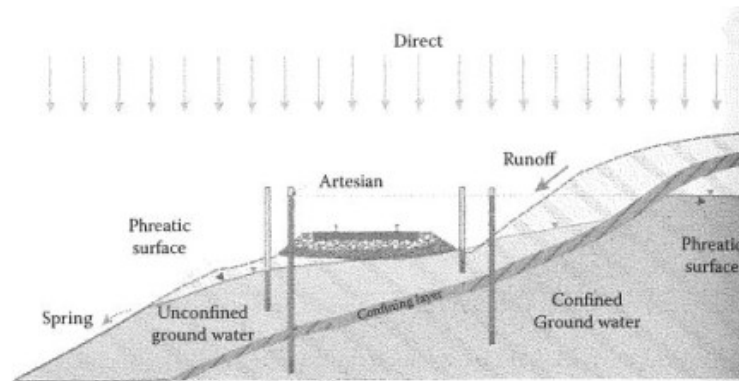


Kuva 16. Tensiometrejä erilaisin mittausratkaisuin varustettuina. Viitattu lähteestä [14] alun perin esitetty lähteessä [28].

3.3 Vesi ratarakenteissa

3.3.1 Radan vedenlähteet

Veden voidaan nähdä päätyvän rataan pohjimmiltaan kolmesta eri lähteestä: suoraan radalle satavasta vedestä tai lumesta, pintavesivalunnasta ja pohjavedestä. Kuvassa 17 on esitetty keskeisimmät radan alusrakenteen kosteutta lisäävät veden lähteet. Muita vedenlähteitä voivat olla radan viereen kinostunut lumi sulaessaan, pohjavedenpinnan vaihtelu ja routimisessa muodostuvan imupaineen ratarakenteeseen nostama vesi [29]. Matalilla rannikkoalueilla sijaitsevat radat ovat erityisen alttiita pohjavedelle [30].



Kuva 17. Radan alusrakenteen oleellisimmat veden lähteet. [7]

Radalle pääsee satamaan vettä kaikkialla paitsi tunneleissa ja katetuilla radan osilla. Radalle satavan veden määrä vaihtelee paikan ja ajankohdan mukaan. Rataan imeytyneen veden poisjohtaminen ratarakenteesta tapahtuu radan sisäisen kuivatuksen avulla, mikä tarkoittaa hyvin vettä läpäisevää tukikerrosta ja veden sivusuuntaista poisvalumista edistävää alusrakennetta. Ratarakenteesta poistamisen jälkeen sadevesi johdetaan kauemmaksi radasta ulkoisen kuivatuksen keinoin. [7]

Pintavalumana ratarakenteeseen päätyvän veden määrään vaikuttavat sademäärät ja valuma-alueen laajuus. Usein kuivatusrakenteilla, jotka estävät valumavesien pääsyn ratarakenteeseen, voidaan toteuttaa myös ulkoinen kuivatus. [7]

Pohjavedellä tarkoitetaan vettä, joka sijaitsee maan sisässä täysin kyllästyneessä vyöhykkeessä, jossa kaikki rakeiden väliset huokokset ovat täysin veden kyllästämiä. Pohjavesi muodostuu, kun sateista ja vesistöistä peräisin oleva vesi suotautuu maahan. Pohjavesivyöhykkeen yläraja tunnetaan pohjavedenpintana (eng. phreatic surface, water table). Pohjavesi voi virrata ratarakenteeseen painekorkeuseron synnyttämän painegradientin ansiosta. Normaalisti tällainen virtaus tapahtuu vaakasuuntaisesti suuremman painekorkeuden alueelta pienemmän painekorkeuden alueelle. Tyypillisesti pohjavesi muodostaa ongelmia erityisesti leikkauksissa, joissa ympäröivä korkeammalla sijaitseva maanpinta ohjaa pohjavettä kohti rataa. [7]

Pohjavesi voi joskus aiheuttaa ongelmia myös tasaisilla alueilla. Tämä on mahdollista erityisesti kuivatuksen edellyttämien kaatojen puuttuessa. [3]

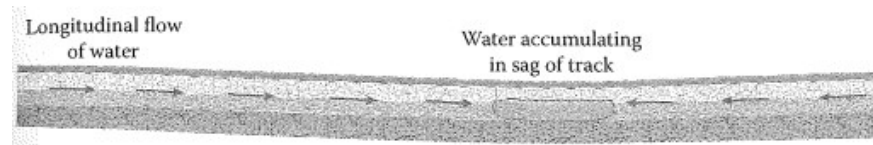
Arteesinen pohjavesi esiintyy tilanteissa, jossa pohjavettä patoutuu tiiviin maakerroksen alle. Kuvassa 17 on havainnollistettu arteesisen pohjaveden käyttäytymistä tiiviin maakerroksen läpi asetetuilla putkilla, joissa arteesinen pohjavesi voi nousta jopa maanpintaa korkeammalle. [7]

Kuten jo kappaleessa 3.1 todettiin, nostaa kapillaari-ilmiö vettä pohjavedenpinnan yläpuolelle maamateriaalin huokosverkostoa pitkin. Maahan syntyy pohjavedenpinnan yläpuolelle täysin kyllästynyt vyöhyke, jonka yläpuolella puolestaan sijaitsee osittain kyllästynyt vyöhyke, jossa vesipitoisuus pienenee ylöspäin siirryttäessä. [7]

Alusrakenteen mahdollisessa routimisessa vesi nousee pohjavedestä routimisen aiheuttaman imupaineen johdosta rakennekerrokseen. Keväällä jään sulaminen rakenteessa tapahtuu ylhäältä alaspäin, jolloin veden poistuminen vaikeutuu alapuolisen maan ollessa vielä jäässä. [29]

Vesi saattaa virrata alusrakenteen yläpintaa myöten radan pituussuunnassa ja kerääntyä painaumakohtaan. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 18. Hyvälaatuinen, vähän

hienontunut tukikerrosmateriaali lisää todennäköisyyttä veden pituussuuntaiselle liikkumiselle. [7]



Kuva 18. Veden pituussuuntainen virtaus rataa pitkin. [7]

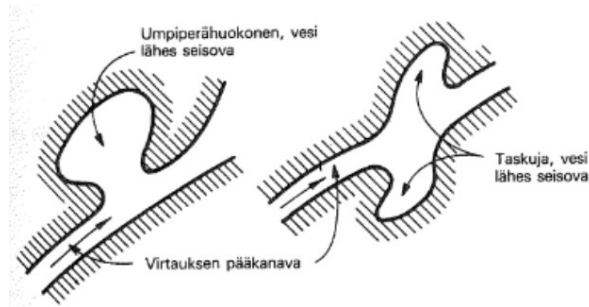
3.3.2 Radan kuivatuksen periaatteet

Lähdettäessä suunnittelemaan veden poistamista radan alusrakenteesta on mietittävä, mitkä ovat poistettavan veden ominaisuudet, jotta voidaan ymmärtää sen käyttäytymistä ja valita oikeat poistamistekniikat. E. Ehrola on tutkinut veden vaikutusta rakennekerrosten toimintaan tierakenteiden näkökulmasta. Koska tien sitomattomien rakennekerrosten ja ratarakenteiden tekniset yhteneväisyydet ovat huomattavat, voidaan Ehrolan näemyksiä hyödyntää soveltuvin osin myös radan rakennekerrosten kohdalla. Ehrolan mukaan kuivatustoimenpiteet on kohdistettava vapaaseen veteen, jolla tässä tarkoitetaan vettä, joka liikkuu maassa painovoiman ohjaamana eikä sisällä kapillaarista vettä. Ehrolan mukaan vapaa vesi saa lisääntyessään aikaan rakennekerrosten lujuuden aleneman ja on veden olomuodoista ainoa, johon normaaleilla kuivatustoimenpiteillä voidaan vaikuttaa. Ehrola siis korostaa vapaan veden olevan se vesityyppi, joka aiheuttaa ongelmia maamateriaalin toiminnassa nähden samalla kapillaarisen veden olevan normaalien kuivatustoimenpiteiden ulottumattomissa.

Myös Jumikis esittää kapillaarisesti nousevan veden olevan tavanomaisten kuivatusratkaisujen tavoittamattomissa. Kuten aikaisemmin todettiin, kapillaariveden noustessa pohjavedestä maahan muodostuu pohjaveden yläpuolelle kapillaarivedellä täysin kyllästynyt vyöhyke (eng. closed capillary fringe), jonka yläpuolella sijaitsee osittain kyllästynyt vyöhyke (eng. open capillary fringe). Jumikisken mukaan kapillaarivesi ei ole poistettavissa kapillaarisen nousun vyöhykkeeseen asennettavilla kuivatusratkaisuilla vaan ainoastaan pohjavettä alentamalla. Tällöin täysin ja osittain kyllästyneet kapillaariveden vyöhykkeet laskevat pohjaveden mukana. [15]

Edeltävissä kappaleissa mainitut normaalit ja tavanomaiset kuivatusratkaisut ovat ymmärrettävissä viittauksina painovoimaiseen kuivatuksen. Luonnollisesti myös esimerkiksi veden haihtuminen kuivattaa maamateriaalia [31]. Ratarakenteiden kuivattuksesta puhuttaessa keskitytään kuitenkin painovoimaiseen kuivatuksen.

Pienin vesipitoisuus, johon maa-aines voidaan kuivattaa painovoimaisen kuivatuksen keinoin, tunnetaan kenttäkapasiteettina. Normaalisti huokoisuudella tarkoitetaan koko huokostilan osuutta koko tilavuudesta. Vesi pystyy virtaamaan maa-aineksestä ulos vain toisiinsa yhteydessä olevien huokosten kautta. Tehokas huokoisuus tarkoittaa toisiinsa yhteydessä olevien huokosten tilavuuden osuutta koko tilavuudesta. Virtauksen kannalta lähes merkityksettömiä ovat myös kuvan 19 mukaiset umpiperähuokokset. [12]



Kuva 19. Umpiperähuokosia. [12]

Yleisesti ajatellaan, että hienorakeista materiaalipartikkelien pinnalla on liikkumaton tai erittäin viskoosinen ohut vesikerros, jonka ansiosta virtauksen kannalta tehokas huokoisuus on paljon pienempi kuin mitattu huokoisuus. Tehokas huokoisuus samaistetaan usein ominaisantoisuuteen. Ominaisantoisuus tarkoittaa sitä vesimäärää, joka keskimäärin poistuu alkuperäisen ja alennetun pohjavedenpinnan välillä olevan maapilarin tilavuusyksiköstä, kun pohjavedenpintaa alennetaan yhden pituusyksikön verran. Tehokas huokoisuus ja ominaisantoisuus vastaavat (painovoimaisesti) kuivatettavissa olevaa vettä. [12]

Tarkastellaan seuraavaksi radan kuvatustekniikan periaatteita kuten Li et al. ne esittävät. Tarkemmat Suomessa käytettävät yksityiskohtaiset ratkaisut ja rakenteiden vaatimukset on esitetty liikenneviraston julkaisuissa ja InfraRYL:ssä. Tärkeimmät liikenneviraston julkaisut kuivatustekniikan suhteen ovat Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu (5/2013) ja RATO3: Radan rakenne (17/2014) [32].

Kuivatuksen kautta veden pääsy rataan pyritään rajoittamaan ja toisaalta jo ratarakenteeseen pääsystä vettä pyritään poistamaan. Sisäisellä kuivatuksella johdetaan pois ratarakenteesta olevaa vettä. Ulkoisella kuivatuksella ratarakenteesta poistettu vesi johdetaan eteenpäin ja estetään uuden veden pääsy ratarakenteeseen tähän yhteydessä olevista vesilähteistä. [7]

Ulkoisen kuivatuksen tavoite on minimoida veden pääsy rataan ja poistaa jo rataan pääsystä vettä. Kuivatusjärjestelmää suunniteltaessa on syytä huomioida kaikki mahdolliset vedenlähteet. Rakenteen sivuprofiiliin tulisi olla sellainen, että koko matka tukikerroksen kulmasta sivuojaan olisi alaspäin viettävä eikä tällä matkalla saisi olla veden virtausta rajoittavia esteitä. Sivuojasta veden tulisi virrata tehokkaasti laskuojiin, jotta vesi saadaan pois radan läheisyydestä. [7]

Pintavaluntana kohti rataa etenevän veden kulku on pysäytettävä ja ohjattava pois päin radasta. Usein tämä tehdään niskaojalla. [7]

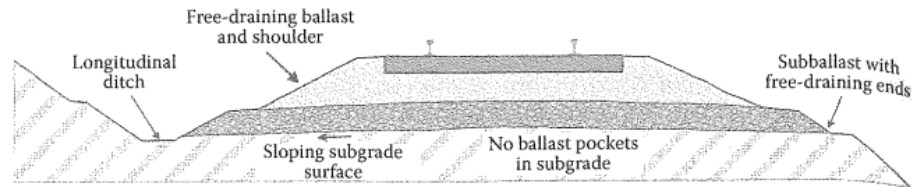
Mikäli pohjavesi on niin korkealla, että se aiheuttaa ongelmia, voidaan sitä laskea painovoimaisesti käyttämällä ojia. Usein käyttökelpoinen ratkaisu on karkeasta sepelistä rakennettu salaoja, johon voidaan tarvittaessa sijoittaa salaojaputki virtauskapasiteetin nostamiseksi. [7]

Ulkoista kuivatusta suunniteltaessa on tärkeää tarkastella koko rata-alueen topografiaa. Tässä hyödyksi voivat olla radan 3D-mallit, joista topografian tarkastelu on helppoa. Yleisesti kuivatuksen järjestäminen on helpointa radan sijaitessa pengerpohjalla ja maanpinnan viettäessä pois päin radasta. Mikäli rata sijaitsee tasamaalla tai leikkauksessa, on sivuojien käyttö suositeltavaa. Sivuojien viettojen tulee olla sopivat, jotta vesi virtaa niissä tarpeeksi tehokkaasti. Sivuojien minimisyvyys määräytyy alimman kuivatettavan rakennesyvyyden mukaisesti. Yleensä tämä tarkoittaa alusrakenteen alapintaa. [7]

Li et al. esittävät Heynsin [33] luoman ojien suunnittelujärjestelmän hyödyllisenä työkaluna. Ojien suunnittelun vaiheet voidaan Heynsin mallin mukaan jaotella seuraavasti:

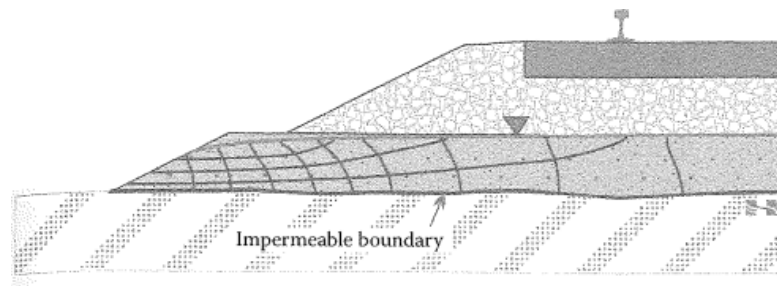
- Rata-aluetta koskevien tietojen keruu (esim. suunnittelua rajoittavat tekijät ja veden purkualueet)
- ojien parametrien valinta (esim. tyyppi, luiskaltevuudet jne.)
- soveltuvimman ojaprofiilin valinta
- kapasiteetin tarkistus
- toteutettavuuden tarkistus (topografiset poikkileikkaukset, maastokäynnit). [7]

Radan sisäinen kuivatus on suunniteltava niin että tukikerroksen sivuttaissuuntainen kuivatus on tehokasta, jottei vedellä kyllästynyttä tilaa pääse syntymään. Sisäisen kuivatuksen tärkein yksittäinen elementti on hyvin vettä läpäisevä tukikerros. Liaksi hienontunut tukikerros johtaa sisäisen kuivatuksen ongelmiin, joita ei voida ulkoista kuivatusta parantamalla paikata. Kuvassa 20 on esitetty hyvän sisäisen kuivatuksen pääperiaatteet. [7]



Kuva 20. Hyvin järjestetyn sisäisen kuivatuksen periaatteet. [7]

Sisäisen kuivatuksen tarkastelussa voidaan käyttää apuna virtausverkostomalleja. Nämä koostuvat virtausta kuvaavista viivoista, jotka kuvaavat tasaisen virtaaman kanavia ja ekvipotentiaaliviivoista, jotka kuvaavat tasaista painehäviötä. Kuvassa 21 on esitetty tilanne, jossa tukikerros on hyvänlaatuinen eikä kyllästy vedellä. Tällöin vesi virtaa ulos alusrakennekerrosten kautta. Kuvan mallissa alusrakenteen alapinta on asetettu vettä läpäisemättömäksi rajaksi. Tämä on käsiteltävissä korostukseksi pohjamaan selvästi huonommasta vedenläpäisevyydestä ja siitä, kuinka veden poistamisen ajatellaan tapahtuvan nimenomaan alusrakenteen sivujen kautta. [7]



Kuva 21. Virtausviivaverkosto kuvaa veden virtausta alusrakenteen läpi. [7]

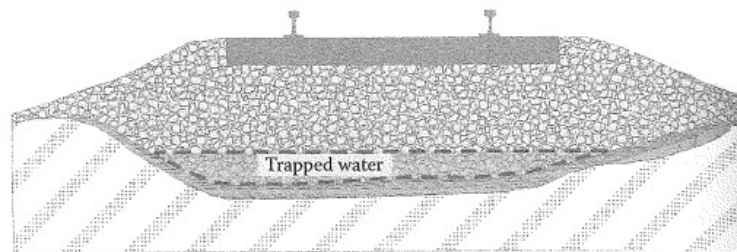
Hyvän sisäisen kuivatuksen tapauksessa tukikerros ja alusrakenne kuivuvat vapaasti ja aika, jonka vesi seisoo rakenteissa, on minimoitu. Minimi vedenläpäisevyysarvona tukikerroksen vedenjohtavuudelle pidetään 0,2 cm/s. [7]

Tukikerroksen lisäksi alusrakenteen merkitys hyvälle sisäiselle kuivatukselle on suuri. Suurin osa vedestä, joka tulee rataan sateena, poistuu radasta alusrakenteen kautta

vaakasuuntaisesti. Kuitenkin voimakkaan sateen aikana alusrakenne saattaa tulla veden kyllästämäksi ja tukikerroksen läpi tullut vesi virtaa pois alusrakenteen yläpintaa pitkin imeytymättä alusrakenteen sisään. Kuitenkin vielä verrattain huononkin vedenläpäisevyyden omaavan alusrakenteen tapauksessa sadevesi tyypillisesti imeytyy sen sisään. Pienen vedenläpäisevyysarvon omaava alusrakennemateriaali haittaa sisäistä kuivatusta tekemällä veden poistumisesta hidasta ja altistamalla pohjamaan kyllästyneelle tilalle. [7]

Veden poistuminen sivusuunnassa alusrakenteesta tulee järjestää siten että matka, jonka vesi joutuu kulkemaan, on mahdollisimman lyhyt. Alusrakennekerroksen tulisi loppua sivusuunnassa lähelle tukikerroksen alakulmaa sivusuunnassa tarjoten vedelle lyhyen reitin ulos alusrakenteesta. Esimerkiksi ratkaisu, jossa alusrakenne jatkuu sivusuunnassa radan viereiseksi huoltotieksi, on kuivatuksen kannalta huono, sillä se ei tarjoa vedelle helppoa poistumisreittiä alusrakenteesta. [7]

Jos pohjamaassa tapahtuu vaiheittaista deformaatiota, heijastuu tämä tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan luoden siihen painumakohtia, jotka keräävät ylhäältä päin tulevaa vettä. Näissä painumakohdissa makaava vesi lisää deformaatiota entisestään. Syntyneisiin painumiin reagoidaan usein lisäämällä tukikerrosmateriaalia ja tukemalla rata raidegeometrian palauttamiseksi. Tämä voi lisätä painumaa entisestään. Kuvassa 22 on esitetty tukikerroksen alle syntynyt vettä keräävä painauma. Painaumakohdat voivat myös kehittyä tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnan sivuosaan erityisesti savi- sen pohjamaan vaiheittaisen liikkumisen ja plastisen deformaation seurauksena. [7]



Kuva 22. Tukikerroksen alapintaan syntynyt painauma, johon vesi kerääntyy. [7]

Tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan syntyneen painauman poikkileikkausgeometriaa voidaan arvioida ainakin maatutkaluotauksella. Yleisin korjausmenetelmä painumakohdan korjauksessa on salaojan sijoittaminen painauman syvimpään kohtaan. Tehokkain mutta myös hintavin korjaustapa on pengermateriaalin vahvistaminen. [7]

3.3.3 Kuivatuspuutteiden aiheuttamat ongelmat radassa

Vesi voi aiheuttaa ongelmia sekä maamateriaalin käyttäytymisessä että rakenteellisissa komponenteissa. Maan lujisuuden ja jäykkyyden väheneminen johtaa painumiin. Maan tilavuus voi routimisen seurauksena suurentua ja maan kantokyky roudan sulaessa vaarantua. Metalliset komponentit altistuvat korroosiolle, joka voi vaikuttaa niiden toimintakykyyn. Suurimmat vaarat liittyvät kuitenkin radan geometrian muutoksiin, joka tyypillisesti aiheutuvat epätasaisista painumista. [34]

Radan kuivatuksen ollessa puutteellista, huononevat radan ominaisuudet ja ylimääräisten huoltotoimenpiteiden tarve kasvaa. Puutteellinen kuivatus voi B. Indraratna et al. mukaan johtaa seuraaviin ongelmiin radan rakenteissa:

- Tukikerroksen leikkauslujuuden, jäykkyyden ja kantokyvyn aleneminen

- Lisääntyneet painumat
- Pohjamaan pehmeneminen
- Hienoaineksen pumppautuminen syklisen kuormituksen alaisena
- Tukikerroksen kulumisen veden pumppautumis-ilmiön ja veden jäätyminen seurauksena
- Pölkkyjen vaurioituminen veden pumppautumisen seurauksena [30]

R. Sanudo et al. listaavat ratojen kuivatustekniikkaa käsittelevässä artikkelissaan edellisten lisäksi vielä seuraavat ongelmat:

- Luiskien/penkereiden stabiliteettien vaarantuminen
- Luiskissa tapahtuva eroosio
- Pohjamaan kantavuuden väheneminen
- Kaikkien kitkamaalajeista koostuvien kerrosten hienoneminen
- Vettä keräävät painaumet tukikerroksen alapinnassa
- Kitkamaalajeista koostuvien kerrosten sisäinen eroosio
- Vaikutukset päällysrakenteen komponentteihin. [34]

Ratojen puutteellisesta kuivatuksesta johtuvat ongelmat saattavat näkyä myös radan liikennöitävyydessä esimerkiksi viivästyksinä. On myös huomioitava, että kuivatusjärjestelmät itsessään ovat alttiina veden aiheuttamille vaurioille. Kuivatusjärjestelmään saattaa kertyä hienoainesta, joka heikentää sen toimintaa. Virtaava vesi saattaa eroosion kautta viedä materiaalia pois virtauskanavasta. Kuivatusjärjestelmä saattaa myös pahimmillaan tukkeutua. [34]

Myös Li et al. ovat tarkastelleet eroosiota jaotellen sen sisäiseen eroosioon ja pintavesieroosioon. Sisäisessä eroosiossa maapartikkelit kulkeutuvat ulos maarakenteesta veden virratessa tämän läpi. Erityisesti siltit ovat alttiita tällaiselle käyttäytymiselle pienen raekokonsa ja koheesionpuutteensa vuoksi. Pintavesieroosio aiheutuu nopeasti virtaavan pintaveden kuljettaessa maamateriaalia pois sen alkuperäisestä paikasta. Ilmiön esiintyvyyttä lisääviä tekijöitä ovat: jyrkkä luiska, maamateriaalin pieni partikkelikoko ja virtauspinnan suojaamattomuus (esim. kasvillisuuden puuttuminen). [7]

On huomioitavaa, että johtuen eri maissa käytettyjen materiaalien ja rakenteiden sekä vallitsevien sääolojen eroavaisuuksien vuoksi myös puutteellisesta kuivatuksesta johtuvat ongelmat saattavat poiketa toisistaan. Suomalaisessa rataympäristössä keskeisiksi ongelmiksi mainitaan ainakin seuraavat asiat:

- Routiminen
- Sulamispehmeneminen
- Tukikerroksen hienoneminen
- Radan kantavuuden aleneminen [35]

Vuonna 2016 julkaistun suomalaisten ratojen kuivatusongelmia käsittelevän konferenssijulkaisun [35] mukaan kuivatuksen parantamisen vaikutus vaurioiden vähenemiseen ei ole tarkasti tiedossa. Selvää kuitenkin on, että hyvin toimivalla kuivatuksella voidaan vähentää ratojen vaurioitumista.

3.3.4 Radan kuivatuksen nykytila ja tulevaisuus Suomessa

Latvala et al. mukaan kuivatusongelmat suomalaisilla radoilla liittyvät lähinnä vanhoihin ratoihin. Suurin osa radoista on rakennettu aikana, jolloin massatyöt on minimoitu. Uusilla sekä kattavasti peruskorjatuilla radoilla kuivatus toimii pääsääntöisesti hyvin. Jos liiallisesta vedestä johtuvat tasaisuusongelmat pystytään poistamaan kuivatusta parantamalla, on tämä huomattavasti kannattavampaa, kuin isojen korjaustoimenpiteiden tekeminen. [35]

Latvala on tutkinut suomalaisten ratojen kuivatuksen laatua kyselytutkimusten, maastotarkastelujen ja vuonna 2012 aloitetun rautaongelmakohteiden korjaussuunnitteluhankkeen (ROPE) perusteella. Kyselytutkimusten perusteella korkean kunnossapitoluokan radoilla kuivatus toimii paremmin kuin heikompiluokkaisilla radoilla, joilla kuivatuksen toimivuus voi olla erityisen huono. Kuivatusta heikentäviä tekijöitä ovat:

- vesakoituminen
- penkereen pysyvät muodonmuutokset
- ojien ja rumpujen tukkeutuminen
- materiaalien hienontuminen
- alueelliset kuivatusongelmat (esim. laskuojien toimimattomuus). [32]

Puutteet rataverkon kuivatuksessa aiheutuvat monista asioista. Latvala kuvaa nykyisten kunnossapitovaatimusten pohjautuvan pääosin näkemykseen, jonka mukaan kuivatus on kunnostettava, kun sen toimivuus oleellisesti heikkenee, mitä Latvala pitää ongelmallisena, koska kunnostustarpeen määrittäminen objektiivisesti on vaikeaa. Latvalan mukaan tulevaisuuden kunnossapitosopimusten tulisi sisältää joko kiinteästi määrättäviä toimenpiteitä tai kuivatuksen kunnossapitotarve olisi sidottava selvästi mitattaviin ominaisuuksiin, joita uudet tarkastelumenetelmän pystyvät tarjoamaan. Tällaisia uusia tarkastelumenetelmiä ovat ainakin laserkeilaus, jolla voidaan havaita ojien syvyydet ja penkereen poikkileikkauksen muuttuminen, digitaalisen videomateriaalin tuottaminen radasta ja maatutkadata. [32]

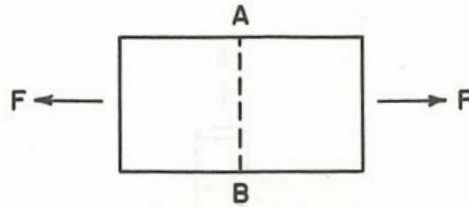
Sanudo et al. ovat tehneet havaintoja ilmastonmuutoksen sateita lisäävästä vaikutuksesta Euroopassa ratojen kuivatustekniikkaa tutkittaessa [34]. Sanudo et al. mukaan esimerkiksi lisääntyvät rankkasateet ja tulvat johtavat siihen, että nykyiset kuivatustekniset suunnitteluratkaisut ovat jäämässä puutteellisiksi. Myös Suomessa sademäärät todennäköisesti tulevaisuudessa jossain määrin kasvavat ja rankkasateet voimistuvat [36]. Koska ratarakentamisen tekniset yksityiskohdat ja ympäristötekijät vaihtelevat Euroopan eri osissa, voi olla vaikeaa arvioida, mikä on muuttuvan ilmaston rooli suhteessa kuivatusratkaisujen kehittämistarpeeseen Suomessa. Vuonna 2008 ilmestyneen ratahallintokeskuksen esiselvityksen: Ilmastonmuutokseen sopeutuminen radanpidossa mukaan rautatiesuunnittelun ja rakentamisen teknistä ohjeistusta tulee tarkistaa ja radan kuivatuksen ohjeistuksen tarkistamisen yhteydessä mainitaan erityisesti rankkasaderiskit [37].

4. KAPILLAARISUUS

4.1 Kapillaarisuuden teoreettinen tausta

Kapillaarisuuden taustalla vaikuttavat moninaiset tekijät. Tutustutaan seuraavaksi kapillaarisuuden teoreettiseen taustaan, joka toimii pohjana kappaleessa 4.2 esitettäville, maamateriaalissa olevan kapillaarisen veden käyttäytymisen tarkasteluille. Kapillaarisuuden teoreettinen tarkastelu on syytä aloittaa pintajännityksen käsitteestä.

Kirkham ja Powers ovat tarkastelleet pintajännityksen luonnetta. Pintajännitys ei kuvaa jännitystä sen perinteisessä merkityksessä vaan se edustaa voiman suhdetta pituusyksikköä kohden. Pintajännitys voidaan ilmaista tarkemmin termillä pintajännityskerroin (eng. surface tension coefficient). Pintajännityksen luonnetta voidaan havainnollistaa kuvan 23 mukaisella analogialla, jossa paperiarkkia vedetään voimalla F . [27]



Kuva 23. Pintajännitys paperiarkissa. [27]

Pintajännityskerroin voidaan tällöin ilmaista kaavalla 7. Nimittäjässä esiintyvä lukuarvo 2 selitetään sillä, että paperiarkilla on ohuudestaan huolimatta ylempi ja alempi pinta.

$$\sigma = F/2\overline{AB}, \quad (7)$$

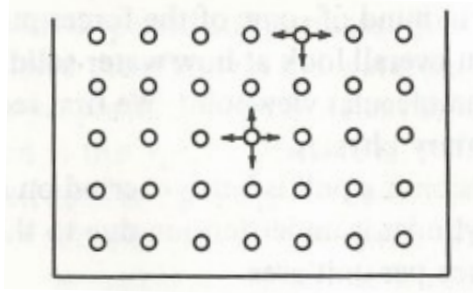
jossa

σ on pintajännityskerroin

F on paperiarkkiin kohdistettu voima

\overline{AB} on arkin korkeus.

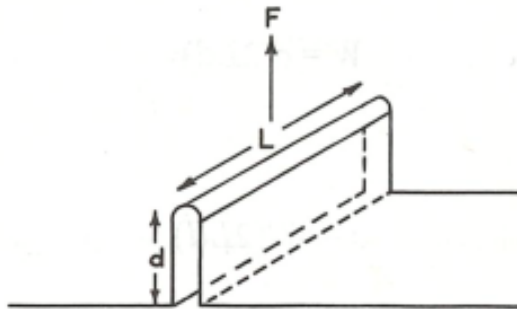
Laplacen pintajännitysteoria selittää pintajännitystä vesimolekyylien välisiä vetovoimia tarkastelemalla. Nesteen sisällä olevaan molekyyliin kohdistuu vetovoimia tasaisesti joka suunnasta. Nesteen pinnassa olevaa molekyyliin kohdistuu sen sijaan nesteen sisälle suuntautuva voimaresultantti. Tämä johtuu siitä, ettei vedenpinnan ulkopuolelta kohdistu yksittäiseen molekyyliin vastavoimaa, joka kumoaisi veden sisään suuntautuvan voiman vaikutuksen. Ilmiö on esitetty kuvassa 24. [27]



Kuva 24. Laplacen pintajännitysteoria. [27]

Pinnassa olevilla molekyyleillä on suurempi taipumus liikkua sisäänpäin nesteeseen kuin nesteen sisällä olevilla molekyyleillä on liikkua pintaan. Tämä johtaa veden pyrkimykseen minimoida pinta-alansa. Tämä tapahtuu kuitenkin aina suhteessa muihin vaikuttaviin voimiin, joten pinta-alasta ei yleensä muodostu pienintä mahdollista. [27]

Kuvan 25 mukaisessa teoreettisessa koeasetelmassa jännettä lähdetään nostamaan veden alta siten, että se nostaa mukanaan ohuen vesikalvon. Nostoon vaadittava voima riippuu jänteen pituudesta ja pintajännityksestä kaavan 8 mukaisesti. [27]



Kuva 25. Vesikalvo, joka nousee jänteen mukana tätä vedestä nostettaessa. [27]

$$F = 2(\sigma L) , \quad (8)$$

jossa

F on jänteeeseen kohdistuva nostovoima, joka vaaditaan pintajännitysvoimien tasapainottamiseksi (painovoima jätetään tarkastelematta)

L on jänteen pituus

σ on pintajännityskerroin.

Pintajännityskerroin voidaan nähdä myös suurentuvaan pinta-alaan varastoituvana energiana. Jänteen nostamiseksi tehty työ voidaan määrittellä kaavan 9 mukaisesti.

$$W = Fd, \quad (9)$$

jossa

W on jänteen korkeudelle d nostamiseen käytetty työ

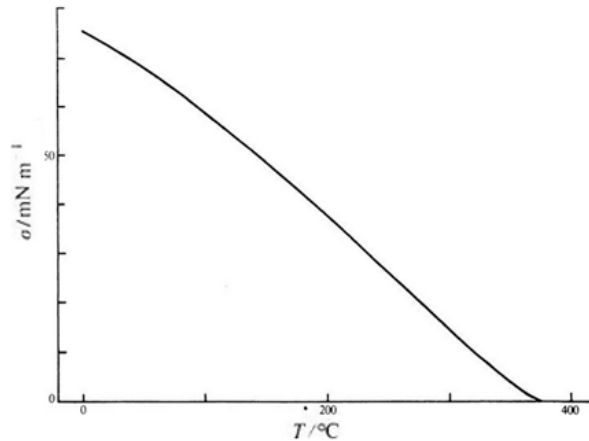
d on nostomatka.

Sijoittamalla kaavan 8 mukainen voiman lauseke kaavaan 9 ja jakamalla yhtälö puolittain, saadaan kaava muotoon:

$$\sigma = W/(2Ld) \quad (10)$$

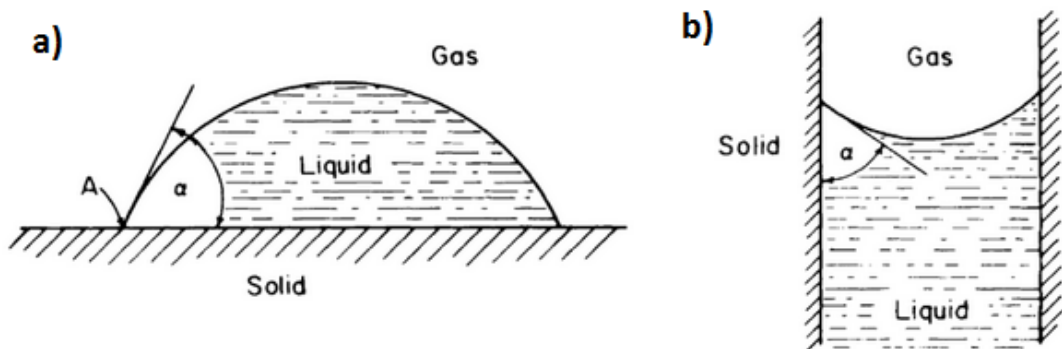
Kaavan 10 oikean puolen nimittäjän voidaan nähdä muodostavan veden kasvaneen pinta-alan. Pintajännityskerroin voidaan täten ilmaista kasvaneeseen pinta-alaan varastoituneena energiana.

Lämpötila vaikuttaa pintajännityksen arvoon. Kuvassa 26 on esitetty veden pintajännityksen muutos lämpötilan absoluuttisen arvon suhteen.



Kuva 26. Lämpötilan vaikutus veden pintajännitykseen. [38]

Pudotettaessa tippa nestettä kuivalle kiinteälle pinnalle, leviää nestepisara sen päälle asettuen lopulta tilaan, jossa sen kulma muodostaa kyseisen nesteen, ympäröivän kaasun ja kiinteän pinnan ominaisuuksista riippuvan arvon (kuva 27 a). Kyseisen kulman arvo tunnetaan kontaktikulmana ja se esiintyy myös myöhemmin tarkasteltavan kapillaarisesti nousevan vesipatsaan meniskuksen raunassa (kuva 27 b). [22]

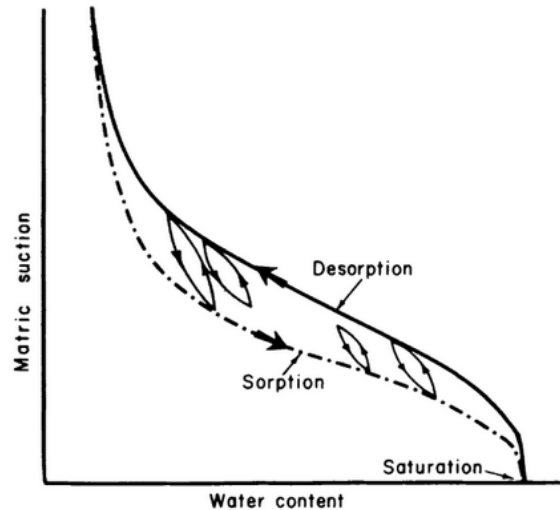


Kuva 27. Kontaktikulma tasolle pudotetussa nestepisarassa (a) ja kapillaariputkessa nousevan vesipatsaan meniskuksessa (b). [22]

Jos kontaktikulman arvo on nolla, tarkoittaa tämä täydellistä pisaran levittäytymistä pinnalle. Vastaavasti 180 asteen kontaktikulma viittaa periaatteelliseen tilanteeseen, jossa vesi ei levittäytyisi pinnalle laisinkaan. Kontaktikulman arvo riippuu myös siitä, onko vesi etenevää vai vetäytyvää. Etenevän veden kontaktikulma (eng. wetting angle) on yleensä nolla sellaisessa tapauksessa, jossa vesi on puhdasta ja etenee puhtaalla, tasaisella ja epäorgaanisella pinnalla. Tilanteessa, jossa pinta on karkea tai siinä on kerros pinta-

aktiivisia aineita, kontaktikulma voi olla varsinkin etenevän veden tapauksessa huomattavasti nollaa suurempi. [22]

Maamateriaalin vesipitoisuus muodostuu erilaiseksi riippuen siitä, tuodaanko siihen vai imetäkö siitä vettä tietyllä paineella. Kuvassa 28 on esitetty hystereesi-silmukka kuvaa käytetyn matriisi-imupaineen arvoa maanäytteen vesipitoisuuden funktiona kummassakin vaiheessa. Veden poistovaiheessa (kuvassa "desorption") alun perin kyllästyneeseen maanäytteeseen on kohdistettu kasvava imupaine, jolla näytteestä on imetty vettä. Näytteen kasteluvaiheessa (kuvassa "sorption") imupainetta on tasaisesti vähennetty. Kuvasta huomataan vesipitoisuuden olevan tietyllä imupaineella korkeampi veden poisto- kuin lisäysvaiheessa. [22]

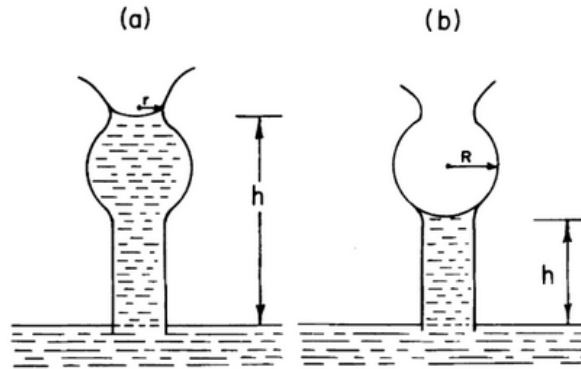


Kuva 28. Imupaineen ja vesipitoisuuden suhdetta kuvaavien käyrien muodostama hystereesisilmukka maamateriaalin vesipitoisuuden lisääntyessä ja vähetessä. Pääsilman sisään jäävät pienemmät silmukat kuvaavat esitettyä käyttäytymistä pääsilman käyrien välissä. [22]

Joissain lähteissä [27] hystereesisilmukan mainitaan jäävän alapäästään hieman auki veden lisäysvaiheen käyrän jäädessä muutamia prosentteja pienemmäksi x-akselilla tämän saavuttaessaan. Syyksi tähän mainitaan loukkuun jäänyt ilma ja mahdollinen kutistuma.

Esitetty maaveden hystereesi saattaa johtua monista tekijöistä, joita ovat:

- Mustepulloefektinä tunnettu, maan huokosten muodosta johtuva, ilmiö on esitetty kuvassa 29 tyypillistä rakeiden välissä olevaa huokosreittiä muodoltaan muistuttavien putkien avulla havainnollistettuna. Kuvan 29 a-kohdan tapauksessa huokonen tyhjentyy imupaineen ylittäessä tason $\Psi_r=2\gamma/r$. Jotta huokonen täytyisi uudelleen (kuva 29 b) täytyisi imupaineen laskea tason $\Psi_R=2\gamma/R$ alle. Veden poistovaiheessa huokosreitit ahtain kohta määrää veden poistumisen siinä missä veden lisäysvaiheessa suurten huokosten halkaisijat ovat määrääviä. Kuvatut ilmiöt voivat johtaa Hainesin hyppyinä tunnettuun ilmiöön, jossa vesi purkautuu yhtäkkisesti suhteessa painetason muutokseen. Maaveden hystereesi-ilmiö on yleisesti selkeämpi karkeissa maamateriaaleissa pienten imupaineiden alueella. Tällöin huokokset voivat tyhjentyä paljon suuremmassa imupaineessa kuin missä ne täyttyvät. [22]



Kuva 29. Mustepulloefekti määrittää vesipatsaan tasapainokorkeuden vettä poistettaessa (a) ja vettä lisättäessä (b). [22]

- Jo aikaisemmin tarkasteltu ilmiö, jonka mukaisesti kontaktikulma on suurempi etenevässä vedessä kuin vetäytyvässä vedessä on yksi osatekijä maaveden hystereesi-ilmiössä. Kontaktikulma vaikuttaa meniskuksen kaarevuussäteeseen ja täten imupaine muodostuu suuremmaksi vetäytyvässä vedessä suhteessa etenevään veteen. [22]
- Maan kastumisvaiheessa huokosiin saattaa jäädä aluksi ilmakuplia, jos tasapainotilaa ei saavuteta heti. Tällöin vesipitoisuus on pienempi juuri kastuneessa maassa tietyn imupaineen arvolla, kuin pitkään kyllästyneenä olleessa maassa saman imupaineen vallitessa. [22]
- Turpoaminen, kutistuminen ja maamateriaalin ikääntyminen voivat johtaa muutoksiin maamateriaalin rakenteessa kastumis- ja kuivumishistoriasta riippuen. Myös veteen liunneen ilman vapautuminen voi johtaa kastumis- ja kuivumisvaiheiden eroihin tietyllä imupaineella vallitsevan vesipitoisuuden suhteen. [22]

Kapillaari-ilmiötä havainnollistetaan yleensä lasiputkessa nousevan vesipatsaan avulla. Veden pyrkimys nousta putken sisäpinnalle yhdessä pintajännityksen kanssa saavat aikaan veden nousun putkessa. Pintajännitys vaikuttaa meniskuksen reunoilla kontaktikulman osoittamaan suuntaan. Kontaktikulman suuruuden määrää veden ja putken molekyylien välisen adheesioisuuden suuruus. Pintajännityksen pystysuuntaisen komponentin voidaan nähdä kannattelevan vesipatsasta kaavan 11 mukaisesti. [14]

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g, \quad (11)$$

jossa

r on kapillaariputken säde

T_s on veden pintajännitys

α on kontaktikulma

h_c on kapillaarinen nousukorkeus

ρ_w on veden tiheys

g on putoamiskiihtyvyyden arvo.

Kapillaariputken säteen ja kontaktikulman pystysuuntaisen komponentin suhde voidaan ilmaista omana muuttujanaan R_s , joka kuvaa meniskuksen kaarevuussädettä [14]. Tämä on ilmaistu kaavassa 12.

$$R_s = r/\cos\alpha \quad (12)$$

Järjestelemällä kaavan 11 termit uudelleen ja ilmaisemalla kapillaariputken säteen ja kontaktikulman pystysuuntaisen komponentin suhde meniskuksen kaarevuutena, saadaan se muotoon:

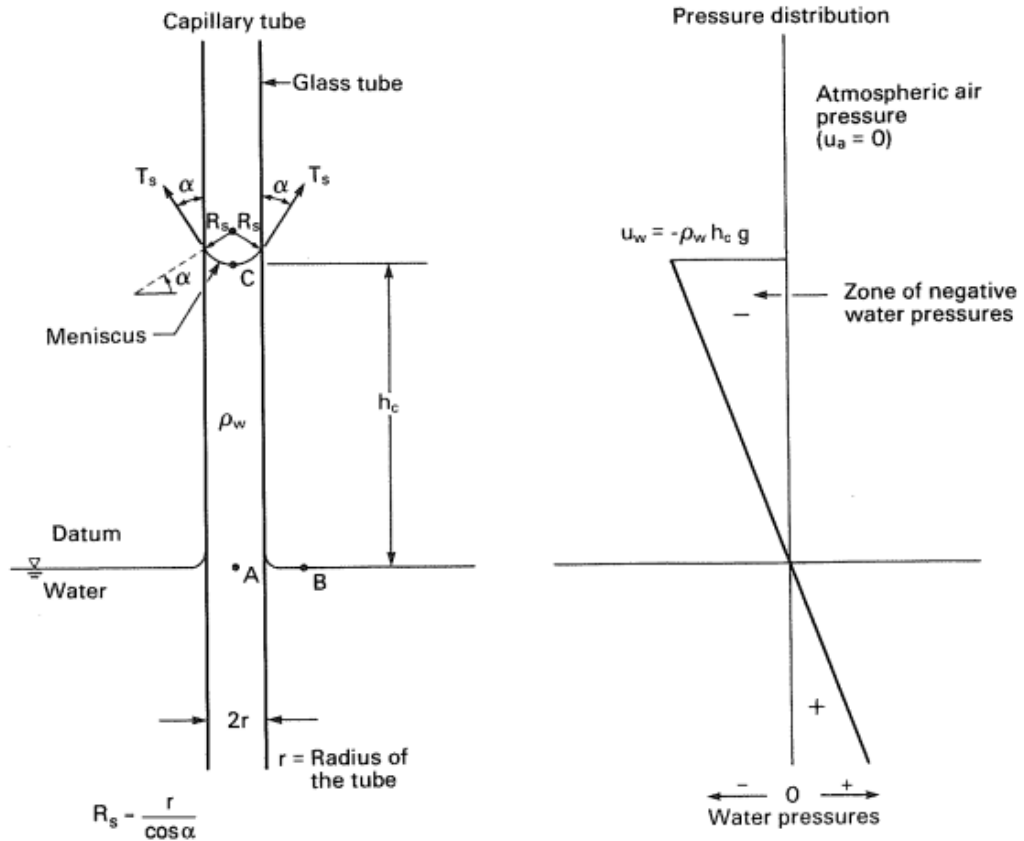
$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad (13)$$

Täysin puhtaan veden ja lasin tapauksessa kontaktikulma olisi nolla [14]. Tällöin meniskuksen kaarevuussäde muodostuisi yhtä isoksi kuin putken säde, jolloin kaava 13 saadaan muotoon:

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g r} \quad (14)$$

Kaavasta 14 on helppo havaita, että kapillaarinen nousukorkeus kasvaa putken sisähalkaisijan pienentyessä. Kuten myöhemmin huomataan, maa-aineksessa kapillaari-ilmiö tapahtuu rakeiden välisten huokosten muodostamassa huokosverkostossa. Tällöin huokosten läpimitta määrittää veden kapillaarisen nousun korkeuden; mitä pienempiä huokokset ovat, sitä suurempaa veden kapillaarinen nousu on.

Kuvassa 30 on havainnollistettu veden painetta kapillaariputkessa. Pisteissä A ja B veden paine vastaa ilmanpainetta. Näiden pisteiden alapuolella vedenpaine kasvaa. Kapillaariputkeen nousseessa vedessä vallitsee negatiivinen paine, jonka arvo kasvaa negatiiviseen suuntaan pistettä C kohti siirryttäessä. Pisteeseen C vedenpaine voidaan laskea kaavalla 15. [14]



Kuva 30. Kapillaari-ilmiö ja vesipatsaassa vallitsevat vedenpaineet. [14]

$$u_w = -\rho_w g h_c, \quad (15)$$

jossa u_w on vedenpaine.

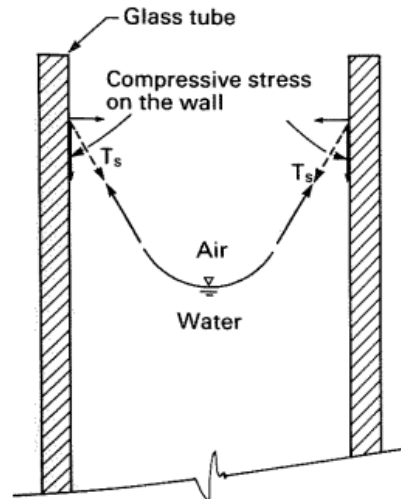
Matriisi-imupaine voidaan nähdä pisteen C ilmanpaineen ja vedenpaineen erotuksena [14]. Tämä on esitetty kaavassa 16.

$$(u_a - u_w) = \rho_w g h_c \quad (16)$$

Kun kaava 13 sijoitetaan kaavaan 16, voidaan matriisi-imupaine ilmaista pintajännityksen suhteen. Tämä on esitetty kaavassa 17.

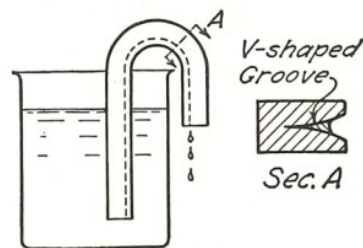
$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (17)$$

Pintajännitys on jaettavissa komponentteihin kuvan 31 mukaisesti. Pintajännityksen pystysuuntainen komponentti tuottaa putkeen puristusjännityksiä ja näin pintajännityksen voidaan nähdä kannattelevan vesipatsasta putkessa. Maamateriaalissa oleva kapillaarivesi lisää rakeiden välisiä puristusvoimia. Näin ollen matriisi-imupaine lisää osittain kylälästyneen maan leikkauslujuutta. Asiaa tarkastellaan lähemmin kappaleessa 4.2. [14]



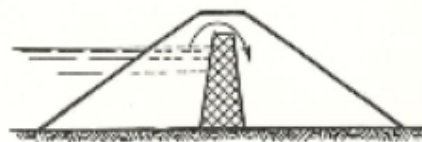
Kuva 31. Kapillaariputkessa vaikuttavat voimat. [14]

On huomattava, ettei kapillaarisuus aina vaadi varsinaista putkea, joka sulkisi vesipatsaan reunan joka puolelta. Esimerkkinä voidaan käyttää kuvan 32 mukaista asetelmaa, jossa vesi nousee kapillaarisesti putken sisäpinnan terävässä urassa kulkeutuen lopulta vesiasian ulkopuolelle. Ilmiö tapahtuu, vaikka putken sisähalkaisija on muutoin liian suuri veden nostamiseksi tarvittavalle korkeudelle. [31]



Kuva 32. Kapillaari-ilmiö terävässä urassa. [31]

Kuva 32 havainnollistaa samalla myös ilmiötä, jossa kapillaari-ilmiö kuljettaa vettä yli sellaisesta vyöhykkeestä, josta vesi ei voi kulkea lävitse (eng. capillary siphoning). Todellisuudessa tällaisessa tilanteessa vesi kulkeutuisi kapillaarisesti hienorakeisen maa-ainemateriaalin kautta terävän uran sijaan. Ilmiöstä ollaan käytännössä kiinnostuneita esimerkiksi patorakenteiden yhteydessä. Tällöin vesi kulkeutuu vettä lähes läpäisemättömän patosydämen yli (kuva 33). [31]

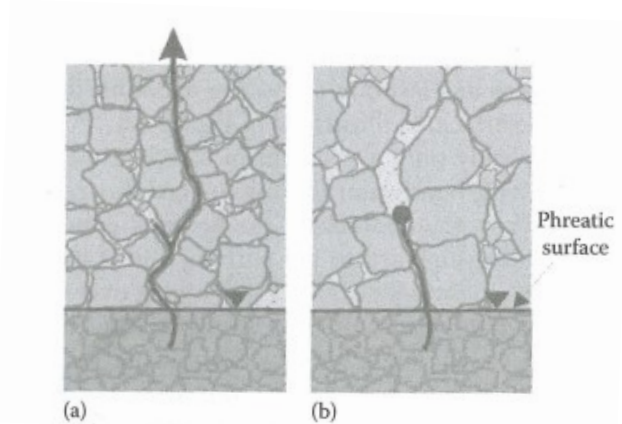


Kuva 33. Kapillaarinen veden virtaus vettä lähes läpäisemättömän patosydämen yli. [31]

4.2 Kapillaarisuus maamateriaalissa

Maa-ainesrakeiden väliset huokostilat muodostavat monimuotoisen yhtenäisen huokosverkoston jossa kapillaarinen nousu tapahtuu. Huokosverkostoa ei voi ajatella pelkäs-

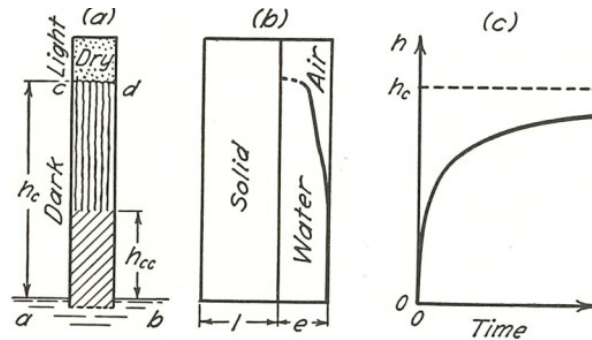
tään tilanteena, jossa maassa olisi erikokoisia yksittäisiä huokosreittejä, joissa vesi nousisi. Todellisuudessa huokokset ovat poikkipinta-alaltaan satunnaisesti vaihtelevia ja muodostavat yhtenäisen monimutkaisen huokosverkoston. Veden kapillaarinen nousu pysähtyy sen kohdatessa tarpeeksi suuren huokosen. Tämä on esitetty kuvassa 34. [7]



Kuva 34. Kapillaarisen veden nousun loppuminen sen kohdatessa tarpeeksi suuren huokosen. [7]

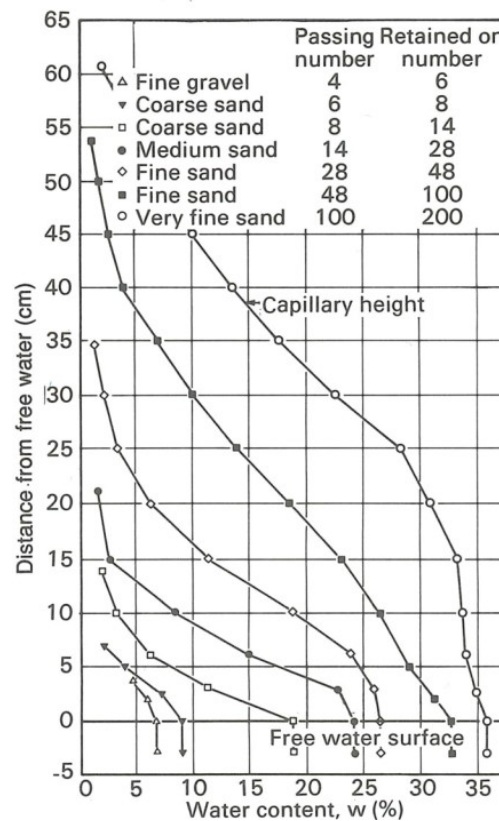
Rakeiden välisten huokosten muodostamassa huokosverkostossa vesi kulkeutuu kapillaarivoimien vaikutuksesta joka suuntaan. Kun maa-ainekseen imeytyy alhaalta päin kapillaarisesti vettä, kyllästyy huokosverkosto alaosaan täysin. Kyseisen täysin kyllästyneen vyöhykkeen yläpuolella isoimmat huokokset jäävät ilmatäytteisiksi ja vain pienet huokokset täyttyvät vedellä niiden kyetessä nostamaan vettä korkeammalle kuin läpimitaltaan isompien huokosten. Mitä suuremmaksi etäisyys vedenlähteen ja tarkasteltavan pisteen välillä muodostuu, sitä pienempiä huokosia vaaditaan nostamaan vettä kyseiselle korkeudelle. Näin ollen ylimmässä kohdassa mihin vettä kapillaarisesti nousee, vain kaikista pienimmät huokokset ovat täyttyneet muiden säilyessä tyhjinä. [31]

Kuvassa 35 a on esitetty koeasetelma, jossa hiekalla täytetty läpinäkyvä putki on sijoitettu siten, että sen alaosa on yhteydessä astiassa olevaan veteen. Vesi nousee kapillaarisesti hiekassa muodostaen tämän alaosaan täysin kyllästyneen alueen, jonka korkeus on h_{cc} . Suurin korkeus, johon vesi kapillaarisesti nousee, on kuvattu merkinnällä h_c . Korkeuksien h_c ja h_{cc} välinen alue on siis osittain kyllästynyt alue, jossa vain osa huokosista on täyttynyt vedellä. Kuvassa 35 b osittain kyllästyneen alueen vesipitoisuuden ei ole kuvattu muuttuvan lineaarisesti siirryttäessä täysin kyllästyneestä päästä kuivaan päähän, vaan lähestyttäessä korkeutta h_c , laskee vesipitoisuus äkisti. Alue, johon vesi nousee joko täysin tai osittain kyllästäen hiekan, on sävyllään tummempi kuin kuivat alueet. Kuva 35 c esittää kyllästyneen vyöhykkeen ylärajan etenemisnopeutta. Käyrä katkeaa ennen kuin se saavuttaa korkeuden h_c , mikä on tulkittavissa siten, että lopussa vesirintama etenee hyvin hitaasti suhteessa aikaisempaan nopeuteen. [31]



Kuva 35. Veden kapillaarinen nousu kuivasta hiekasta valmistettuun näytteeseen. [31]

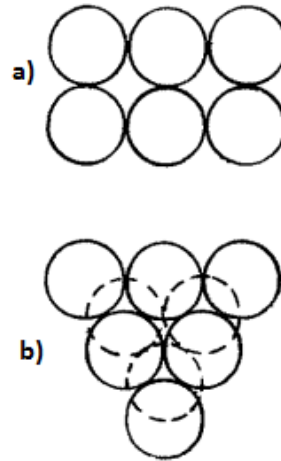
Kosteusprofiilin muoto riippunee huokoskokojakaumasta. Kirjallisuudesta on löydettävissä koetuloksia maanäytteiden todellisista vesipitoisuusjakaumista kapillaarisen nousun kokeissa (kuva 36). Kyseisten kokeiden näytteiden vesipitoisuusjakaumat ovat muodostuneet yläpäästään loiviksi. Myös tämän diplomityön yhteydessä tehdyt kokeet tuottivat pääsääntöisesti yläpäästään loivan kosteusprofiilin.



Kuva 36. Kapillaarisesti nousseen veden pitoisuusjakaumia erilaisia rakeisuusjakaumia omaavissa maalajeissa. Viitattu lähteestä [14] alun perin esitetty lähteessä [54].

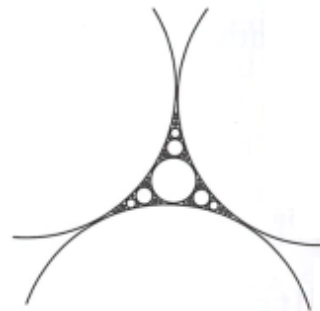
Kuten aiemmin todettua, maamateriaalin tiivystila vaikuttaa rakeiden välisten huokosten kokoon. Mitä tiiviimmässä tilassa näyte on, sitä pienempiä ovat huokokset. Kuvassa 37 on esitetty periaatteellisella tasolla tasarakeisten pallojen tiivistyminen. Kuvassa 37 a on esitetty löyhin mahdollinen tila, jossa pallot asettuvat sekä vaaka- että pystytasossa esitetynlaiseen järjestykseen ja huokoisuudeksi muodostuu 48 %. Kuvassa 37 b on esitetty tiivein mahdollinen tila. Jatkuvalla viivalla piirretyt pallot esittävät ensimmäistä kerrosta

ja katkoviivalla piirretyt toista kerrosta. Tässä tapauksessa pallot asettuvat hieman kolmiulotteisesti lomittain ja huokoisuudeksi muodostuu 29 %. Luonnossa materiaalit eivät luonnollisestikaan ole tasarakeisia eivätkä pyöreimmäkään hiekkarakeet ole täysin pallon muotoisia. [10]



Kuva 37. Tasakokoiset pallot löyhimmässä (a) ja tiiveimmässä (b) tilassa. [10]

Normaalisti maamateriaali koostuu vaihtelevan kokoisista rakeista. Tiiveimmässä tilassa ollessaan tällaisen materiaalin suurimpien rakeiden väliin jää pienempiä rakeita, joiden väliin puolestaan jää vielä pienempiä rakeita. Alun perin Fullerin ja Thompsonin esittämä malli (kuva 38) käsittelee rakeiden pakkautuminen ideaalisella tavalla tiheyden suhteen. Tällaisessa tiheyden suhteen ideaalisessa tilassa suurimmat rakeet koskettavat toisiaan ja keskikokoiset rakeet täyttävät näiden väliset huokokset. Keskikokoisten rakeiden väliset huokokset täyttyvät vielä pienemmillä rakeilla ja niin edelleen. [30]



Kuva 38. Ideaalinen rakeiden pakkautuminen Fullerin ja Thompsonin mallin mukaan. [30]

Tiivistila vaikuttaa kapillaarisen nousun suuruuteen; mitä tiiviimmässä tilassa materiaali on, sitä pienempiä rakeiden väliset huokokset ovat ja täten kapillaarinen nousukorkeus on suurempi. Taulukossa 4 on esitetty eri maalajeille tyypillisiä kapillaarisia nousukorkeuksia erilaisten tiivistilojen suhteen. Joissain maalajeissa nousukorkeus ylittää 10 m, mikä voidaan nähdä teoreettisena ristiriitaisena.

Taulukko 4. *Maalajien likimääräisiä kapillaarisuuksia tiiviystiloittain. Muokattu lähteestä [39] lisäämällä geo-luokituksen mukaiset nimet lähteestä [40].*

maalaji		kapillaarinen nousukorkeus	
RT-luokitus	GEO-luokitus	löyhänä	tiiviksi sullottuna
hieno sora	hienosora	1-5 cm	
karkea hiekka	karkea-hiekka	3-12 cm	4-15 cm
hieno hiekka	keskihiekka	10-35 cm	12-50 cm
karkea hieta	hienohiekka	30-200 cm	40-350 cm
hieno hieta	karkeasiltti	1,5-5 m	2,5-8m
hiesu	keski-/hienosiltti	4-10 m	6-12 m
savi	savi	> 8 m	>10 m

Maa-aineksen kapillaarisen nousukorkeuden likimääräiseen arviointiin on kehitetty myös kaava 18, jossa nousukorkeutta arvioidaan rakeiden ominaisuuksia kuvaavien parametrien ja huokosluvun avulla [31, 7, 55, 50]. Kaavassa 18 käytettävä tehokas raekoko D_{10} tarkoittaa raekokoa, jota pienempien partikkelien osuus tarkasteltavan materiaalin massasta on 10 % ja suurempien partikkelien osuus massasta on vastaavasti 90 %. Tehokas raekoko kuvastaa täten likimääräisesti rakeisuutta yhtenä lukuarvona. Mitä pienempiä rakeet ovat, sitä pienempiä huokokset niiden välisessä huokosverkostossa ovat ja täten kapillaarinen nousukorkeus muodostuu suuremmaksi raekoon pienessä. [31]

$$h_c = \frac{C}{eD_{10}}, \quad (18)$$

jossa

h_c on kapillaarinen nousukorkeus osittain kyllästyneen alueen ylärajaan asti senttimetreinä ilmaistuna.

C on kokemusperäinen vakio, jonka suuruus riippuu rakeiden muodosta ja pinnan epäpuhtauksista saaden arvon väliltä 0,1-0,5 cm^2

e on huokosluku

D_{10} on tehokas raekoko senttimetreissä ilmaistuna.

Jos veden lopullinen nousukorkeus tiedetään, voidaan veden nousunopeutta arvioida kaavan 19 mukaisesti. [58]

$$t = \frac{nh_c}{k_w} \left[\log \left(\frac{h_c}{h_c - z} \right) - \frac{z}{h_c} \right], \quad (19)$$

jossa

t on aika, joka kuluu veden nousuun korkeudelle z

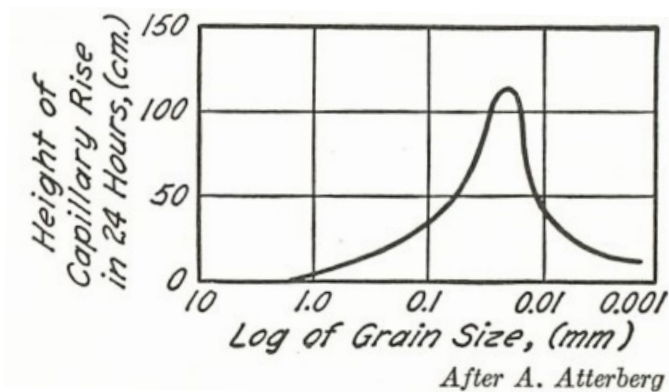
n on huokoisuus

h_c on lopullinen kapillaarinen nousukorkeus

k_w on vedenläpäisevyyskerroin

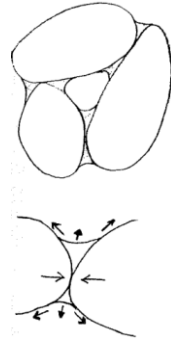
z on veden nousukorkeus ajassa t

Mitä hienorakeisempaa kiviaines on, sitä pienempi vedenläpäisevyys, sillä yleensä on. Näin ollen hienorakeisessa kiviaineksessa tapahtuva kapillaarinen nousu tapahtuu hitaammin kuin karkearakeisessa. Toisaalta karkeammassa kiviaineksessa, jossa vesi nousee nopeammin, lopullinen nousukorkeus ei muodostu yhtä isoksi. Kuvassa 39 on esitetty kuvaaja, joka esittää veden kapillaarista nousua eri raekoon omaavissa kvartsijauheissa 24 tunnin tarkasteluajankohdalla. Jos tarkasteluajankohta olisi ollut myöhäisempi, sijaitsisi kuvaajan huippu enemmän pienen raekoon suunnassa. [31]



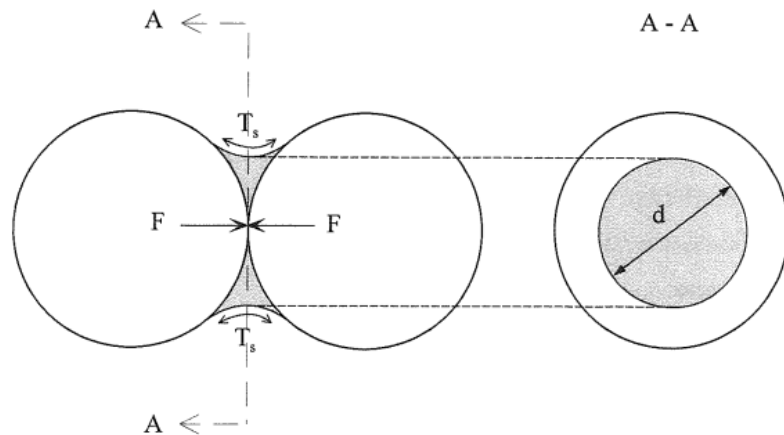
Kuva 39. Raekoon vaikutus veden kapillaariseen nousukorkeuteen kvartsijauheessa 24-tunnin ajanjaksolla. [31]

Samat voimat, jotka aiheuttavat kapillaari-ilmiön, aiheuttavat maassa myös huokoskulmaveden muodostumista rakeiden kontaktipisteisiin ja tämän kautta näennäistä koheesiota. Tällöin mekanismi on kuitenkin hieman erilainen kuin varsinaisessa kapillaari-ilmiössä. Kuvassa 40 rakeiden välillä on nähtävissä huokoskulmavettä, jossa veden ja kivien välinen adheesio pyrkii levittämään vettä rakeiden pintoja pitkin samalla kun veden pintajännitys pyrkii oikaisemaan veden pintaa. Tällöin vedessä vaikuttaa alipaine, joka vetää kivirakeita vastakkain. Näennäisellä koheesiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa maa on saanut tilapäisesti lisää lujuutta rakeiden välisen huokoskulmaveden muodostumisen johdosta. Kun maa kyllästyy vedestä, katoavat huokoskulmaveden pintakalvot ja ilmiö katoaa. Luonnollisesti myös huokoskulmaveden haihtuminen poistaa näennäisen koheesio vaikutuksen. [10]



Kuva 40. Huokoskulmavesi ja näennäinen koheesio. [10]

Tarkastellaan ilmiössä vaikuttavia voimia kahden pallon muotoisen partikkelin avulla (kuva 41). Kun pintajännityksen arvo kerrotaan partikkelien välisessä tangentialisessa tasossa olevan vesiyhteyden piirillä, saadaan voima, jonka huokoskulmavesi partikkelien välille tuottaa. Tämä on esitetty kaavassa 20. [41]



Kuva 41. Periaatekuva huokoskulmaveden pintajännityksen tuottamasta puristusvoimasta kahden pyöreän partikkelin välillä. [41]

$$F = T_s * \pi d, \quad (20)$$

jossa

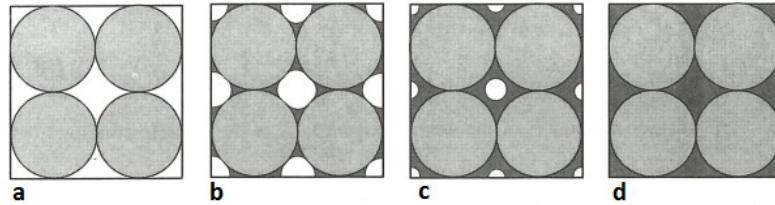
F on huokoskulmaveden partikkelien välille tuottama voima

T_s on pintajännitys

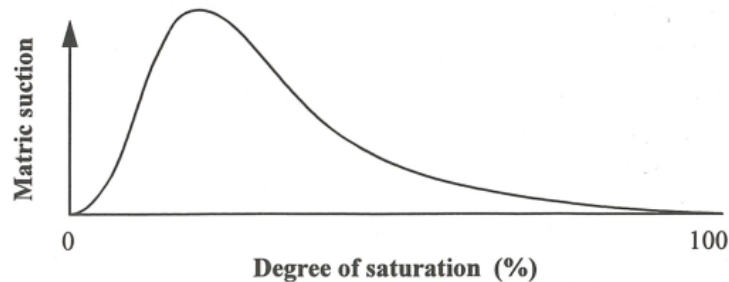
d on vesiyhteyden halkaisija

Materiaalin vesipitoisuus vaikuttaa siihen, kuinka suuren vetovoiman huokoskulmavesi rakeiden välille tuottaa. Kuivassa näytteessä huokoskulmavettä ei luonnollisestikaan esiinny (kuva 42 a). Kun vesipitoisuutta aletaan kasvattaa, suurenee kuvan 41 mukaisen vesiyhteyden piiri tangentialtasossa. Kuten kaavasta 20 huomataan, suurentaa tämä maapartikkeleja toisiansa päin vetävää voimaa. Vesipitoisuutta kasvatettaessa esitetty huokoskulmaveden piiri kasvaa aluksi verrattain nopeasti suhteessa lisättyyn veteen (kuva 42 b). Kun veden määrää edelleen lisätään, yhtyvät viereisten partikkelikontaktien huokoskulmavedet yhdeksi vesimassaksi (kuva 42 c). Vesipitoisuuden edelleen kasvassa partikkelien huokosten keskikohtiin jäävät ilmakuplat muuttuvat yhä pienemmiksi.

Tällöin pintajännitys tuottaa enää vain pienen negatiivisen paineen rakeiden väliseen veteen ja täten jännityslisä on myöskin pieni. Kun vesi lopuksi täyttää kaikki rakeiden väliset huokokset täydellisesti (kuva 42 d), katoaa veden alipaine ja tämän myötä jännityslisä. Kuvassa 43 on esitetty periaatteellisella tasolla matriisi-imupaineen suuruus suhteessa vesipitoisuuteen. Sekä veden puuttuessa täysin että veden täyttäessä kaikki huokokset, saa matriisi-imupaine arvon nolla. Käyrän alku- ja loppupään välillä matriisi-imupaineen arvo määräytyy edellä käsiteltyjen seikkojen mukaisesti. [41]



Kuva 42. Huokoskulmaveden synty ja maapartikkelin välisen tilan asteittainen satu-
roituminen. Muokattu lähteestä [41].



Kuva 43. Matriisi-imupaineen kehittyminen kyllästysasteen muuttuessa. Muokattu
lähteestä [41].

Mitä hienorakeisempaa materiaali on, sitä suurempi edellä kuvattu huokoskulmaveden muodostama lisäjännitys materiaaliin on. Mitä pienempiä rakeet ovat, sitä enemmän kontakteja materiaali partikkeleiden välillä on. On kuitenkin huomattava, että mikäli materiaali koostuu lähinnä suurista partikkeleista, ei selkeästi pienemmän raekoon omaavien partikkelien rakeisuus ja vesipitoisuus ole kovinkaan merkittävää kuormien siirtyessä lähinnä isojen rakeiden muodostamaa raerunkoa pitkin. [41]

4.3 Veden virtaus sekä imeytymis- ja uudelleenjakautumisprosessi

Täysin kyllästyneen maan tapauksessa veden virtausta maassa kuvataan usein Darcyn lain avulla. Tämä on kuvattu kaavassa 21, jonka oikean puolen miinusmerkki kuvaa veden virtaavan pienenevän hydraulisen paineen suuntaan. [14]

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y}, \quad (21)$$

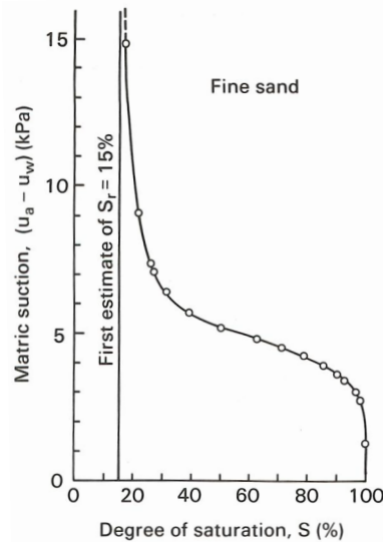
jossa

v_w on veden virtausnopeus

k_w on vedenläpäisevyyskerroin

$\partial h_w / \partial y$ on hydraulinen gradientti y suunnassa

Vedenläpäisevyyskerrointa voidaan pitää vakiona täysin kyllästyneelle maamateriaalille. Darcyn laki on sovellettavissa myös osittain kyllästyneelle maalle. Kuitenkin tällöin vedenläpäisevyyskerroin ei ole vakio. Vesi liikkuu osittain kyllästyneessä maassa vain veden täyttämien huokostilojen kautta, jolloin sen voidaan nähdä muuttuvan vesipitoisuuden mukaan. Vesipitoisuuden voidaan taas nähdä muuttuvan matriisi-imupaineen funktiona. Kuvattaessa veden määrää maamateriaalissa voidaan vesipitoisuuden sijaan tarkastella saturaatioastetta. Kuvassa 44 on esitetty esimerkki saturaatioasteen muutoksesta hienossa hiekassa matriisi-imupaineen suhteen. [14]



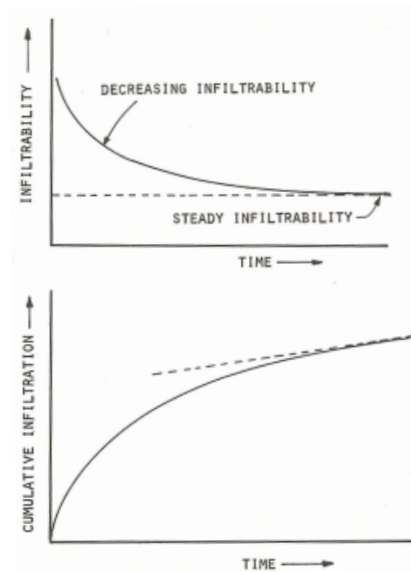
Kuva 44. Saturaatioasteen muutos matriisi-imupaineen suhteen. [14]

Koska sade voidaan nähdä ehkäpä merkittävimpana vedenlähteenä radan alusrakenteeseen, on sateen kautta saapuvaa vettä syytä tarkastella tarkemmin. Sadevesi painuu maamateriaalin sisään imeytymisprosessin kautta. Sadeveden imeytyminen ei ole pelkästään painovoiman ohjaamaa, vaan myös matriisi-imupaine vaikuttaa siihen vaihtelevissa määrin. Tarkastellaan seuraavaksi veden imeytymistä ja sitä ohjaavia tekijöitä Hillelin esittämällä tavalla. Vaikka asia esitetään yleisellä tasolla, pätee se luonnollisesti myös ratapenkerettä tarkasteltaessa soveltuvin osin.

Kun maa-aineksen päällä johdetaan vettä tasaisesti kiihtyvällä tahdilla, on selvää, että jossain vaiheessa maa ei enää pysty imemään itseensä vettä tarpeeksi nopeasti vaan ylimääräinen vesi alkaa lammikoitua maan pinnalle. Imeytymisnopeus kuvaa sitä, miten nopeasti tilavuusyksikkö vettä virtaa maahan pinta-alayksikköä kohti. [42]

Niin kauan kuin veden virtausnopeus imeytymispinnalle on pienempi kuin maksimaalinen ilmanpaineessa vallitseva imeytymisnopeus, vesi imeytyy niin nopeasti, ettei se ehdi lammikoitua. Tällöin imeytymisnopeuden määrää veden virtausnopeus imeytymispinnalle. Kun nopeus, jolla vesi tuodaan imeytymispinnalle, nousee maksimaalista ilmanpaineessa vallitsevaa imeytymisnopeutta korkeammaksi, tulevat maaprofiilin ominaisuudet määrääväksi tekijäksi imeytymisnopeuden suhteen. [42]

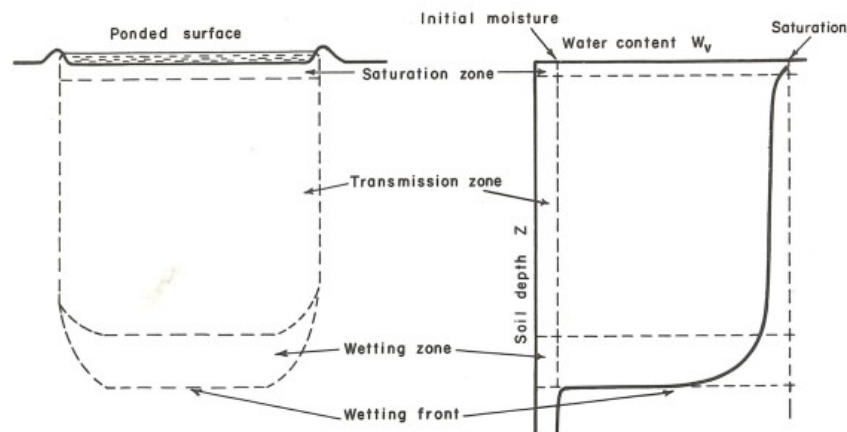
Useissa kokeissa on havaittu veden imeytymisnopeuden laskevan matalan lammikoitumisen tapauksessa imeytymisprosessin edetessä. Kuvassa 45 on esitetty imeytymisen aikariippuvuus ja kumulatiivinen imeytyminen tilanteessa, jossa alun perin kyllästämättömän maakerroksen päälle tuodaan yhtäkkisesti ohut vesikerros, jota ylläpidetään vettä lisäämällä imeytymisen edetessä. [42]



Kuva 45. Imeytymisen aikariippuvaisuus ja kumulatiivinen imeytyminen veden matalan lammikoitumisen tapauksessa. [42]

Normaalissa ilmanpaineessa vallitseva imeytymisnopeus veden ollessa vapaasti saatavilla riippuu maan alkuperäisestä vesipitoisuudesta ja vallitsevasta imupaineesta kuten myös maan laadusta, rakenteesta ja kerroksellisuudesta. Imeytymisnopeus pienenee imeytymisen edetessä ja saavuttaa lopulta kutakuinkin vakioarvon. Pääasiallisesti imeytymisnopeuden lasku johtuu matriisi-imupaineen gradientin pienenemisestä. [42]

Kun tarkastellaan kuvan 46 mukaisesti kosteusprofiilia homogeenisessa maassa veden lammikoituessa pinnalle, huomataan että pintaosassa vallitsee täysin kyllästynyt tila muutamien senttimetrien syvyydelle asti. Tämän vyöhykkeen alla vallitsee suhteellisen syvä osittain kyllästynyt vyöhyke, jossa vesipitoisuus muuttuu vain vähän. Alimmaisessa vyöhykkeessä vesipitoisuudessa tapahtuu nopea muutos ja etenevän vesirintaman vesipitoisuus eroaa voimakkaasti maan alkuperäisestä vesipitoisuudesta. Kun veden imeytyminen etenee, täysin kyllästyneen vyöhykkeen alapuolella sijaitseva korkean vesipitoisuuden vyöhyke (kuvassa "transmission zone"), pitenee ja alin vyöhyke, jossa vesipitoisuus muuttuu voimakkaasti, etenee hidastuvalla vauhdilla alaspäin. [42]

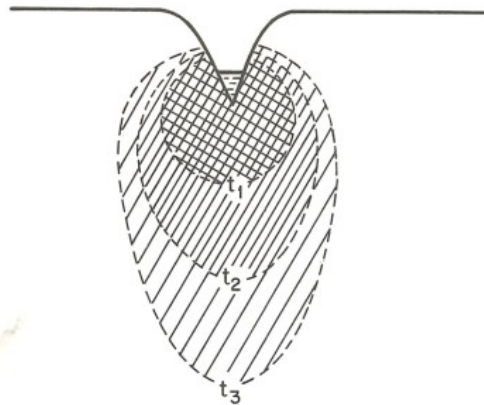


Kuva 46. Maan kosteusprofiili imeytymistilanteessa veden lammikoituessa maan pinnalle. [42]

Alaspäin suuntautuva veden imeytyminen maahan johtuu normaalisti matriisi-imupaineen ja painovoiman gradienttien yhteisvaikutuksesta. Veden tunkeutuessa syvemmälle

ja vettyneen maan syvyysuuntaisen pituuden kasvaessa, keskimääräinen imupainegradientti pienenee. Tämä jatkuu, kunnes imupainegradientti maaprofiilin yläosassa pienenee mitättömän pieneksi, jättäen näin vakio painovoimagradientin ainoaksi vettä alaspäin liikuttavaksi voimaksi. Tällöin virtausnopeuden arvo lähestyy maan vedenjohtavuuden arvoa johtuen painovoimagradientin vakio arvosta syvyyden suhteen. [42]

Maan alkuperäinen vesipitoisuus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti imeytyminen muuttuu imupaineen ohjaamasta painovoimaiseksi. Imeytymisen tapahtuessa alun perin kuivaan maahan, on imupainegradientti alussa huomattavasti gravitaatiogradienttia suurempi ja näin ollen imeytymisnopeus vaakasuunnassa on kutakuinkin sama kuin pystysuunnassa imeytymisen alkuvaiheessa (kuva 47). Imeytymisen tapahtuessa alun perin märkään maahan, on imupainegradientti alun alkaen pieni ja imeytyminen muuttuu painovoimaiseksi aikaisemmin. [42]



Kuva 47. Veden imeytyminen alun perin kuivaan maahan kastelukanavan kautta. Vesirintaman eteneminen on esitetty kolmella eri tarkasteluajankohdalla (t_1 - t_3). [42]

Käytännössä veden imeytyminen tapahtuu usein kerroksittaiseen rakenteeseen. Tällöin kerrosten keskinäiset vedenjohtavuuserot vaikuttavat veden imeytymiskäyttäytymiseen [42]. Ratapenkereessä kahden vedenjohtavuudeltaan erilaisen materiaalikerroksen rajoja ovat usein esimerkiksi tukikerroksen ja alusrakenteen sekä alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnat, joissa karkeampi kerros peittää hienorakeisempaa.

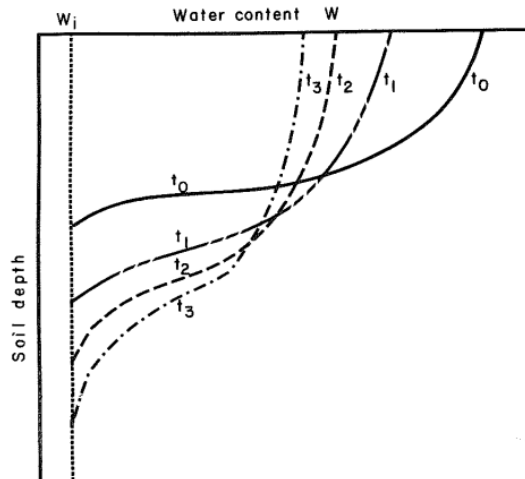
Karkeamman maa-aineksen peittäessä hienorakeisempaa maa-ainesta, on veden imeytymisnopeus aluksi päällimmäisen kerroksen määräämä. Imeytymisrintaman saavuttaessa alemman kerroksen, imeytymisnopeus pienenee alemman kerroksen ominaisuuksien määräämänä. Sateen jatkuessa tarpeeksi kauan, voi ylemmän materiaalin alaosaan muodostua vedellä kyllästynyt vyöhyke. [42]

Tapauksessa, jossa hienorakeisempi maa-aines peittää karkearakeisempaa maa-ainesta, imeytymisnopeus on aluksi ylemmän kerroksen määräämä. Veden saavuttaessa alemman kerroksen, saattaa imeytymisnopeus hidastua. Syyksi tähän voidaan nähdä vesirintaman etuosassa vallitseva korkea alipaine, joka estää veden tunkeutumisen karkeampaan kerrokseen. Kun veden tulo jatkuu ja vesi savuttaa positiivisen paineen, pääsee vesirintama lopulta tunkeutumaan alempaan kerrokseen. Esitetty ilmiö voi johtaa siis tilanteeseen, jossa heikosti vettä johtavan kerroksen sisään sijoittuva paremmin vettä johtava kerros jopa hidastaa veden imeytymistä rakenteeseen. [42]

Sateen ja imeytymisprosessin päättyessä kosteuden välittyminen syvemmälle maahan ei pääty, vaan voi jatkua huomattavankin kauan. Yleinen vesipitoisuusjakauma maan sisällä sateen päättyessä on sellainen, jossa maan yläosa on märkää ja alaosa kuivaa.

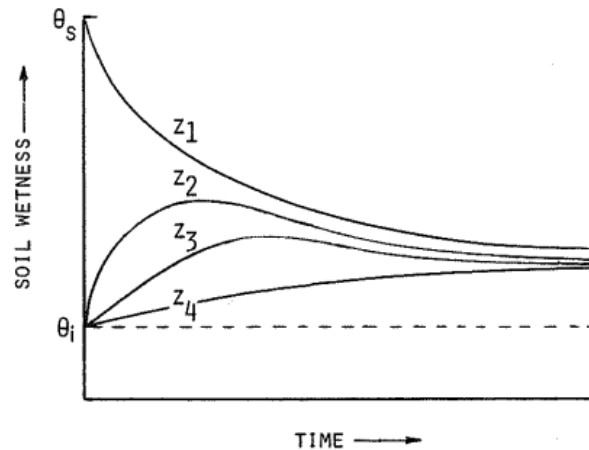
Maassa oleva vesi jakautuu tällöin uudelleen maamateriaalin syvyysuunnassa märän vyöhykkeen alapuolisen maan vetäessä vettä alaspäin. Veden uudelleenjakautumisen nopeus riippuu maan hydraulisista ominaisuuksista, märän maakerroksen syvyydestä ja alempien kerrosten kuivuudesta. Kun alkuperäinen märän kerroksen syvyys on pieni ja alempi kerros on verrattain kuiva, imupainegradientti on iso ja täten tuottaa nopean veden uudelleenjärjestymisen syvyysuunnassa. Toisaalta alkuperäisen märän vyöhykkeen ollessa paksu ja alapuolisen maan ollessa jo valmiiksi kosteaa on imupainegradientti pieni ja uudelleenjakautuminen tapahtuu lähinnä painovoiman ohjaamana. [42]

Kosteuden uudelleenjakautumisen prosessi hidastuu edetessään kahdesta syystä. Imupainegradientti alun perin märän kerroksen ja kuivan kerroksen välillä pienenee näiden kosteustilojen lähestyessä toisiaan. Toisaalta alun perin märän vyöhykkeen vedenjohtavuus pienenee sen vesipitoisuuden pienetessä. Kosteusrintaman eteneminen syvemmälle hidastuu veden uudelleenjakautumisen aikana. Imeytymisvaiheen lopussa mahdollisesti melko selvärajainenkin rintama häviää kosteuden uudelleenjakautumisen seurauksena. Kuvassa 48 on esitetty keskimääräisen rakeisuuden omaavaksi luonnehditun materiaalin kosteusprofiilin muuttuminen kosteuden uudelleenjakautumisen seurauksena. Ajat t_0 - t_3 kuvaavat ajanjaksoja 0, 1, 4 ja 14 päivää kastelun jälkeen. Maan alkuperäistä kosteustilaa kuvaa muuttuja w_i . [42]



Kuva 48. Kosteusprofiilin muutos maamateriaalissa kosteuden uudelleenjakautumisen seurauksena. [42]

Kosteuden jakautuessa uudelleen sateen kastelemaan märän kerroksen alapuolisen kerroksen yläosan vesipitoisuus ensin kasvaa ja sitten pienenee kosteuden uudelleenjakautumisen edetessä. Ilmiö on havaittavissa kuvasta 49, jossa Z_1 sijaitsee sateen kastelemassa vyöhykkeessä ja Z_2 - Z_4 edustavat eri syvyyksiä sateen kastelemaan kerroksen alla. [42]



Kuva 49. Vesipitoisuuden muutos ajan suhteen eri syvyyksillä kosteuden uudelleenjakautumisprosessin aikana. [42]

Kappaleessa 4.1 esitettiin hystereesi-ilmiö, jonka mukaan tietyllä imupainetasolla maainekseen jää sen kuivussa suurempi vesipitoisuus kuin sen kastuessa. Näin ollen alun perin märkä yläosa ei periaatteessa kuivu samaan vesipitoisuuteen kuin alun perin kuiva alaosa, vaikka imupaine pitkän ajan kuluessa tasaantuisikin [42]. On ymmärrettävissä, että havainto koskee myös alun perin kuivia osioita, jotka kastuvat kosteuden uudelleenjakautumisen alkuvaiheessa ja kuivuvat kosteuden uudelleenjakautumisen edetessä.

Yleisen oletuksen mukaan kosteuden uudelleenjakautuminen muuttuu merkityksetömän hitaaksi tai jopa lopulta loppuu. Tällöin maan ajatellaan yleensä saavuttavan vakio vesipitoisuuden, joka on vakio juuri kyseiselle maamateriaalille. Tämä vesipitoisuus tunnetaan yleisesti kenttäkapasiteettina. Esimerkkeinä kenttäkapasiteeteista mainittakoon hiekkojen noin 4 % vesipitoisuus ja savien jopa 45 % vesipitoisuus. Tarkalleen ottaen kenttäkapasiteettia ei voida kuitenkaan pitää vakiosuuruisena tietylle maamateriaalille, kosteuden uudelleenjakautumisprosessin päättymisen määrittämisen ollessa tulkinnanvaraista. [42]

Kenttäkapasiteetin määrittelyssä ”nyrkkisääntönä” saatetaan käyttää esimerkiksi kahden päivän kuivamisjakson tuottamaa vesipitoisuutta. Tällainen tulos on kuitenkin tulkinnallinen jättäessään useita tekijöitä tarkastelun ulkopuolelle. Kenttäkapasiteetin käsitteen soveltaminen on sitä perustellumpaa, mitä karkeampaa maamateriaali on. Hienorakeisissa maa-aineksissa kosteuden uudelleenjakautuminen voi jatkua hyvin pitkään. Taulukossa 5 on esitetty eräässä hiesusavessa mitattu vesipitoisuuden muutos ajan suhteen 60-90 cm syvyydellä alkuperäisen kastelusyvyuden yltäessä yli 150 cm:iin. Kyseisessä tapauksessa ylöspäin tapahtuva haihdunta oli estetty. [42]

Taulukko 5. Kosteuden uudelleenjakautumisen seurauksena tapahtunut vesipitoisuuden muutos hiesusavessa 60-90 cm syvyydellä. [42]

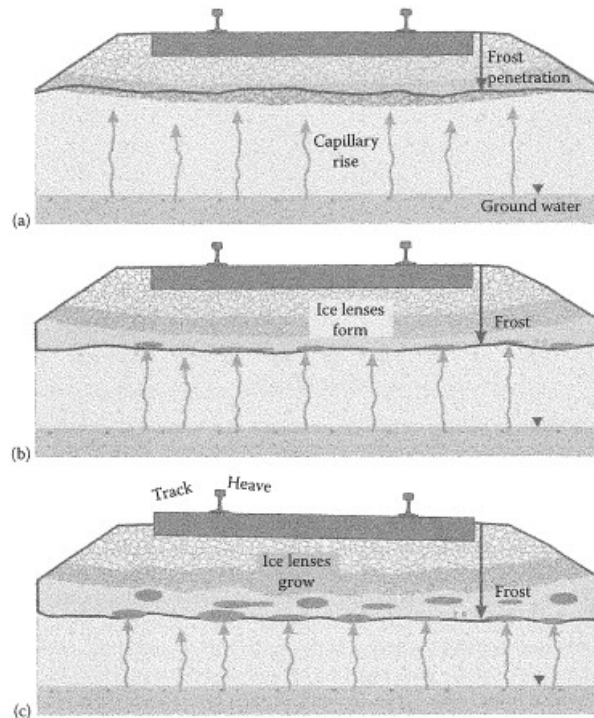
	Moisture (percent by mass)
At the end of infiltration	29
After 1 day	20.2
2 days	18.7
7 days	17.5
30 days	15.9
60 days	14.7
156 days	13.6

Kenttäkapasiteetin suuruuden tarkka määrittely saattaa siis tilanteesta riippuen olla vaikeaa. Näennäisen kenttäkapasiteetin suuruuteen vaikuttavina asioina voidaan kuitenkin tunnistaa ainakin seuraavat tekijät:

- Hienorakeiset maalajit pidättävät enemmän vettä kuin karkearakeiset.
- Materiaalissa mahdollisesti olevan saven tyyppi on vaikuttava tekijä. Montmorilloniitin lisääntyminen lisää maamateriaalin kykyä pidättää vettä
- Orgaaninen aines lisää maamateriaalin vedenpidätyskykyä
- Kastuneen kerroksen paksuus ja maan aikaisempi kosteustila vaikuttavat kenttäkapasiteettiin ja kosteuden uudelleenjakautumisen nopeuteen. Mitä suurempia maassa alkutilanteessa vallitseva kosteustila ja sateen seurauksena kastuneen kerroksen paksuus ovat, sitä hitaammin kosteuden uudelleenjakautuminen tapahtuu. Myös kenttäkapasiteetti muodostuu esitettyjen tekijöiden myötä isommaksi.
- Koko maaprofiili kaikkine kerroksineen vaikuttaa kenttäkapasiteetin suuruuteen. Tietynlaiset maakerrokset voivat hidastaa veden uudelleenjakautumista maaprofiilissa. Tällaiset kerrokset maassa suurentavat kenttäkapasiteettia estäessään veden jakautumista alaspäin yläpuolisista kerroksista.
- Kokonaishaihdunta vaikuttaa siihen, miten vesi poistuu maaprofiilista ylöspäin. Kokonaishaihdunnan suuruus ja muuttuminen ajan suhteen voivat vaikuttaa veden virtaussuuntiin maaprofiilissa. [42]

4.4 Kapillaarisuuden ja routimisilmiön suhde

Li et. al. liittävät maamateriaalin kapillaariominaisuudet voimakkaasti routimiskäyttäytymiseen. Routimisen perustavan olevien jäälinsien kuvataan muodostuvan veden kapillaarisen nousun seurauksena. Jotta maa voi routia ja routanousua tapahtua, on kolmen kriteerin täytyttävä. Lämpötilan tulee olla tarpeeksi alhainen, on oltava olemassa vedenlähde ja maan tulee olla sellaista, että se pitää yllä kapillaarista nousua. Otollisimpia maalajeja routimiselle ovat sellaiset, joissa sekä kapillaarinen nousukorkeus että vedenläpäisevyys ovat korkeita. Kuvassa 50 on esitetty kuvaus routimisilmiöstä. [7]



Kuva 50. Li et. al. mukainen, veden virtausta syvältä maasta jäätymsrintamaan korostava, havainnekuva jäälinssien ja routanousun muodostumisesta radalla. [7]

Li et. al. eivät nosta esille yleisesti routimiseen liitettävää jäätymsimupainetta (eng. cryo suction) routimista käsittelevän osion yhteydessä. Pylkkänen ja Nurmikolu ovat tehneet kirjallisuustutkimusta routimisilmiöön liittyen [43]. Pylkkänen ja Nurmikolu toteavat lukuisien lähteiden tarkastelun jälkeen jäätymsimupaineen olevan merkittävin yksittäinen tekijä veden kulkeutumiselle jäälinssiin. Matriisi-imupaineen kuvataan nostavan vettä alemmista maakerroksista lähelle routarajaa, mistä jäätymsimupaine imee veden jäälinssiin. Matriisi-imupaineen nostattama vesi myös mahdollistaa virtauskanavaverkostojen muodostumisen osittain kyllästyneeseen maahan ja siten mahdollistaa veden kulkeutumisen syvältä maaperästä kohti kasvavaa jäälinssiä. Voidaan ajatella Li et. al. käsityksen kapillaarisuuden ja routimisen suhteesta olevan keskittynyt veden virtaamiseen syvemmältä maasta lähelle routarajaa, jonka jälkeen jäätymsimupaine imee veden jäälinssiin. Pylkkänen ja Nurmikolu esittävät työssään vielä neljännen routimiskriteerin, jonka mukana routimispaineen pitää ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttama kuormitus.

Li et. al. kuvaavat routanousua vähentävien toimenpiteiden käsittävän jäälinssien muodostumiselle otollisen maamateriaalin poiskaivamisen ja sen korvaamisen materiaalilla, joka omaa pienen kapillaarisuuden. Kaiken materiaalin korvaamista ei pidetä välttämättömänä vaan hyvin vettä johtavan kerroksen sijoittaminen kaivannon pohjalle estää veden kapillaarisen nousun syvemmältä maasta toimien kapillaarikatkokerroksena. Toinen mahdollisuus on eristelevyjen käyttö. Tällöin estetään maan jäätyminen. [7]

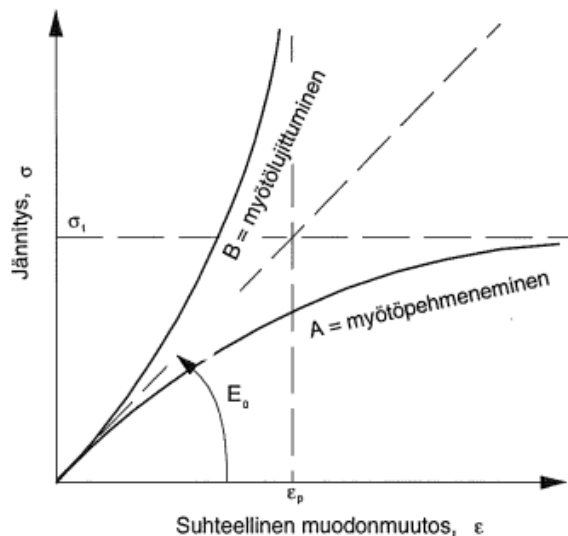
5. ALUSRAKENTEEN KUORMITUSKÄYTTÄYTYMINEN

5.1 Maamateriaalin kuormituskäyttäytymisen perusteet

Vesi saa aikaan muutoksia alusrakenteen kuormituskäyttäytymisessä. Jotta näiden muutosten merkitystä voidaan ymmärtää, on syytä tarkastella maamateriaalin käyttäytymisen peruspiirteitä aluksi yleisellä tasolla.

Radan rakennekerrokset altistuvat elinkaarensa aikana jopa miljoonille kuormitusyksiköille. Kun ratarakenne suunnitellaan siten, että akseliylitysten aiheuttama rasitus on selvästi alle radan komponenttien murtokuorman, on radan komponentteihin kohdistuva muodonmuutos lähestulkoon täysin palautuvaa. Radan rakennemateriaalien muodonmuotuskäyttäytyminen on jännitystilasta riippuvaista eli epälineaarista. [6]

Kuvassa 51 on esitetty muodonmuutoksen ja jännityksen välinen riippuvuus myötöpehmenevillä ja myötölujittuvilla materiaaleilla. Myötöpehmenevillä materiaaleilla jäykkyys pienenee jännitystason kasvaessa. Myötöpehmeneviä materiaaleja ovat koheesiomaalajit. Radan alusrakennemateriaalit ovat kuitenkin kitkamaalajeja, joilla materiaalin jäykkyys kasvaa jännitystason noustessa. [29]

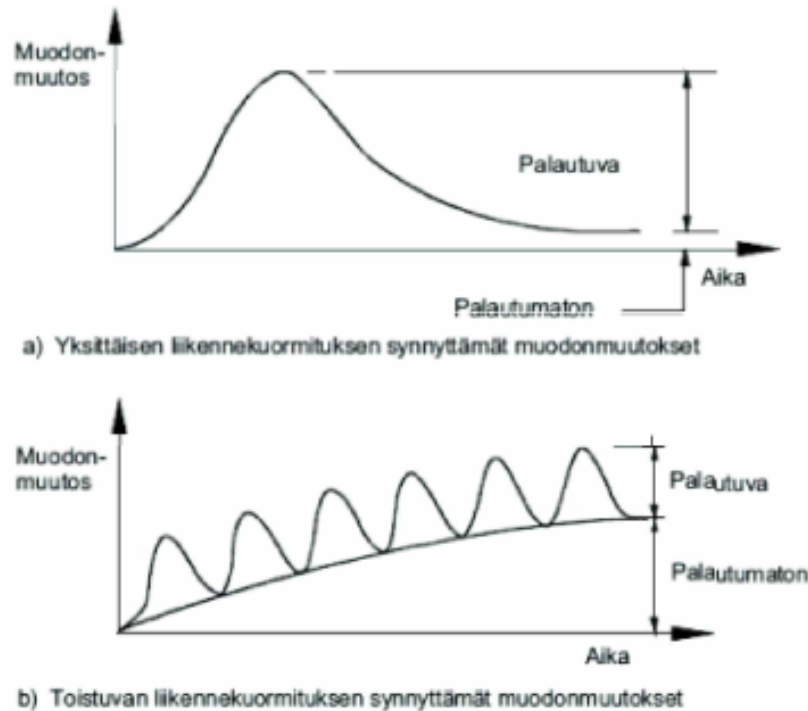


Kuva 51. Muodonmuutoksen ja jännityksen välinen riippuvuus myötöpehmenevillä ja myötölujittuvilla materiaaleilla. (viitattu lähteestä [29], esitetty alun perin lähteessä [44])

Brecciaroli ja Kolisoja tarkentavat, että edellä esitetty kitkamaalajien myötölujittuva luonne pätee vain tapauksissa, joissa kuormitustaso ei ole lähellä murtojännitystä. Kun kuormitustaso lähestyy murtojännitystä, muuttuvat kitkamaalajitkin myötöpehmeneviksi ennen murtohetkeä. [45]

Kuten todettua, altistuu ratarakenne toistuvalla liikennesrasitukselle. Jokaisen kuormitusyklin kohdalla rakenteen toiminta on pääasiassa elastista [7]. Kuitenkin kuormitusyksiköt aiheuttavat myös kumuloituvaa, plastista muodonmuutosta [7]. Palautuvan muodonmuu-

toksen osuus on selvästi suurempi kuin pysyvän, mutta jokainen kuormituskerta aiheuttaa periaatteessa myös ainakin pienen määrän pysyvää muodonmuutosta (kuva 52). Kuormituskertamäärän kasvaessa kumulatiivisen pysyvän muodonmuutoksen määrä kasvaa lopulta kriittisen suureksi. Se, kuinka suuri kumuloidun pysyvän muodonmuutoksen taso edustaa kriittistä tasoa, riippuu rakenteesta. [6]



Kuva 52. Ratarakennemateriaalien muodonmuutuskäyttäytyminen kuormituksen alaisena. (Viitattu lähteestä [29]. Esitetty alun perin lähteessä [46].)

Resilient-moduuli (= jäykkyyshmoduuli [3], jäännösmoduuli [29]) on sekä kitkamaalajien että koheesiomaalajien kohdalla tärkein materiaaliominaisuus radan alusrakennemateriaalissa. Radan toiminta riippuu laajalti rakennekerrosten ja pohjamaan resilient-moduuleista. Rakennekerrosten resilient-moduuleilla on suuri rooli radan suunnittelussa ja sen toiminnan analysoinnissa kuormituksen ollessa tyypillisesti syklistä ja dynaamista. Jotta radan jännitystila, muodonmuutostaso ja taipuma voidaan laskea, on resilient-moduuli tunnettava. [7]

Resilient-moduuli kuvaa maamateriaalin elastista jäykkyyttä. Resilien-moduuli määritetään yleensä syklisen kolmiaksaalikokeen tuloksista kaavan 22 mukaisesti.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}, \quad (22)$$

jossa

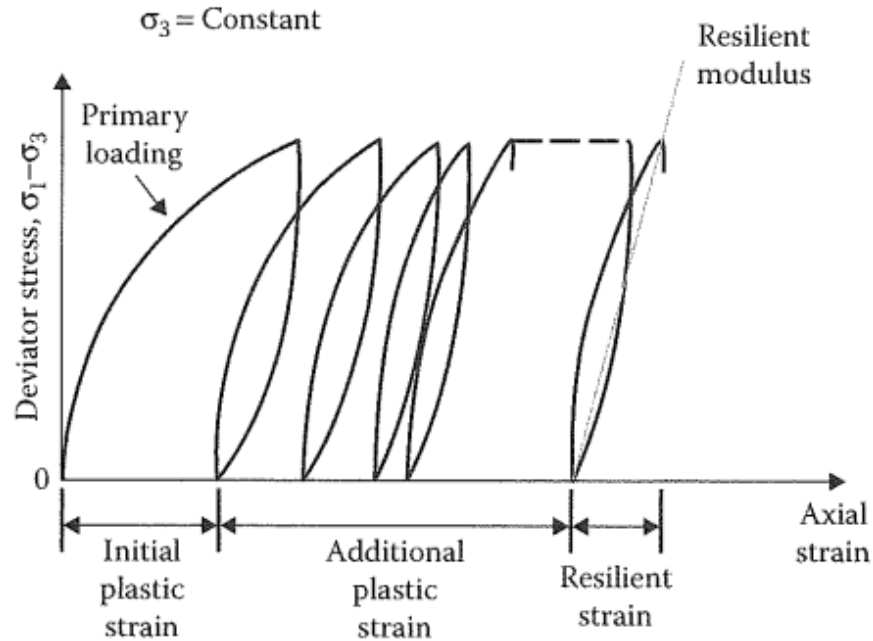
M_r on resilient-moduuli

σ_d on deviatorinen jännitys ($\sigma_1 - \sigma_3$)

ϵ_r on palautuva muodonmuutos aksiaalisen jännityksen σ_1 suunnassa, sellipaineen σ_3 pysyessä vakiona [7]

Kuvassa 53 on esitetty resilient-moduulin määrittäminen sellaisen syklisen kolmiaksaalikokeen tuloksista, jossa deviatorinen jännitys on jokaisella kuormitusyhdellä sama. Kohta, jossa jatkuva viiva muuttuu vaakasuoraksi katkoviivaksi, tulee ymmärtää syklisen

suurta määrää kuvaavana ilmaisuna. Palautumattomien muodonmuutosten osuus yleensä pienenee kuormituskertojen lisääntyessä [6]. Tämä näkyy kuvassa siten että yksittäisen syklin tuottaman silmukan vaaka-akselin suuntainen leveys muuttuu yhä pienemmäksi syklimäärän lisääntyessä. σ_3 edustaa sellipaineen avulla näytteeseen tuotettua, joka suunnassa saman suuruista jännitystä. σ_1 on kuormitusmännän tuottama aksiaalinen lisäjännitys. Kolmiaksaalikoelaitteiston toiminta käsitellään tarkemmin työn kokeellisen osion yhteydessä. On huomattava, että tässä työssä käsiteltävät kolmiaksaalikoeket toteutettiin resilient-moduulin määrittämisen sijaan siten, että deviatorista jännitystasoa nostettiin tietyn syklimäärän välein pyrkien selvittämään materiaalin kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 53. Kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen toistuvan kuormituksen alaisena ja resilient-moduulin määrittäminen. [7]

Resilient-moduulin arvo riippuu jännitystasosta. Yleisimmin käytetty resilient-moduulin jännitysriippuvuuden kuvaustapa on $K-\theta$ -malli, joka on alun perin Brownin ja Pellin [48] kehittämä. Kyseisen mallin alkuperäinen esitystapa ei ole mittayksiköiden suhteen korrekti, mikä vuoksi on suositeltavaa käyttää siitä kaavan 23 muotoa. [47]

$$M_r = K_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2}, \quad (23)$$

jossa

M_r on resilient-moduuli

K_1 on moduuliluku

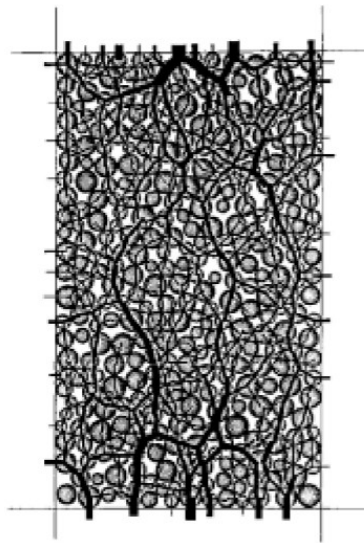
K_2 on moduuliekspONENTTI

θ on pääjännitysten summa

θ_0 on vertailujännitys

Kuten kuvasta 53 havaitaan, muodostuu maamateriaaliin toistuvan kuormituksen johdosta kumuloituvaa plastista muodonmuutosta. Tällaista muodonmuutosta voi tapahtua niin tukikerroksessa, alusrakenteessa kuin pohjamaassakin. Yleensä plastinen muodonmuutos ei tapahdu tasaisesti vaan johtaa epätasaisuusongelmiin radalla. [7]

Jännitys-muodonmuutoskäyttäytymistä selitetään yleensä jatkuvan aineen mekaniikan eli kontinuumimekaniikan näkökulmasta. On kuitenkin syytä muistaa, että karkearakeisten materiaalien muodonmuutoskäyttäytyminen kuormitettaessa on kuitenkin monimutkainen ilmiö, johtuen materiaalien partikkelimaisesta luonteesta. Karkearakeisten materiaalien mekaaniseen toimintaan liittyvien mekanismien ymmärtäminen edellyttää partikkelitaso tarkasteluja. Jännitysten voidaan olettaa välittyvän partikkelikontaktien välityksellä. Tällöin rakeet muodostavat yhdessä partikkelikontaktien kanssa ketjuja, joita pitkin jännitykset välittyvät rakenteessa. Jännitys jakauma rakenteen sisällä ei ole siis tasainen. Kuvassa 54 on esitetty tilannetta havainnollistava simulointiesimerkki. [6]



Kuva 54. Simulaatioesimerkki biaksiaalisessa kuormituksessa lasketuista jännitysketjuista. Viivan leveys kuvaa mobilisoituvan jännityksen suuruutta. [41]

5.2 Kitkamaalajien muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät

Sekä palautuviin että palautumattomiin muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät näyttävät olevan kirjallisuudessa varsin hyvin tunnettuja. Kuitenkin muutamien tekijöiden merkitys vaikuttaa olevan vielä epäselvä. Suurin osa aihepiiriin liittyvistä tutkimuksista on keskittynyt resilient-moduulin tutkimiseen pysyvän muodonmuutoskäyttäytymisen tutkimisen ollessa haastavampaa [45]. Tarkastellaan seuraavaksi Brecciarolin ja Kolisojan tekemän kitkamaalajien muodonmuutosominaisuuksiin keskittyvän kirjallisuustutkimuksen johtopäätöksiä.

Resilient-moduuliin vaikuttavat tekijät

Toistuvalla kuormituksella altistettujen karkearakeisten maamateriaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä vallitseva jännitystaso on yksi merkittävimmistä. Useita lähteitä tarkastelemalla Kolisoja ja Brecciaroli ovat todenneet, että resilient-moduuli kasvaa selvästi pääjännitysten summan kasvaessa mutta vain vähän deviatorisen jännityksen kasvaessa. Jos penkereessä ei tapahdu suurta plastista deformaatiota, resilient-moduuli ei käytännössä riipu lainkaan deviatorisen jännityksen tasosta. [45]

Jännityshistorialla, kuormituksen kestolla ja frekvenssillä on korkeintaan hyvin pieni vaikutus resilient-moduuliin tyypillisten ratarakenteissa käytettyjen karkearakeisten materiaalien tapauksessa. [45]

Materiaalin tiiviystilan vaikutuksesta resilient-moduuliin on olemassa monenlaisia näkemyksiä. Joissain tutkimuksissa vaikutus on arvioitu varsin mitättömäksi, kun taas toisissa resilient-moduulin on todettu kasvavan tiiviystilan kasvaessa. [45]

Sillä, kuinka sekarakeista materiaali on, on jonkin verran vaikutusta materiaalin resilient-moduuliin. Monien tutkimusten mukaan avoimen rakeisuusjakauman omaava materiaali tuottaa hieman suuremman resilient-moduulin kuin suhteistunut materiaali. [45]

Yksittäisten rakeiden ominaisuudet voivat vaikuttaa resilient-moduuliin. Näistä ominaisuuksista tärkeimmät ovat mineraloginen koostumus ja raemuoto. Murskatut kiviainekset, joiden raemuoto on kulmikas ja pinta karkea, tarjoavat suuremman kuormituskestävyyden ohella suuremman resilient-moduulin kuin pyöreämmät luonnonkiviainesmateriaalin partikkelit.

Resilient-moduuli pienenee, kun vesipitoisuus kasvaa. Tämä pätee erityisesti korkeiden saturaatiasteiden tapauksessa. Selittävinä tekijöinä voidaan nähdä veden rakeiden pintoja voiteleva vaikutus ja huokoskulmaveden lujutta lisäävän vaikutuksen pienentäminen vesipitoisuutta lisättäessä. Jälkimmäinen tekijä on nähtävä pätevän tilanteessa, jossa kyllästysaste on jo ylittänyt tason, jolla huokoskulmavesi tuottaa suurimman lujutta lisäävän vaikutuksen. Myös poissonin luku pienenee saturaatiasteen noustessa. [45]

Pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät

Jännitystaso on yksi merkittävimmistä pysyvien muodonmuutosten muodostumiseen vaikuttavista tekijöistä kitkamaalajeilla raideliikenteen kaltaisen kuormituksen tapauksessa. Pysyvät muodonmuutokset kasvavat deviatorisen jännityksen kasvaessa ja kokonaisjännitysten pienetessä. [45]

Kuormituksen nopeus vaikuttaa pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Mitä nopeammin kuormitus tapahtuu, sitä suurempia muodostuvat pysyvät muodonmuutokset ovat.

Jännityshistorialla voi olla vaikutusta pysyvien muodonmuutosten kehittymiseen. Aikaisemmat kuormitukset pienentävät muodostuvan pysyvän muodonmuutoksen määrää, mikäli ne eivät löyhdytä maamateriaalia. Jos maamateriaali löyhtyy, vaikutus pysyvien muodonmuutosten muodostumiseen on päinvastainen. [45]

Pääjännityssuuntien kuormitustilanteessa tapahtuva kiertyminen suurentaa pysyviä muodonmuutoksia. [45]

Kuormituskertojen lukumäärän vaikutus tunnetaan varsin hyvin. Jokainen kuormituskerta saa aikaan pienen lisäyksen pysyvään muodonmuutokseen. [45]

Materiaalin tiiviystilalla on selkeä vaikutus pysyvään muodonmuutoksen muodostumiseen. Materiaalin kyky vastustaa pysyviä muodonmuutoksia kasvaa tiiviystilan noustessa. [45]

Hienoainespitoisuuden kasvu lisää pysyviä muodonmuutoksia. Rakeisuuskäyrän muodon muiden piirteiden vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin on epäselvä. [45]

Raemuoto vaikuttaa materiaalien tiivistymiskäyttäytymiseen ja sitä kautta epäsuorasti pysyvien muodonmuutosten suuruuteen. Liuskeiset tai pitkänomaiset rakeet ovat alttiita murtumiselle. Tällöin hienorakeinen aines lisääntyy ja murtuneet partikkelit uudelleenjärjestyvät tuottaen samalla pysyvää muodonmuutosta. [45]

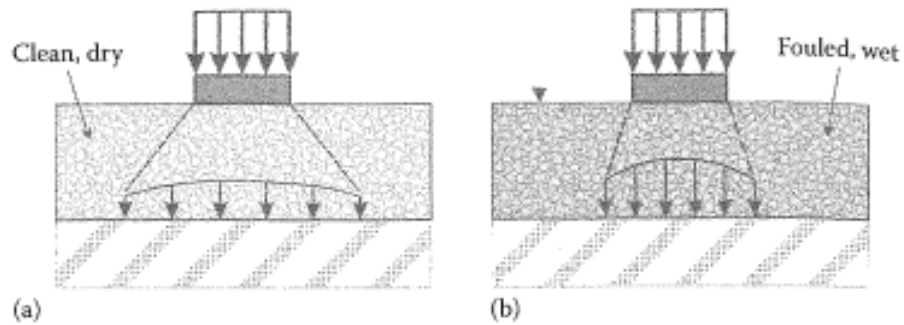
Jos maan kyllästysaste on suuri ja maamateriaali on huonosti vettä läpäisevää, on olemassa riski huokosveden ylipaineen kehittymiselle. Huokosveden ylipaine johtaa tehokaiden jännitysten laskuun ja tätä kautta maamateriaalin heikkenemiseen kykyyn vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Riski huokosveden ylipaineen kehittymiseen kasvaa erityisesti, jos kuormitus on toistuvaa. [45]

5.3 Maamateriaalin lujuuden muodostuminen ja vesipitoisuuden vaikutus muodonmuutuskäyttäytymiseen

Jo kappaleessa 3.3.3 huomattiin että vesi aiheuttaa ongelmia ratarakenteen toiminnassa. Monet näistä ongelmista ilmenevät erityisesti alusrakenteessa. Myös Brecciaroli ja Kolisoja olivat edellisen kappaleen mukaisesti todenneet veden vaikuttavan kitkamaalajien muodonmuutuskäyttäytymiseen. Tässä osiossa keskitytään maamateriaalin lujuuden muodostumiseen sekä vesipitoisuuden ja kuormituskestävyyden suhteen arviointiin. Kyseisiä asioita tarkastellaan sekä kitka- että koheesiomaalajien näkökulmasta. On kuitenkin syytä huomata, että radan alusrakennemateriaalit ovat käytännössä kitkamaalajeja [45].

Indraratna on tutkinut radan alusrakennemateriaaleja kuivatustekniikan näkökulmasta. Alusrakenteella on tärkeä rooli radan kuivatuksessa. Vedellä kyllästyessään rata altistuu liikennekuormituksen alaisena huokosveden ylipaineen kehittymiselle. Kun maan vedenjohtavuus on tarpeeksi pieni, muodostunut huokosveden ylipaine ei ehdi poistua ennen seuraavaa akselinyllitystä. Tämä johtaa kumuloituvaan huokosveden ylipaineeseen. Alusrakenteella voidaan nähdä olevan kaksi selkeää roolia veteen liittyen; sen on johdettava vesi sivusuunnassa ojiin lävitseen ja toisaalta sen on sallittava veden virtaus vedellä kyllästyneestä pohjamaasta ylöspäin estäen näin huokosveden ylipaineen kehittymistä. Tällöin alusrakennemateriaalin on luonnollisesti oltava pohjamaan materiaalia paremmin vettä johtavaa. [30]

Rakennekerrosten materiaalien laatu vaikuttaa kuormituksen jakautumiseen rakenteessa. Kuvassa 55 on esitetty, kuinka kuorma jakautuu hyvälaatuisessa ja hienontuneessa karkearakeisessa materiaalissa. Hyvälaatuinen materiaali päästää veden virtaamaan paremmin lävitseen ja täten omaa suuremman jäykkyyden pystyen jakamaan kuormaa laajalle alueelle (kuva 55 a). Hienontunut materiaali kerää vettä sisäänsä ja pienemmän jäykkyyden vaikutuksesta kuormitus ei jakaudu yhtä laajalle alueelle (kuva 55 b). [7]



Kuva 55. Yksinkertaistettu malli kuormituksen jakautumisesta hyvin vettä läpäisevässä (a) ja huonon vedenläpäisevyyden omaavassa kyllästyneessä karkearakeisessa maamateriaalissa. (Viitattu lähteestä [7], jossa mukailtu lähteen [49] perusteella.)

Veden vaikutusmekanismeista alusrakenteessa ovat kirjoittaneet esimerkiksi Li et al [7]. Tarkastellaan seuraavaksi veden aiheuttaman vaurioitumisen periaatteita ja vauriotyyppejä alusrakenteessa.

Alusrakenteeseen liittyvien ongelmien pohjimmainen syy on usein veden liian pitkään tapahtuva viipyminen alusrakenteessa. Yleisesti ottaen liiallinen kosteus alusrakenteessa johtaa seuraaviin muutoksiin materiaalien käyttäytymisessä:

- resilient-moduulin aleneminen
- suuremmat plastiset muodonmuutokset
- pienempi leikkauslujuus [7] [34]

Kyseiset vaikutukset pätevät Li et al. mukaan sekä karkearakeisille kitkamaalajeille että hienorakeisille koheesiomaalajeille. Vaikutusmekanismien kuvataan olevan kuitenkin kummankin tyyppisille maalajeille erilaiset. [7]

Tarkastellaan seuraavaksi komponentteja, joista maan lujuus muodostuu. Tehokas jännitys (σ') määrittää kitkamaan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Tämä saadaan, kun maassa vallitsevasta kokonaisjännityksestä vähennetään huokosvedenpaine kaavassa 24 kuvatulla tavalla. [7]

$$\sigma' = \sigma_T - u_w, \quad (24)$$

jossa

σ_T on kokonaisjännitys

u_w on huokosveden paine

Kitkamaan leikkauslujuus (s) saadaan, kun maassa vallitseva tehokas jännitys kerrotaan maan kitkakulman (ϕ) tangentilla kaavan 25 mukaisesti [7]. Kitkakulman suuruus riippuu maalajin suhteellisesta tiivyydestä, tasarakeisuudesta ja raemuodosta [50].

$$s = \sigma' \tan \phi \quad (25)$$

Huokosvedenpaine pienentää siis maan lujuutta laskiessaan tehokkaan jännityksen arvoa edeltävien kaavojen mukaisesti. Huokosvedenpaineen noustessa kokonaisjännityksen tasolle, menettää maa kaiken lujuutensa tehokkaan jännityksen ja leikkauslujuuden arvojen pienentyessä nollaan. [7]

Kun huomioidaan vielä mahdollisen koheesion tuoma lisä lujuuteen, voidaan maan kokonaislujuus (τ_f) esittää kaavan 26 mukaisesti [7]. Koheesiotermiin (c') liitetty heitto-merkki viittaa tehokkaaseen koheesioon eli esimerkiksi huokoskulmaveden tuottama näennäinen koheesio ole luettavissa tähän.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \Phi \quad (26)$$

Kaava 26 kuvaa maan lujuutta täysin kyllästyneen tai täysin kuivan maan tapauksessa. Kuten jo kappaleessa 4.2 todettiin, negatiivisen paineen alainen vesi, kuten huokoskulmavesi tai kapillaarisesti nouseva vesi, nostaa tehokkaita jännityksiä rakeiden välillä ja täten lisää maan lujuutta.

Fredlund ja Rahardjo kuvaavat tilanteen, jossa maa ei ole täysin kyllästynyttä ja saa lujuuslisää negatiivisen paineen alaisesta vedestä, kaavan 27 mukaisesti. Tällöin lujuusliisätermi liitetään kaavan 26 oikealle puolelle omana terminään. Osittain kyllästynyttä tilaa kuvaava kaava 27 eroaa aikaisemmista kaavoista myös siinä, että siinä on huomioitu ilmanpaineen vaikutus (u_a) jännityksiä laskettaessa myös kitkaominaisuuksiin liittyvässä lujuustermissä. Fredlund ja Rahardjo käyttävät kitkakulmana maan sisäistä, tehokasta kitkakulmaa toisin kuin Li et al. Muuttujien symbolit on yhtenäistetty suhteessa edeltäviin kaavoihin. On syytä huomata, että Fredlund ja Rahardjo määrittelevät kirjassaan termin ”osittain kyllästynyt” viittaavan tilanteeseen, jossa huokosissa oleva vesi on nimenomaan negatiivisen paineen alaisena [14]. Tällöin esimerkiksi täysin kyllästynyt kapillaarivyöhykkeen alaosa kuuluu nähdä lujuusteknisestä näkökulmasta osittain kyllästyneeksi tilanteeksi.

$$\tau_f = c' + (\sigma_T - u_a) \tan \Phi' + (u_a - u_w) \tan \Phi^b, \quad (27)$$

jossa

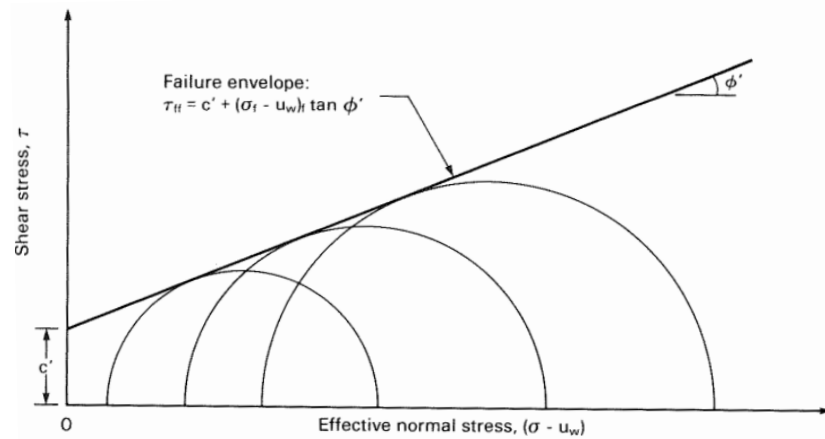
$(\sigma_T - u_a)$ on netto normaalijännitys murtotasossa murron tapahtuessa

Φ' on tehokas maan sisäinen kitkakulma

$(u_a - u_w)$ on matriisi-imupaine murtotasossa murron tapahtuessa

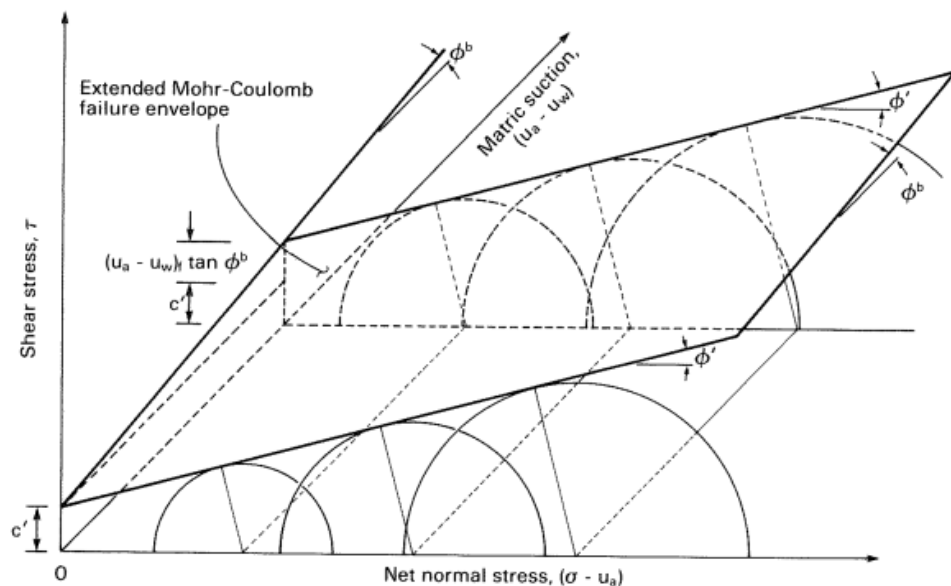
Φ^b on kulma, joka ilmaisee leikkauslujuuden kasvun suhteessa matriisi-imupaineen kasvuun

Tarkastellaan seuraavaksi täysin ja osittain kyllästynyttä tilannetta kuvaavia lujuuskaavoja graafisesti esitettyinä. Kaavan 26 kanssa yhteneväinen on kuvan 56 mukainen suora, joka esittää leikkausjännityksen tehokkaan normaalijännityksen funktiona leikkaustasossa leikkausmurron tapahtuessa. Suora voidaan määrittää piirtämällä koordinaatistoon useita staattisista kolmiaksaalikokeista saatuja Mohrin ympyröitä, joiden tangentti suora on. Mohrin ympyrän normaalijännitys-akselin leikkauskohdat määräytyvät murtohetkellä vallitsevan suurimman pääjännityksen (suurempi arvo normaalijännitys akselilla) ja sellipaineen (pienempi arvo normaalijännitys akselilla) perusteella. Suoran kulmakerroin ilmaisee maan kitkakulman ja pystyakselin leikkauspiste koheesion määrän. [14]



Kuva 56. Täysin kyllästyneessä tilanteessa vallitseva Mohr-Coulomb murtokriteeri. [14]

Osittain kyllästyneen maan tapauksessa murtotilaa kuvaavat mohrin ympyrät voidaan piirtää kolmiulotteiseen koordinaatistoon (kuva 57), jossa yksi akseli muodostuu leikkausjännityksestä ja kaksi muuta kaavassa 27 esitetystä jännitystilamuuttujista. Leikkausjännityksen ja normaalijännityksen muodostamalla tasolla matriisi-imupaine on nolla. Mohrin ympyrät piirretään tämän tason suuntaisesti kuitenkin siten että matriisi-imupaine määrää niiden paikan omalla akselillaan. Kun Mohrin ympyröitä siirretään matriisi-imupaine-akselia pitkin, ne ikään kuin skaalautuvat Φ^b -arvosta ja siirtomatkasta riippuen. Matriisi-imupaineen arvon kertominen Φ^b -kulman tangentilla tuottaa arvon, jonka mukainen on matriisi-imupaineakselilla nollassa eroavassa kohdassa sijaitsevan tangenttisuoran leikkausjännitysakselin suuntainen eroavaisuus matriisi-imupaineakselin nollassa sijaitsevasta tangenttisuorasta. Kun matriisi-imupaine-akselilla 0-kohdassa ja nollassa eroavassa kohdassa olevat Mohrin-ympyröitä hipovat tangenttisuorat yhdistetään tasoksi, saadaan murtopinta, joka määrittää maan murtokriteerin osittain kyllästyneessä tilanteessa. [14]



Kuva 57. Osittain kyllästyneessä tilanteessa vallitseva, laajennettu Mohr-Coulomb murtokriteeri. [14]

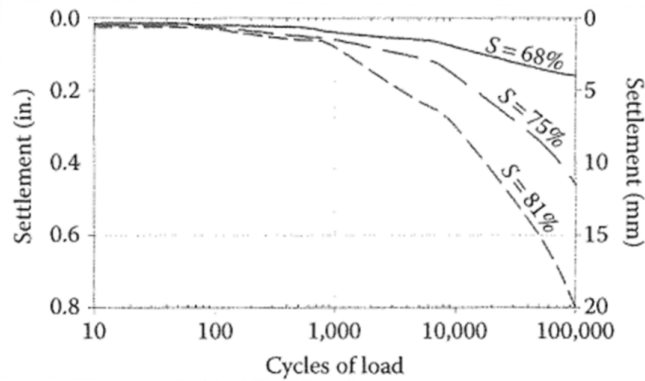
Matriisi-imupaineen vaikutusta leikkauslujuuteen kuvaava Φ^b -kulman arvo on joko yhtä suuri tai pienempi kuin tehokkaiden jännitysten vaikutusta leikkauslujuuteen kuvaava kitkakulman arvo. Fredlund ja Rahardjo ovat keränneet kirjallisuudesta taulukon 6 mukaiset koheesion, kitkakulman ja matriisi-imupaineen tuottamaa lujuuslisää kuvaavan kulman arvot erityyppisille maalajeille. [14]

Taulukko 6. Kokeellisia koheesion, kitkakulman ja Φ^b -kulman arvoja. [14]

Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (degrees)	ϕ^b (degrees)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop <i>et al.</i> (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop <i>et al.</i> (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	37.3	28.5	16.2	Consolidated drained triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	20.3	29.0	12.6	Constant drained triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	15.5	28.5	22.6	Consolidated water content triaxial	Satija, (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	11.3	29.0	16.5	Constant water content triaxial	Satija, (1978)
Madrid grey clay; $w = 29\%$,	23.7	22.5 ^a	16.1	Consolidated drained direct shear	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite; Hong Kong	28.9	33.4	15.3	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong	7.4	35.3	13.8	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Tappen-Notch Hill silt; $w = 21.5\%$, $\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3$	0.0	35.0	16.0	Consolidated drained multistage triaxial	Krahn <i>et al.</i> (1989)
Compacted glacial till; $w = 12.2\%$, $\rho_d = 1810 \text{ kg/m}^3$	10	25.3	7–25.5	Consolidated drained multistage direct shear	Gan <i>et al.</i> (1988)

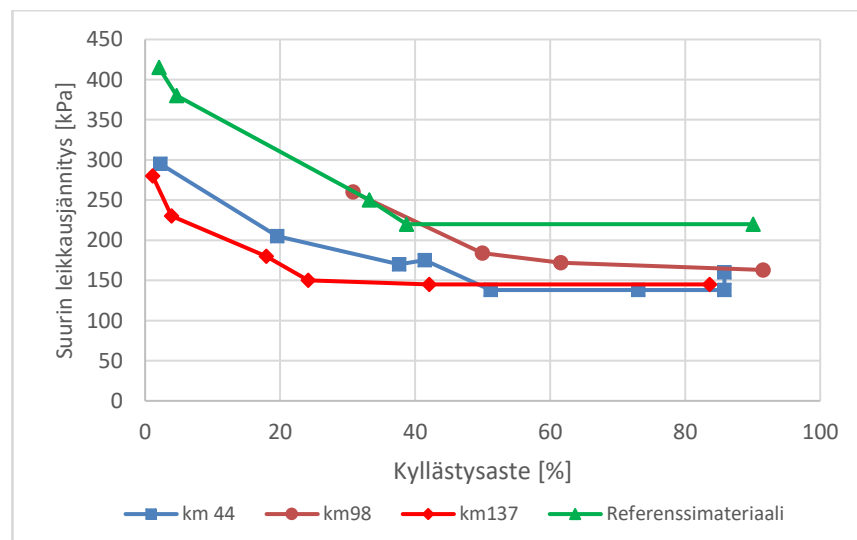
Teoreettisesti nähtynä negatiivisen paineen alainen vesi saa aikaan maamateriaalin leikkauslujuutta nostavan vaikutuksen siinä missä positiivisessa paineessa esiintyvä vesi alentaa maan leikkauslujuutta pienentäessään tehokkaita jännityksiä. Usein kuitenkin jo 100 %:a pienempienkin kyllästysasteiden nähdään pienentävän materiaalin kykyä vastustaa pisyviä muodonmuutoksia.

Li. et al. mukaan jo osittain kyllästyneessä maassa, jossa huokosvedenpaineen kuvataan olevan kutakuinkin nolla, vesi vaikuttaa maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin niitä huonontaan. Kuvassa 58 on esitetty saturaatioasteen vaikutus erään karkearaikaisen maamateriaalin muodonmuutoskäyttäytymiseen syklisen kuormituksen alaisena. Kuvasta huomataan, että mitä suurempi saturaatioaste on, sitä nopeammin ja suuremmiksi painumina ilmenevät pysyvät muodonmuutokset kasvavat. [7]



Kuva 58. Kyllästysasteen (S) vaikutus kitkamaan muodonmuutoksiin. (Viitattu lähteestä [7]. Esitetty alun perin lähteessä [51].)

Kuvassa 59 on esitetty eräiden työn kokeellisessa osiossa tarkemmin määriteltävien radan alusrakenteessa käytettävien hiekköjen staattisten kolmiaksausliikokeiden tulosten perusteella laaditut kyllästysasteen ja murtoon vaadittavan leikkausjännityksen väliset riippuvuudet. Tutkimuksen alustavien johtopäätösten mukaan huokoskulmaveden aikaansaama näennäinen koheesio lisää lujuutta 40-50 % kyllästysasteeseen asti [52]. Johtopäätös on useimpien kuvan 59 käyrien mukainen. Suuremmilla kyllästysasteilla huokoskulmaveden määrä kasvaa ilmeisesti niin isoksi, että veden pintajännityksen tuottama alipaine rakeita yhdistävässä vedessä muodostuu merkityksettömän pieneksi. Aiemmin esitetystä periaatteellisesta kuvassa 43 matriisi-imupaineen huippu sijoittuu noin 20 % tuntumaan kyllästysasteen suhteen, mikä vahvistaa ajatusta siitä, että saturaatioaste, joka jälkeen huokoskulmavesi ei käytännössä tuo enää merkittävää lisälujuutta, voi olla verrattain pieni. Kuvan 59 käyrien kuivimpien näytteiden kyllästysasteet ovat erittäin pieniä. Käytännössä muutamien prosenttien kyllästysasteet viittaavat lähinnä hygroskooppiseen veteen, joka ei varsinaisesti voi muodostaa näennäistä koheesiota aiheuttavaa huokoskulmavettä. Onkin siis ristiriitaista, että kuvan 59 käyrät eivät muistuta lainkaan periaatteellisen kuvan 43 käyrää, joka vesipitoisuutta kasvatettaessa on ensin nouseva ja vasta tämän jälkeen laskeva.



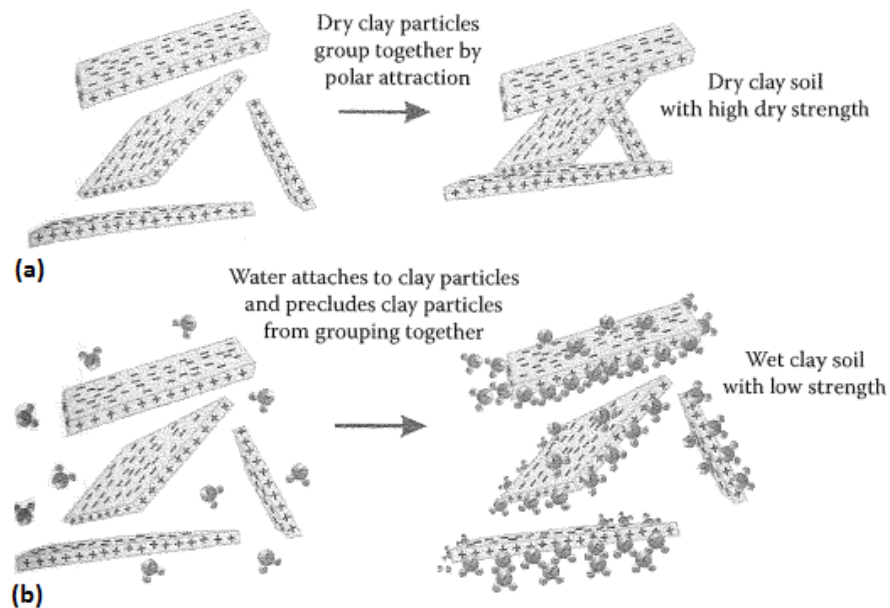
Kuva 59. Radan alusrakennemateriaalinäytteiden staattisten kolmiaksausliikokeiden tuloksia kyllästysasteittain. [52]

Vaikka huokosveden ylipaineen kehittyminen liitetään normaalisti täysin kyllästyneeseen tilaan, voidaan otaksua, että myös hyvin korkeilla kyllästysasteilla osittain kyllästyneessä tilassa saattaa syntyä huokosveden ylipainetta yksittäisistä huokosissa esiintyvistä ilmakuplista huolimatta. Li et al. mainitsevat kuitenkin veden heikentävän maamateriaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia jo tilanteessa, jossa huokosvedenpaineen kuvataan olevan kutakuinkin nolla, mikä viittaa siihen, etteivät Li et al. välttämättä oleta kuvan 58 mukaisen käyttäytymisen johtuvan huokosveden ylipaineen kehittymisestä vaan muista vaikutuksista, joiden kautta kasvava vesipitoisuus voi heikentää materiaalin lujuutta.

Kuvan 58 saturaatioasteet ovat niin isoja, että ne ovat kaiketi ohittaneet arvon, johon asti lisääntyvä huokoskulmavesi tuo lisälujuutta ja näin ollen pysyvien muodonmuutosten kasvu kyllästysasteen kasvaessa on mahdollista myös tästä näkökulmasta. Kuten jo kuvasta 43 voitiin tulkita, pienentää lisääntyvä vesimäärä matriisi-imupainetta tämän pisteen jälkeen. Osalla kuvan 59 materiaaleista koesarja on käsittänyt myös useita kokeita, joissa kyllästysaste on selvästi suurempi kuin kyllästysaste, johon asti huokoskulmaveden tuottama lujuuslisä kasvaa. Nämä kyseiset pisteet asettuvat kuitenkin siten että kasvava kyllästysaste ei näytä pienentävän materiaalin lujuutta. On huomattava kuitenkin, että korkeiden kyllästysasteiden tapauksessa vesipitoisuuden lisäyksen merkitys on erilainen staattisessa ja syklisessä kuormitustyyppissä syklisen koetyypin altistaessa huokosissa olevan veden ylipaineen kehittymiselle huomattavasti enemmän.

Tarkastellaan seuraavaksi, miten Li et al. näkevät vesipitoisuuden lisäyksen heikentävän koheesiomaalajien lujuutta. Li et al. selittävät koheesiomaalajien käyttäytymistä tarkastelemalla savipartikkelien käyttäytymistä.

Savipartikkelien leveät pinnat ovat varautuneet negatiivisesti ja syrjäpinnat positiivisesti. Kuivan saven tapauksessa partikkelit ovat voimakkaasti kiinni toisissaan negatiivisten syrjäpintojen pyrkiessä vetäytymään kiinni positiivisesti varautuneisiin lapepintoihin kuvan 60 a mukaisesti. Kyseinen käyttäytyminen johtaa myös saven kutistumiseen. Kun saveen tuodaan vettä, pyrkivät polaariset vesimolekyylit kiinnittymään savipartikkeleihin estäen näin savipartikkeleiden keskinäistä liittymistä (kuva 60 b). Tästä seuraa saven lujuuden aleneminen. Mitä voimakkaammin varautuneita savipartikkelit ovat, sitä enemmän vesimolekyylejä liittyy yksittäisiin partikkeleihin luoden paksun vesikerroksen. Mitä voimakkaammin varautuneita partikkelit ovat, sitä suurempaa saven paisuminen ja pehmeneminen ovat tuotaessa siihen vettä. [7]



Kuva 60. Vesimolekyylit pyrkivät kiinnittymään savipartikkeleihin ja tämän seurauksena savipartikkelien keskinäinen kiinnittymispyrkimys vähenee. [7]

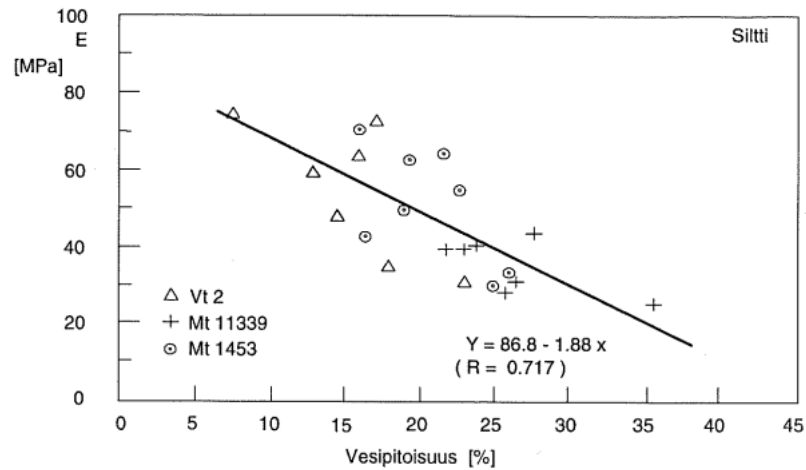
Li et al. esittämästä veden koheesiota heikentävästä vaikutusmekanismista käy ilmi, että litteiden savipartikkeleiden lape- ja syrjäpinnan eriävä sähköinen varaus on merkittävä koheesiota luova tekijä. Koheesion muodostavat tekijät voidaan kaiken kaikkiaan nähdä myös monimuotoisemmin. Esimerkiksi Mitchellin [53] mukaan koheesion voidaan nähdä muodostuvan kolmesta tekijästä. Partikkelit voivat muodostaa kemiallisia sidoksia karbonaatti, silika, alumiini, rautaoksidi ja orgaanisten yhdisteiden *sementaation* kautta. *Elektrostaattiset ja elektromagneettiset vetovoimat* voivat olla merkittäviä partikkelien etäisyyden ollessa alle 25 Å. Lisäksi Mitchellin mukaan koheesiota lisäävät *primääriset valenssidokset ja adheesio*.

Veden ja maamateriaalin kuormituskäyttäytymisen suhdetta on tarkastellut myös Ehrola, joka tarkastelee kyseisiä asioita tierakenteiden näkökulmasta. Ehrolan esittämät näkemykset pätevät myös radan rakennekerrosten tapauksessa soveltuvin osin.

Vesipitoisuuden ollessa selvästi alle kyllästysrajan, ei karkeisiin, hyvin vettäläpäiseviin kitkamaalajeihin muodostu kuormitettaessa huokosveden ylipainetta, joka alentaisi tehokasta normaalijännitystä ja täten maan leikkauslujuutta. Vedellä kyllästyneessä kitkamaassa saattaa sen sijaan huokosveden ylipaine nousta nopeassa kuormituksessa merkittävän suureksi, jolloin tehokas jännitys ja leikkauslujuus laskevat. Kyllästyneessä tilassa olevaan rakenteeseen saattaa liikkuvan kuormituksen seurauksena syntyä paineaalto, joka aiheuttaa suuria hydrostaattisia huokosvedenpaineita rakenteeseen. [29]

Hienorakeisissa maalajeissa vesipitoisuus kohoaa helposti lähelle kyllästysrajaa maakerrosten ollessa huonosti vettäläpäiseviä. Tällaisiin maarakenteisiin kehittyä kuormitettaessa huomattavan suuria huokosvedenpaineita, jotka purkautuvat hitaasti. Tällöin tehokas jännitys ja leikkauslujuus pienenevät. [29]

Leikkauslujuuden lisäksi maan muodonmuutos- ja kimmo-ominaisuudet ovat riippuvaisia tehokkaista jännityksistä. Vesipitoisuuden lisäys alentaa maan jäykkyyttä kuvaavan E-moduulin arvoa merkittävästi. Kuvassa 61 on esitetty siltistä koostuvalle tien alusrakenteelle erilaisissa vesipitoisuuksissa tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset. Kuva sisältää useilla eri teillä tehtyjen mittausten tuloksia. Kuvasta on havaittavissa, että vesipitoisuuden nostaminen laskee E-moduulin arvoa. [29]



Kuva 61. Vesipitoisuuden vaikutus alusrakenteen E-moduulin arvoon eräillä siltillä. [29]

Pohjaveden pinnan korkeudella on merkitystä mahdolliseen kapillaarisesti nousevan veden paineeseen. Mitä alempana pohjavesi on, sitä korkeammiksi kapillaarisesti nousevat vesipatsaat kehittyvät. Korkean kapillaarisen vesipatsaan yläpäässä veden alipaine on suurempi kuin matalan patsaan. Kuten aikaisemmin on jo todettu alipaine lisää maan lujuutta lisätessään tehokkaita jännityksiä. Suuri alipaine lisää maan lujuutta enemmän kuin pieni alipaine. [29]

6. KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN KOEMENETELMÄT JA MATERIAALIT

6.1 Kokeellisten tutkimusten tausta ja kokeissa käytetyt materiaalit

Kokeellisissa tutkimuksissa käytettiin pääasiassa Kouvola-Kotka rataosalta otettuja näytteitä. Kyseiset näytteet otettiin kesällä 2018 alun perin rakeisuuden ja putkessa tehtävän kapillaarisen nousun määrittämiseksi varten. Tutkimukset liittyivät kyseessä olevan rataosan alusrakennemateriaalien laadun selvittämiseen. Tuolloin myös putkessa tehtyjen kapillaarisuusmäärittysten tuloksia oli verrattu rataosan geometriamuutoshistoriaan mahdollista korrelaatiota etsien.

Näytepisteet, joista Kvl-Kot radan näytteet otettiin, oli valittu siten, että joukossa oli ennakko-odotusten mukaan sekä hyviä että huonoja materiaaleja sisältäviä kohtia. Näytteet otettiin 51:stä eri pisteestä. Näytteet kaivettiin tukikerroksen vierestä jätkänpolun kohdasta. Näytteet otettiin lähtökohtaisesti syvyysalueilta 300-600 mm ja 600-900 mm jätkänpolun pinnasta mitattuna. Mikäli kaivettaessa havaittiin selkeä maakerrosraja, otettiin vielä uudet näytteet kyseisen maakerrosrajan ylä- ja alapuolelta. Kolmiaksiaalikohteita varten Kouvola-Kotka radan näytteistä koostettiin vielä kaksi yhdistemateriaalia yhdistämällä useita yksittäisiä näytteitä.

Putkessa tehtyjen kapillaarisen nousun määrittysten ei ollut aikaisemmissa Kouvola-Kotka radan näytteille tehdyissä tutkimuksissa todettu ilmentävän materiaalin laatua suhteessa kyseisen rataosan geometriamuutoshistoriaan. Keväällä 2019 herännyt kiinnostus kapillaarimetrin hyödyntämismahdollisuuksiin radan alusrakennemateriaalien laadun määrittämisessä johti Sahi-mallisella kapillaarimetrillä tehtyyn koesarjaan, joka muodostaa tämän tutkimuksen kokeellisen osion ytimen. Kapillaarimetrikokeiden lisäksi kokeellinen osio pitää sisällään putkessa tehtyjen kapillaaristen nousun määrittysten, kolmiaksiaalikohteiden ja Proctor-kokeiden tulosten käsittelyä.

Kouvola-Kotka-radon näytteiden lisäksi kokeissa käytettiin rantaradalta (Helsinki-Turkurata) kolmesta pisteestä (km 44, km 98 ja km 137) vuonna 2017 otettuja alusrakennenäytteitä sekä suoraan kiviainestoimittajalta hankittua 0/8 hiekkaa, jonka ajateltiin edustavan laadukasta alusrakennemateriaalia. Kyseiset materiaalit hankittiin alun perin toisia, alusrakennemateriaalien käyttäytymistä käsitteleviä, tutkimuksia varten. Koska kiviainestoimittajalta hankittu 0/8 hiekka edusti kokeissa nykykäsityksen mukaan laadukasta alusrakennemateriaalia, viitataan siihen tästä lähtien nimityksellä referenssimateriaali. Rantaradan materiaalien nimet lyhennetään paikoin ilmaisuksi rr 44, rr 98 ja rr 137.

Kouvola-Kotka radalta otetut näytteet katkaistiin 8 mm seulalla rakeisuusmäärittysten yhteydessä. Työssä esitettävät rakeisuustiedot ja kokeiden tulokset käsittelevät 8 mm alitetta. Rantaradan materiaalit oli katkaistu hankinnan jälkeen 16 mm seulalla. Kaikki kokeet tehtiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen tutkimustiloissa.

6.2 Kapillaarisen nousun määrittäminen putkessa

Kouvola-Kotka radan näytteistä 59:lle tehtiin kapillaarisen nousun määrittäminen putkessa. Kyseinen menetelmä on suora tapa mitata kapillaarisuutta. Kokeet tehtiin Tampereen yliopiston maa-, pohja- ja ratarakenteiden laboratorion sisäistä koeohjetta mukailevalla

tavalla. Koe voidaan tehdä myös standardin SFS 1097-10 mukaisesti, jolloin sekä näytteen valmistus että kapillaarisen nousun tarkkailu suoritetaan tämän työn kokeista eroavalla tavalla. Kyseisessä standardissa kokeeseen viitataan termillä ”vedenimeytymiskorkeuden määrittäminen”. Myös kirjallisuudessa kapillaarisuuden suoraan määrittämiseen viitataan kyseisellä termillä [10]. Tässä työssä kyseistä termiä ei kuitenkaan käytetä koejärjestelyjen ollessa standardista eroavia. Standardin koejärjestelyt vaikuttavat joiltain osin epäkäytännöllisiltä mutta asiaa ei tarkastella tässä työssä tarkemmin.

Kokeisiin valittiin lähtökohtaisesti jokaisen näytepisteen 600-900 mm syvyydeltä otettu näyte. Mikäli kyseessä oli näytepiste, jossa oli havaittu maakerrosraja ja näytepisteestä oli otettu tämän rajan ala- ja yläpuoliset näytteet, tehtiin kokeet kummallekin näistä. Kokeet tehtiin myös rantaradan näytteille (3 kpl), referenssimateriaalille ja Kvi-Kot yhdistemateriaaleille (2 kpl).

Kokeet tehtiin läpinäkyvissä muoviputkissa, joihin näytteet tiivistettiin tiivistysraudan avulla. Tiivistysrauta on kuvassa 62 esitetty tiivistysväline, jonka kaksihaarainen pää työnnetään näyteputken ympärille ja tiivistys tehdään täristemällä putkea edestakaisin liikkein. Käytettyjen näyteputkien sisähalkaisijoiden vaihteluväli oli noin 6-10 cm. Kaukalo johon putket oli sijoitettu, täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Putkien yläpää suljettiin. Näyteputkien alapää ulottui 5 cm vedenpinnan alapuolelle. Vettä lisättiin kaukaloon kokeiden aikana siten että veden pinnasta tapahtuneen haihdunnan ja kapillaarisen nousun kautta kaukalosta kadonnut vesimäärä saatiin korvattua ja vedenpinta pidettyä vakiotasolla. Kuva 63 havainnollistaa koejärjestelyä.



Kuva 62. Tiivistysrauta.



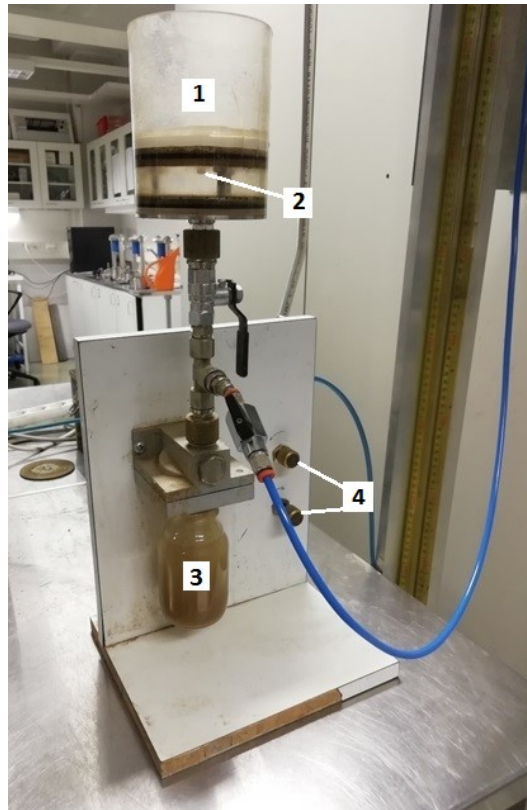
Kuva 63. Kapillaarisen nousun määrittäminen putkessa.

Kapillaarinen nousu arvioitiin ensisijaisesti visuaalisella havainnoinnilla. Joissain tapauksissa kapillaarisen nousukorkeuden arvo varmistettiin kokeen jälkeen kaatamalla kiviä pysynyt näytteen yläosa pois. Kaiken kaikkiaan visuaalinen nousukorkeuden arviointi osoittautui varsin tarkaksi menetelmäksi. Kouvola-Kotka materiaaleille tehtyjä kokeita pidettiin käynnissä vähintään viikon ajan. Rantaradan materiaaleille ja referenssimateriaalille tehtyjä kokeita pidettiin käynnissä 29-201 päivää tapauksesta riippuen. Eri-ikäisten koepituuksien merkitystä arvioidaan tarkemmin koetulosten tarkastelun yhteydessä kappaleessa 7.3.3.

6.3 Kapillaarisen nousun määrittäminen Sahi-mallin kapillaarimetrimillä

Putkessa tapahtuvan kapillaarisen nousun havainnoinnin lisäksi kapillaarisuutta voidaan mitata kapillaarimetrimillä. Kapillaarimetrimin käyttöä materiaalin kapillaarisen nousun määrittämisessä voidaan perustella ainakin kokeen nopeudella ja helppoudella suhteessa putkessa tapahtuvaan kapillaarisen nousun määrittämiseen. Kapillaarimetrikokeen antamia tuloksia ei kuitenkaan yleisesti pidetä kovin luotettavina. [10]

Kuvassa 64 on esitetty Sahi-mallinen kapillaarimetri, jolla kokeet tehtiin. Näyttemateriaalia kyllästettiin vedessä vähintään 20 tuntia ennen koetta. Näytesylinterin (1) välipohjan päälle asetettiin kostutettu huokospaperi ja tämän päälle lusikoitiin noin kuuden senttimetrin kerros vedellä kyllästettyä näytettä pyrkien välttämään ilmataskujen syntyä kerrosten väleihin. Lopuksi näyte mahdollisesti tiivistettiin koetyypistä riippuen. Näytteen korkeus mitattiin ja pinnalta poistettiin siihen mahdollisesti syntynyt hienoaineskalvo.



Kuva 64. Sahi-mallinen kapillaarimetri.

Näytteen valmistelun jälkeen näytteeseen kohdistettiin alipainekompressorin avulla tuotettu alipaine, joka sai veden tippumaan näytesylinterin välipohjan keskellä olevasta reiästä (2) laitteiston runko-osan läpi vedenkeräyssäiliöön (3). Imupainetta nostettiin veden tippumisnopeuden hidastuttua tarpeeksi kuristusventtiileitä (4) säätämällä. Kun reiästä roikkuva vesipisara paisui ja muuttui ilmatäytteiseksi palloksi lopulta puhjeten, voitiin todeta ilman tulleen läpi näytteestä ja kokeen päättyneen. Kyseisellä hetkellä vallinneen alipaineen arvo merkittiin kokeen tulokseksi eli saavutettu painetaso vesipatsaan korkeutena ilmaistuna edustaa veden kapillaarista nousukorkeutta näytteessä. Vallitsevaa painetasoa tarkkailtiin kuvan oikeassa reunassa näkyvällä putkimanometrillä ja kuvan ulkopuolisella digitaalisella painemittarilla. Painetason yksikkönä kokeissa käytettiin vesipatsaan korkeutta senttimetreissä ilmaistuna (cmH₂O).

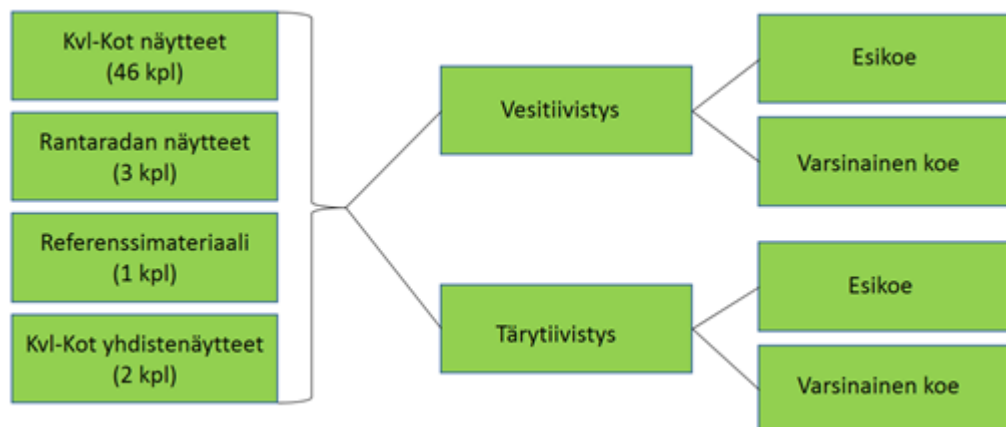
Sellaisista Kouvola-Kotka radan näytteistä, joille oli tehty putkikokeet, valittiin sattumanvaraisesti 46 näytettä, joille tehtiin kapillaarimetrikokeet. Lisäksi kapillaarimetrikokeet tehtiin rantaradan näytteille, referenssimateriaalille ja Kvi-Kot yhdistemateriaaleille. Jo ensimmäisten näytteiden kohdalla huomattiin tiiviystilan huomattava vaikutus kokeiden tuloksiin ja jokaiselle näytteelle katsottiin tarpeelliseksi tehdä kokeet kahdella eri tiiviystilalla. Löyhempään tiiviystilaan päästiin jättämällä näyte tiivistämättä. Kuitenkin tällöinkin näytteessä olleen veden voidaan otaksua hieman tiivistäneen näytettä verrattuna tilanteeseen, jossa näyte olisi ollut kuiva. Kun näyte oli sijoitettu sylinteriin, kopautettiin sen kylkeen kevyesti, jotta näytteen pinta asettui kutakuinkin tasaiseksi. Liki pitäen tasainen näytteen pinta mahdollisti näytteen korkeuden mittaamisen. Tällainen, pelkän veden avulla tapahtuva tiivistyminen ilman varsinaista tiivistystyötä, edustaa perinteistä tapaa valmistella Sahi-mallisen kapillaarimetrin näyte. Kyseisellä tavalla valmisteltuihin näytteisiin viitataan tuloksia tarkasteltaessa termillä "vesitiivistys". Tiiviimpään tilaan saatettaessa näyte tiivistettiin jo aikaisemmin esitetyn tiivistysraudan avulla. Näihin kokeisiin viitataan tuloksia tarkastellessa ilmaisulla "tärytiivistys". Putkikokeiden tiivistystavasta tämä eroaa kuitenkin siinä, että kapillaarimetrinäytteet olivat vedellä kyllästettyjä, mikä muutti materiaalien käyttäytymistä tärytyksen alaisena. Lisäksi on selvää, että tärytyks

vaikuttaa lyhyessä, paksuseinämaisessä näytesylinterissä olevaan matalaan näytteeseen hieman eri tavalla kuin noin metrin korkuisessa halkaisijaltaan ja seinämäpaksuudeltaan edellä mainittua näytesylinteriä pienemmässä kapillaarisen nousun tarkkailuputkessa olevaan näytteeseen.

Sekä vesi- että tärytiivistettyjen näytteiden kokeet koostuivat esikokeesta ja varsinaisesta kokeesta. Yhdelle näytemateriaalille tehtiin siis lähtökohtaisesti yhteensä neljä koetta. Esikokeen tarkoituksena oli haarukoida suurpiirteinen alipainetaso, jolla ilma tulee maanäytteestä läpi. Esikokeessa paineen nosto aloitettiin nollassa ja painetta nostettiin nopeammin kuin varsinaisessa kokeessa.

Varsinaisessa kokeessa paine nostettiin aluksi noin 50-75 %:iin esikokeen tuloksesta, minkä jälkeen painetta nostettiin nopeudella, joka oli selvästi pienempi kuin esikokeessa. Tällä tavalla tavoiteltiin tarkempaa tulosta kuin esikokeessa, jossa pyrkimyksenä oli selvittää karkeammalla tasolla kyseiselle maanäytteelle ominainen tulostaso, jotta hitaammin tehtävä varsinainen koe voitaisiin tehdä tarkemmin rajatulla painetasovälillä. Lisäksi esikoe toimi kontrollikokeena varsinaisen kokeen tulokselle. Mikäli varsinaisen kokeen tulos poikkesi liikaa esikokeen tuloksesta, tehtiin kyseiselle näytteelle uusi varsinainen koe. Näistä kahdesta koetuloksesta tarkasteluihin valittiin se, joka oli lähempänä esikokeen tulosta.

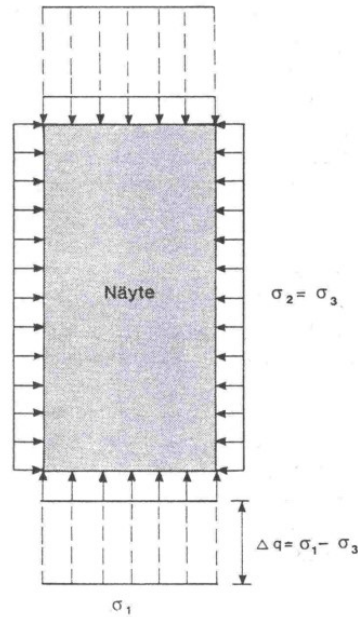
Kaikissa kokeissa määritettiin näytteen kuiva- ja märkämässä sekä näytteen tilavuus. Näin ollen jokaisesta näytteestä saatiin laskettua kuivatilavuuspaino ja vesipitoisuus kokeen lopussa. Kuvassa 65 on esitetty kaavio kapillaarimetrikokeiden suorituskaavio.



Kuva 65. Kapillaarimetrikokeiden suorituskaavio.

6.4 Sykliset kolmiaksaalikokeet

Karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksia voidaan tutkia syklisellä kolmiaksaalikokeella. Kyseisessä kokeessa sylinterinmuotoiseen, tiivistettyyn maanäytteeseen kohdistetaan kuvan 66 mukaiset kuormitukset. Sellipaine (σ_3) puristaa näytettä joka suunnassa. Lisäksi näytteeseen kohdistetaan aksiaalinen kuormitus (σ_1), joka on luonteeltaan syklinen. Yksittäinen kuormituspulssi on sinimuotoinen ja sen kesto on noin 0,1s [29]. [47]



Kuva 66. Kolmiaksaalinäytteen jännitystila. [47]

Syklisessä kolmiaksaalikokeessa mitattavat asiat vaihtelevat joissain määrin koekohtaisesti. Tämän työn yhteydessä tehdyissä kokeissa mitattavia asioita olivat sellipaine sekä näytteen aksiaalinen kuormitus ja muodonmuutos.

Mittaukset toteutetaan erinäisillä näytteeseen ja koelaitteistoon asennettavilla mitta-antureilla, joihin ei tämän työn yhteydessä tarkemmin perehdytä. Syklisen kuormituksen tarkoituksena on kohdistaa näytteeseen kohtuullisen hyvin todellista liikennekuormitusta vastaava kuormitus [29]. Kuitenkaan esimerkiksi pääjännityssuuntien kiertymistä ei kokeessa tapahdu. Lisäksi koe pyritään tekemään sellaisessa jännitystilassa, tiiviydessä ja kosteudessa, jotka vastaavat tutkittavan materiaalin olosuhteita todellisessa rakenteessa [29].

Sykliset kolmiaksaalikokeet oli tehty rantaradan materiaaleille ja referenssimateriaalille jo aikaisempien tutkimusprojektien yhteydessä osittain ja täysin kyllästetyissä kosteustiloissa. Tämän työn yhteydessä kyseiset kokeet tehtiin myös kahdelle Kvl-Kot radan näytemateriaaleista koostetulle yhdistenäytteelle kummassakin mainitussa kosteustilassa. Yhdistenäytteet valmistettiin yhdistämällä useita, rakeisuuksiltaan samankaltaisia, yksittäisiä näytteitä siten, että kolmiaksaalikokeen näytteen valmistukseen vaadittava näytemäärä (~25 kg) saavutettiin. Kvl-Kot yhdistenäytteet koostettiin siten että ne kuvasivat kyseiseltä rataosalta otettujen näytemateriaalien rakeisuuksiltaan kutakuinkin heikoimpia ja kestävimpiä materiaaleja. Lisäksi valintaan vaikutti yhdisteiden rakeisuuksien sopeva suhde rantaradan materiaalien rakeisuuksiin.

Näytteet valmistettiin tiivistämällä ne kerroksittain näytteenvalmistussylinterissä raskaalla (~1 kN) sullontakoneella. Tiivistysvaiheen vesipitoisuudet valittiin yleensä muodostamalla karkeita arvioita optimivesipitoisuudesta eivätkä ne aina vastanneet myöhemmin tehtyjen Proctor-kokeiden mukaisia optimivesipitoisuuksia.

Kokeissa käytettiin 30 kPa sellipainetta ja kuormitus tapahtui kuormitusportaittain. Kunkin kuormitusportaan kuormitustaso oli 10 kPa suurempi kuin edellisen ja kuormitusyhtälien määrä kuormitusportasta kohti oli 10 000 kpl. Kvl-Kot yhdistemateriaalien kuormitus

aloitettiin 40 kPa kuormitusportaalta. Muiden materiaalien kuormitus aloitettiin 20 kPa kuormitusportaalta.

Kaikissa kokeissa tehtiin ennen varsinaista kuormitusta esikuormitus ja moduulimääritys. Kvl-Kot näytteiden yhdistemateriaalien varsinaiset kuormitukset erosivat muiden materiaalien vastaavista. Kvl-Kot yhdistemateriaalien kuormitukset etenivät siten että ensin 7 % vesipitoisuudessa oleva näyte kuormitettiin siten, että kuormitus lopetettiin ennen näytteen murtumista. Tämän jälkeen näyte kyllästettiin ja tehtiin uusi kuormitussarja, joka jatkui murtoon asti. Muilla näytemateriaaleilla tehtiin vain yksi kuormitussarja, jota jatkettiin, kunnes näyte alkoi murtua. Kokeiden jälkeen näytteistä määritettiin vesipitoisuudet kerroksittain. Kuvassa 67 on esitetty kokeissa käytetty kolmiakselialikoelaitteisto.



Kuva 67. Kokeissa käytetty kolmiakselialikoelaitteisto.

6.5 Proctor-kokeet

Proctor-kokeessa pyritään simuloimaan työmaalla tehtävää tiivistystyötä ja selvittämään kuinka tiiviiksi maamateriaali on mahdollista saada milläkin vesipitoisuudella. Nykyisin käytössä on niin sanottu parannettu Proctor-koe, joka tuottama tiivistystyö vastaa nykyisenkaltaista tiivistyskalustoa paremmin kuin alkuperäisen koelaitteiston tuottama tiivistystyö. Kuvassa 68 on esitetty kokeissa käytetty välineistö. Pohjalevyn (1) päälle kiinnitetään aluksi koesylinteri (2), joka päälle puolestaan kiinnitetään sullonnan ajaksi kaukusrenkas (3). Sullonta tehdään Proctor-vasaralla (4), jossa ohjuritangon varassa liikkuva pudotuskappale iskee näytteen pintaa vasten asetettuun aluskappaleeseen.



Kuva 68. Proctor-kokeessa käytettävä välineistö.

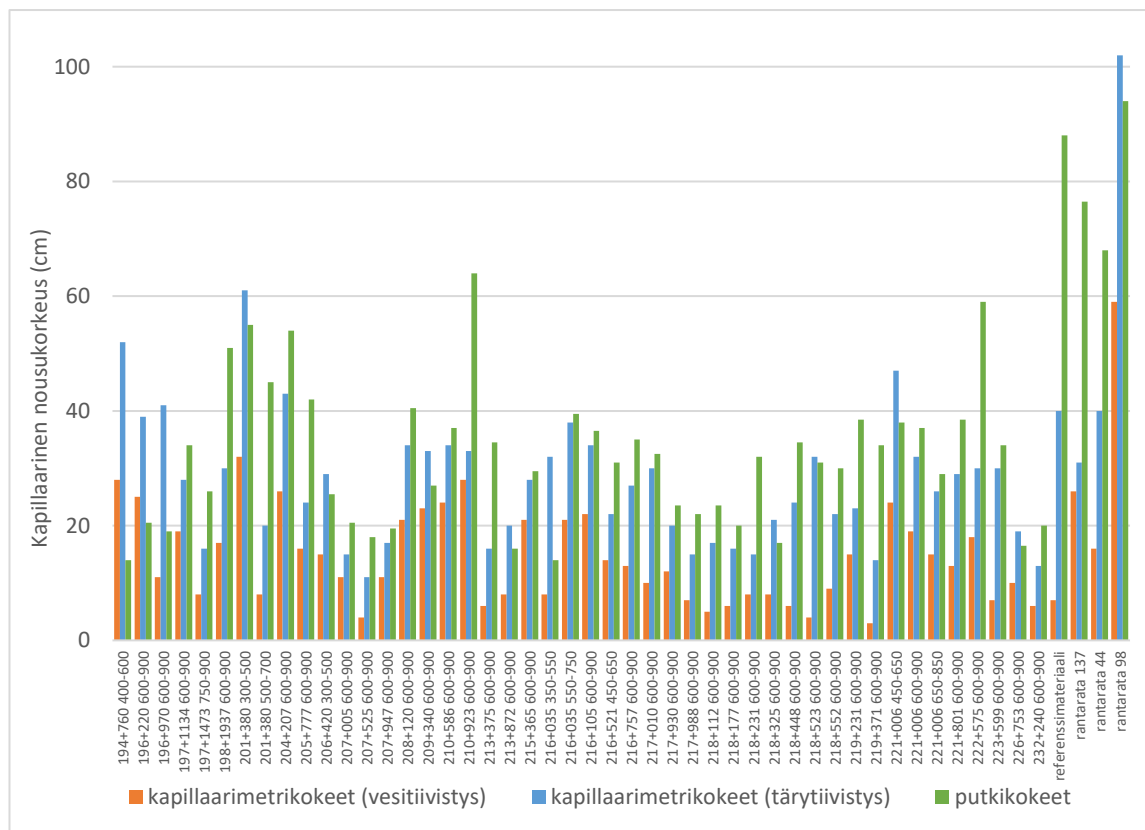
Koe alkaa näytteiden valmistelulla. Näytemateriaali jaetaan noin 3 kg osanäytteisiin, jotka kostutetaan erilaisiin vesipitoisuuksiin pyrkien siihen, että ennakkoon arvioidun optimivesipitoisuuden kummallekin puolelle jäisi yhtä monta näytettä. Kukin osanäyte tiivistetään koesynterissä viidessä kerroksessa. Kutakin kerrosta juntataan standardinmukaisella pudotusvasaralla 25 iskua käyttäen. Vasaran aluskappaleen paikkaa vaihdetaan iskujen välillä tasaisen tiivistystyön saavuttamiseksi. Sullonnan jälkeen kaulusrenkas irroitetaan ja teräviivainta käyttäen näyte tasoitetaan poistaen liika aines koesynterin yläpinnan tasolle. Näyte punnitaan ja kuivatetaan tarkan vesipitoisuuden selvittämiseksi. Tuloksista lasketaan eri vesipitoisuuksilla saavutetut kuivatilavuuspainot ja ne merkitään koordinaatistoon, jonka akselit edustavat kuivatilavuuspainoa (pystyakseli) ja vesipitoisuutta (vaaka-akseli). Havaintopisteen muodostavat perinteisesti ylöspäin kuperan kaaren, jonka lakipiste paljastaa kuivatilavuuspainon maksimin ja optimivesipitoisuuden. Proctor-kokeet tehtiin rantaradan materiaaleille, Kvl-Kot yhdistemateriaaleille ja referenssimateriaalille.

7. KOETULOSTEN TARKASTELU

7.1 Yleistä

Koetulosten tarkastelu on jaettu seitsemään osioon. Tarkastelu aloitetaan kapillaarimetrikokeiden tuloksista näiden ollessa kokeellisen osion tärkein elementti. Seuraavaksi tarkastellaan putkessa tehtyjen kapillaarikokeiden tuloksia. Näiden osioiden jälkeen tarkastelu siirtyy kapillaarimetrikokeiden ja putkikokeiden tulosten keskinäiseen vertailuun. Pelkästään kapillaarisuutta käsittelevien osioiden jälkeen tarkastellaan kolmiaksaaliko-keiden tuloksia suhteessa materiaalien kapillaariominaisuuksiin ja rakeisuuksiin. Tämän jälkeen tarkastellaan Proctor-kokeiden tuloksia ja arvioidaan tiiviystilan vaikutusta kapillaariominaisuuksiin. Seuraavaksi tehdään huomioita muiden vastaavien tutkimusten tuloksista. Kokeellinen osio päättyy johtopäätöksiin.

Yhteenvedo kapillaarimetriellä ja putkimenetelmällä tehdyistä kapillaarisen nousun mää-rytyksistä on esitetty pylväsdiagrammina kuvassa 69. Kyseisestä kuvaajasta on muodos-tettavissa kokonaiskuva kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tuloksista. Tärytiivistettyjen näytteiden kapillaarimetrikokeet tuottivat yleensä hieman pienemmän arvon ja vesitiivis-tettyjen näytteiden kapillaarimetrikokeet tuottivat yleensä huomattavasti pienemmän ar- von verrattuna putkessa tehtyyn kapillaarisen nousun määritykseen. Kyseisten koe- menetelmien tuottamien tulosten keskinäiset erot vaihtelivat kuitenkin voimakkaasti näy-temateriaaleittain.



Kuva 69. Kapillaarimetri- ja putkikokeiden tulokset.

Kokeiden loppuvaiheessa kolmiakksiaalikoikeita varten valmistetut Kouvola-Kotka radan yhdistemateriaalit eivät ole mukana kappaleiden 7.2.1, 7.3.3 ja 7.4 tarkasteluissa, vaikka niille kyseisissä kappaleissa käsitellyt kokeet tehtiinkin. Yhdistemateriaaleja tarkastellaan kapillaarimetrikokeiden toistettavuutta käsittelevässä kappaleessa 7.2.2, pitkäaikaisia putkikoikeita käsittelevässä kappaleessa 7.3.2 ja kolmiakksiaalikoikeita käsittelevässä kappaleessa 7.5.

Koetuloksia käsitellään tässä työssä lähtökohtaisesti kokonaisuutena riippumatta näytteen alkuperästä. Tämä on perusteltua tutkimuksen keskittyessä koemenetelmien tuottamien tulosten tarkasteluun eikä eri ratojen materiaalien laatueroihin. Lähtökohtaisesti analyyseissä on käytetty kapillaarimetrikokeiden osalta varsinaisten kokeiden tuloksia, ellei toisin mainita.

7.2 Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen kapillaarimetrimillä

7.2.1 Kvi-Kot-radon näytteille, rantaradon näytteille sekä referenssimateriaalille tehdyt kokeet

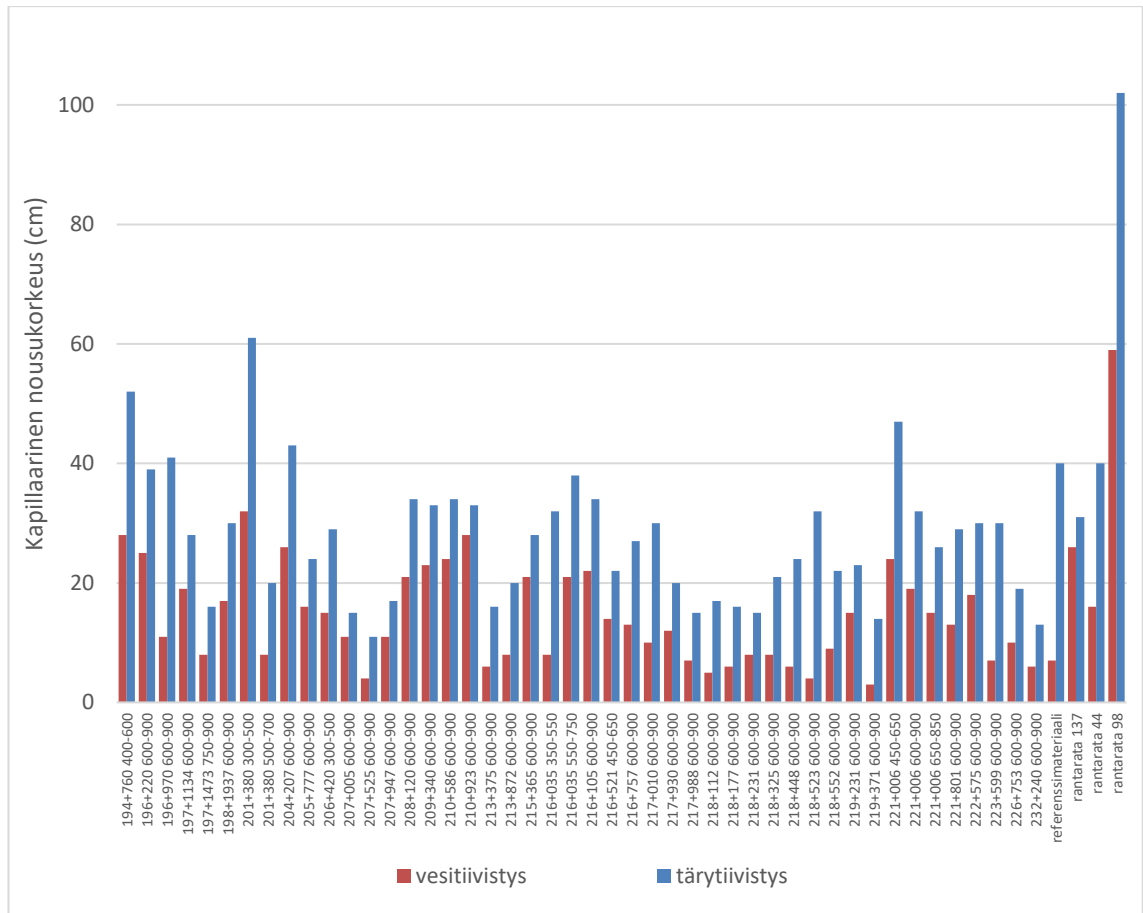
Tässä osiossa käsiteltävät kapillaarimetrikokeet käsittävät 46:lle Kouvola-Kotka-radon näytteelle, rantaradon näytteille sekä kiviainestoimittajalta hankitulle referenssimateriaalille tehdyt kokeet. Kokeita tehtiin 212 kappaletta, joista 12 hylättiin. Hylkäyksen syynä oli kahdeksassa tapauksessa varsinaisen kokeen tuloksen liiallinen eroavaisuus esikokeen tulokseen, kolmessa tapauksessa varsinaisen kokeen epäonnistuminen liian korkean alkupaineen vuoksi ja yhdessä tapauksessa tuloksen hylkääminen mittauspöytäkirjan puutteellisten merkintöjen johdosta. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, eivät Kvi-Kot radon näytteistä koostetut kaksi yhdistemateriaalia ole mukana tämän osion tarkasteluissa.

Jos varsinaisen kokeen liian korkean alkupaineen valinnan johdosta hylättyjen kokeiden määrä olisi ollut korkea, olisi se vääristänyt koetuloksia tehden niistä keskimäärin liian korkeat. Koska kyseisestä syystä jouduttiin kuitenkin hylkäämään vain kolme koetta, ei esitetynlaista vääristymää syntynyt liiallisessa määrin kokonaisuuden kannalta.

Tärytiivistetyt näytteet tiivistyivät vesitiivistettyjä näytteitä enemmän jokaisen näytemateriaalin kohdalla. Pienin ero yksittäisen materiaalin tärytiivistetyn näytteen ja vedellä tiivistetyn näytteen kuivatilavuuspainoissa oli 0,1 %. Suurin ero oli 11,4 % ja erojen keskiarvoksi muodostui 4,8 %.

Mitattaessa näytteen korkeutta tilavuuden ja edelleen kuivatilavuuspainon laskemista varten, saattoi mittaustulos vääristyä hieman, mikäli näytteen pinta ei ollut täysin tasainen. Näytteen ollessa varsin matala (~6 cm), synnytti pienikin mittausrvirhe virhettä tilavuuteen ja sitä kautta kuivatilavuuspainoon. Kyseisillä virheillä saattaa olla jonkin verran merkitystä, kun vertaillaan eri tiivistystavoilla saatujen kuivatilavuuspainojen eroja näiden ollessa varsin pieniä.

Käytetty tiivistystapa vaikutti selkeästi kokeen tulokseen. Kuvassa 70 on esitetty kapillaarimetrikokeiden tulokset tiivistystavoittain. Tärytiivistetyt näytteet tuottivat suuremmat tulokset kuin vesitiivistetyt näytteet. Vesitiivistetyissä näytteissä kapillaarimetrikokeen tulokset olivat välillä 3-59 cmH₂O keskiarvon ollessa 15,1 cmH₂O. Tärytiivistetyissä näytteissä tulokset sijoituivat välille 11-102 cmH₂O keskiarvon ollessa 29,3 cmH₂O. On selvää, että saavutetulla tiivistystavalla on huomattava vaikutus kokeen tulokseen.



Kuva 70. Kapillaarimetrikokeiden tulokset tiivistystyypeittäin.

Tiivistysvaikutus kokeen tulokseen ei ole ilmiönä yllättävä, joskin sen vaikutuksen suuruus on odotettua isompi. Ilmiö on ymmärrettävissä teoriaosiossa esitettyjen huomioiden perusteella. Kun rakeet pakkautuvat tiiviimmin, jäävät niiden väliset huokokset pienemmiksi ja huokosia on täten vaikeampi tyhjentää kapillaarisesta vedestä.

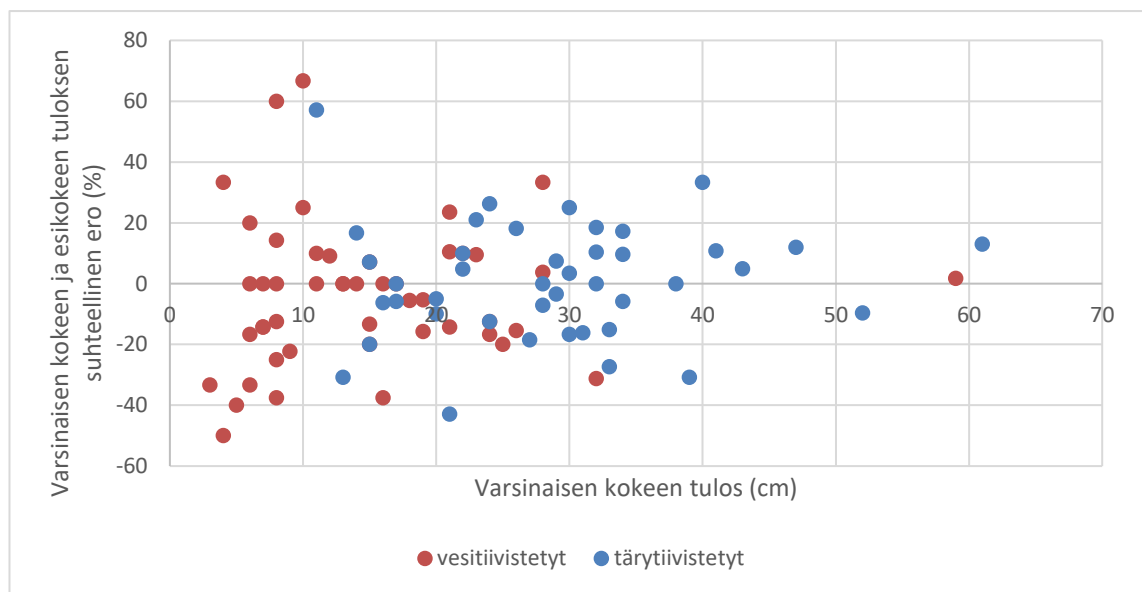
Esikokeen ja varsinaisen kokeen tulosten suuruusjärjestys vaihteli satunnaisesti. Tärytiivistetyistä näytteistä 21 tuotti pienemmän ja 25 suuremman tuloksen varsinaisessa kokeessa kuin esikokeessa. Yhtä suuri tulos saatiin neljän näytteen kohdalla. Vesitiivistetyistä näytteistä 23 tuotti pienemmän ja 18 suuremman tuloksen varsinaisessa kokeessa kuin esikokeessa. Tällä tiivistystavalla 9 näytettä tuotti esikokeessa ja varsinaisessa kokeessa saman tuloksen. Alkuperäisenä oletuksena oli, että varsinaisten kokeiden tulokset muodostuisivat hieman esikokeiden tuloksia pienemmiksi varsinaisissa kokeissa käytetystä hitaammasta paineennostonopeudesta johtuen. Alun perin oletettiin, että mitä hitaammin painetta nostetaan, sitä enemmän vettä ehtii poistua näytteestä kyseisellä painekorkeudella ja sitä suuremmalla todennäköisyydellä ilma ehtii tulla näytteen läpi ennen painetason nostoa. Tällainen käsitys on esitetty myös maa- ja pohjarakenteiden laboratorion työhjeessä [59]. Kyseisenlaista käyttäytymistä ei tuloksia tarkastelemalla kuitenkaan voida havaita.

Kaikissa kapillaarimetrikokeissa kokeen tekijä ja koelaitteisto olivat samoja. Esikokeiden ja varsinaisten kokeiden tulosten vertailua voidaan käyttää apuna muodostettaessa karkeita alustavia arvioita kokeiden toistettavuudesta. Koetyyppejä ei voida kuitenkaan pitää täysin tasavertaisina esikokeiden roolin ollessa (ainakin alkuoletuksen mukaan) vain suuntaa antava.

Kuvassa 71 on esitetty varsinaisten kokeiden ja esikokeiden tulosten suhteelliset erot. Punaiset pisteet edustavat vesitiivistettyjä näytteitä sinisten kuvatessa tärytiivistettyjä näytteitä. Pysty akseli kuvaa varsinaisen kokeen ja esikokeen tuloksen suhteellista eroa. Tällöin esimerkiksi esikokeen antaessa tulokseksi 10 cmH₂O ja varsinaisen kokeen antaessa tulokseksi 20 cmH₂O, sijoittuisi kyseistä näytemateriaalia edustava piste pystyakselilla kohtaan 100 %. Mikäli esimerkin esikokeen ja varsinaisen kokeen lukemat olisivat toisin päin, sijoittuisi piste pystyakselilla kohtaan -100 %. Varsinaisen kokeen tulosta edustava vaaka-akseli antaa kuvan kunkin kokeen tuloksen suuruusluokasta.

On hyödyllistä hahmottaa, kuinka isoksi ero varsinaisen kokeen ja esikokeen välillä keskimäärin muodostui. Jotta tätä voidaan tarkastella yhden luvun avulla, on jokaisen pisteen pystyakselin arvosta laskettava ensin itseisarvo, minkä jälkeen itseisarvoista voidaan laskea keskiarvo. Laskelma tehdään erikseen eri tiivistystyypeille. Varsinaisten kokeiden ja esikokeiden suhteellisten erojen itseisarvojen keskiarvoksi saadaan tärytiivistettyjen kokeiden osalta 14,5 % ja vesitiivistettyjen kokeiden osalta 17,6 %.

Kuvaajasta on poistettu ne materiaalit, joille jouduttiin tekemään useita varsinaisia kokeita. Syynä tähän on kyseisenlaisten materiaalien varsinaisen kokeen eriävä hyväksymiskriteeri. Kuvaajasta voidaan tulkita esikokeen ja varsinaisen kokeen tulosten suhteellisen eroavaisuuden suurimpien arvojen lievähkö pieneneminen liikuttaessa vaaka-akselilla oikealle, mikä ilmentää suhteellisen hyväksymiskriteerin tiukkenemista kokeiden tulosten absoluuttisten arvojen nousun myötä.



Kuva 71. Varsinaisten kokeiden ja esikokeiden tulosten suhteelliset erot esitettyinä varsinaisten kokeiden tuloksien suhteen. Kuvaajasta on jätetty pois näytteet, joissa jouduttiin tekemään useampi varsinainen koe.

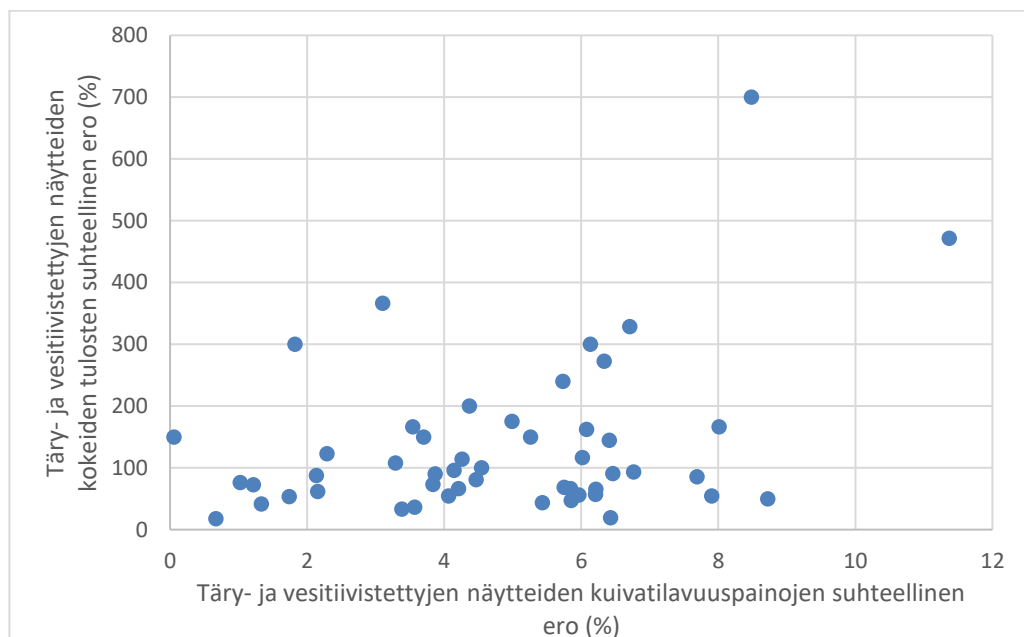
Siinä missä pienillä nousukorkeuksilla voitiin sallia varsin suurikin suhteellinen poikkeama esikokeen ja varsinaisen kokeen välille, oli korkeita tuloksia tuottavien näytteiden kohdalla oltava saatujen tulosten prosentuaalisen eroavaisuuden suhteen tiukempi. Esimerkiksi esikokeen ja varsinaisen kokeen tulosten ollessa 2 cm ja 4 cm, on varsinaisen kokeen tulos hyväksyttävissä, siinä missä lukujen saadessa arvot 50 cm ja 100 cm, on varsinainen koe uusittava, vaikka tulosten suhde on sama kuin edeltävässä tilanteessa. Tampereen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden laboratorion sisäisessä työohjeessa [59] ei anneta numeerisia ohjeita esikokeen ja varsinaisen kokeen suurimpaan sallitun eroavaisuuden tulkintaan. Kokeiden aikana suurimman sallittavan eroavaisuuden arviointi oli

tulkinnanvaraista kiinteän prosentuaalisen eroavaisuus-kriteerin ollessa sopimaton edellä käsitellyistä syistä johtuen. Kaiken kaikkiaan varsinaisten kokeiden tulosten voidaan nähdä edustavan esikokeiden tuloksia kohtuullisen hyvin muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Koska esikokeen ja varsinaisen kokeen tulosten liiallisen eron vuoksi hylättyjen tulosten määrä jäi kokonaisuudessaan varsin pieneksi, olisi jälkikäteen nähtynä varsinaisia kokeita voitu uusida hieman tiukemmin perusteiden. Tulevaisuudessa koemenetelmää voitaisiin kehittää laatimalla tulostason kasvun suhteen tiukkeneva hyväksymiskriteeri suurimmalle sallitulle varsinaisen kokeen ja esikokeen tulosten suhteelliselle erolle.

Eroavaisuudet saavutetuissa kuivatilavuuspainoissa olivat eri tiivistysmenetelmien välillä selkeät. Varsinaisten kokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen keskiarvoksi saatiin tärytiivistetyillä näytteillä $18,1 \text{ kN/m}^3$ ja vesitiivistetyillä näytteillä $17,3 \text{ kN/m}^3$. Jokaisen näytemateriaalin kohdalla tärytiivistys tuotti suuremman kuivatilavuuspainon kuin vesitiivistys.

Vaikka näytteet saatiin tärytiivistyksellä aina tiiviimmäksi kuin vesitiivistyksellä, on syytä huomata, että eri näytemateriaaleilla kuivatilavuuspainojen ero vesitiivistyksessä ja tärytiivistyksessä muodostui mahdollisesti hyvinkin erilaiseksi. Näin ollen on syytä tarkastella, kuinka paljon kyseinen kuivatilavuuspainero vaikutti kokeiden tulosten suhteelliseen eroon. Voitaisiin olettaa esimerkiksi, että mikäli tietyllä näytemateriaalilla tärytiivistetyn näytteen kuivatilavuuspaino olisi ollut vain hieman suurempi kuin saman näytemateriaalin vesitiivistetyn näytteen kuivatilavuuspaino, olisi tärytiivistetyllä näytteellä mitattu vain hieman suurempi arvo kuin vesitiivistetyllä näytteellä. Vastaavasti voidaan ajatella, että jos jollain toisella näytemateriaalilla tärytiivistetyn näytteen kuivatilavuuspaino olisi ollut huomattavasti suurempi kuin saman näytemateriaalin vesitiivistetyn näytteen kuivatilavuuspaino, olisi tärytiivistetyn näytteen kokeesta tullut selkeästi suurempi tulos kuin vesitiivistetyn näytteen kokeesta.

Kuvasta 72 voidaan arvioida kuivatilavuuspainojen erojen vaikutusta eri tiivistysmenetelmillä tehtyjen kokeiden tulosten suhteelliseen eroon jokaisella testatulla materiaalilla, joita koordinaatistossa esitetyt pisteet edustavat.



Kuva 72. Mittausten perusteella määritetyn täry- ja vesitiivistettyjen näytteiden tiivistylaeron vaikutus kokeiden tulosten suhteelliseen eroon.

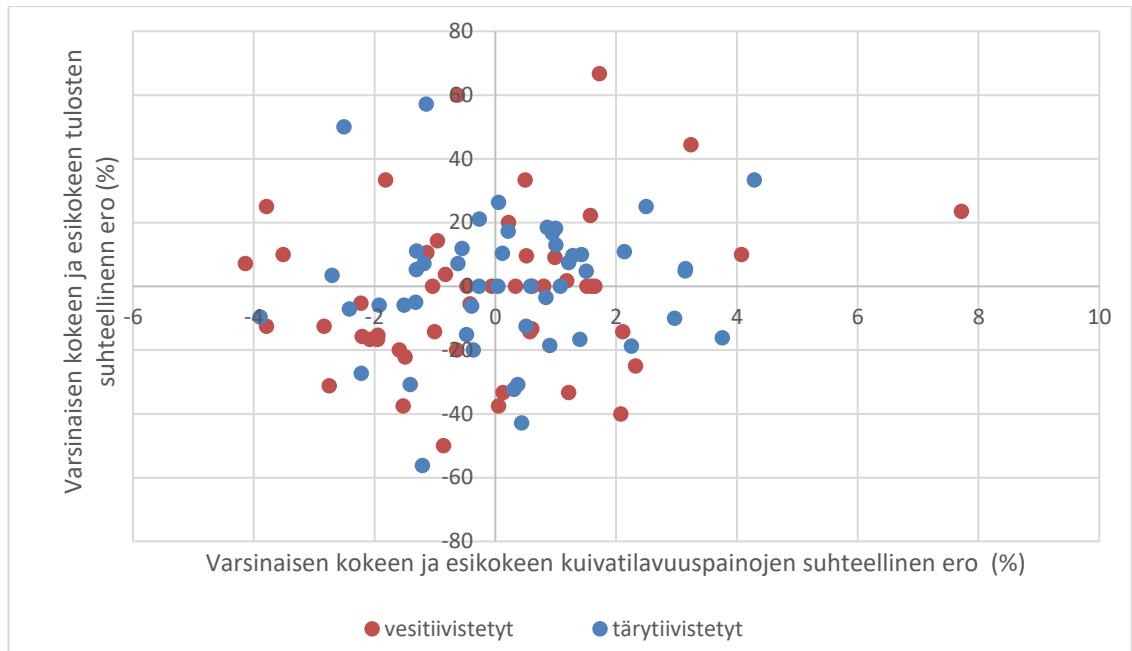
Kuvaajasta ei ole havaittavissa selkeää säännönmukaisuutta pisteiden sijoittumisessa. Kuten aikaisemmin on jo todettu, saavutettiin tärytiivistetyillä näytteillä kuitenkin keskimäärin huomattavasti suuremmat tulokset kuin vesitiivistetyillä näytteillä, minkä todettiin johtuvan tiivistilojen eroista. On ristiriitaista, etteivät kokeiden tulosten suhteelliset erot korreloi kuivatilavuuspainojen suhteellisten erojen kanssa.

On syytä huomioida mittaustarkkuuden vaikutus näytteen kuivatilavuuspainoa määritettäessä. Yhden millin mittausvirhe näytteen korkeuden mittauksessa voi tuottaa keskimäärin lähes kahden prosentin virheen näytteen kuivatilavuuspainoa laskettaessa. Kyseisen lainen virhe voi tuottaa merkittävää epätarkkuutta eri tiivistystapoja edustavien näytteiden kuivatilavuuspainojen suhdetta laskettaessa. Kaiken kaikkiaan on kuitenkin selvää, että tärytiivistetyt näytteet menivät tiiviimmiksi kuin vesitiivistetyt. Keskimääräisenä kuivatilavuuspainojen eron kokoluokkana voitaneen pitää jo aiemmin mainittua 4,8 %: a.

Raudalla tiivistettäessä näytteeseen yritettiin luonnollisesti kohdistaa samanlainen tiivistystyö esikokeen ja varsinaisen kokeen kohdalla. Tällä tavoiteltiin samaa tiivistilaa. Käytännössä näytteet eivät kuitenkaan menneet täysin samaan tiiviyteen.

Verrattaessa varsinaisia kokeita ja esikokeita voidaan todeta näytteiden suhteellisten kuivatilavuuspainoerojen itseisarvojen keskiarvon olevan tärytiivistettyjen näytteiden kohdalla 1,4 % ja vesitiivistettyjen näytteiden tapauksessa 1,7 %. Koska kuivatilavuuspainon vaikutus kokeen tulokseen on todettu suureksi, on syytä tarkastella myös esikokeen ja varsinaisen kokeen kuivatilavuuspainoeron vaikutusta kyseisten kokeiden tulosten eroihin.

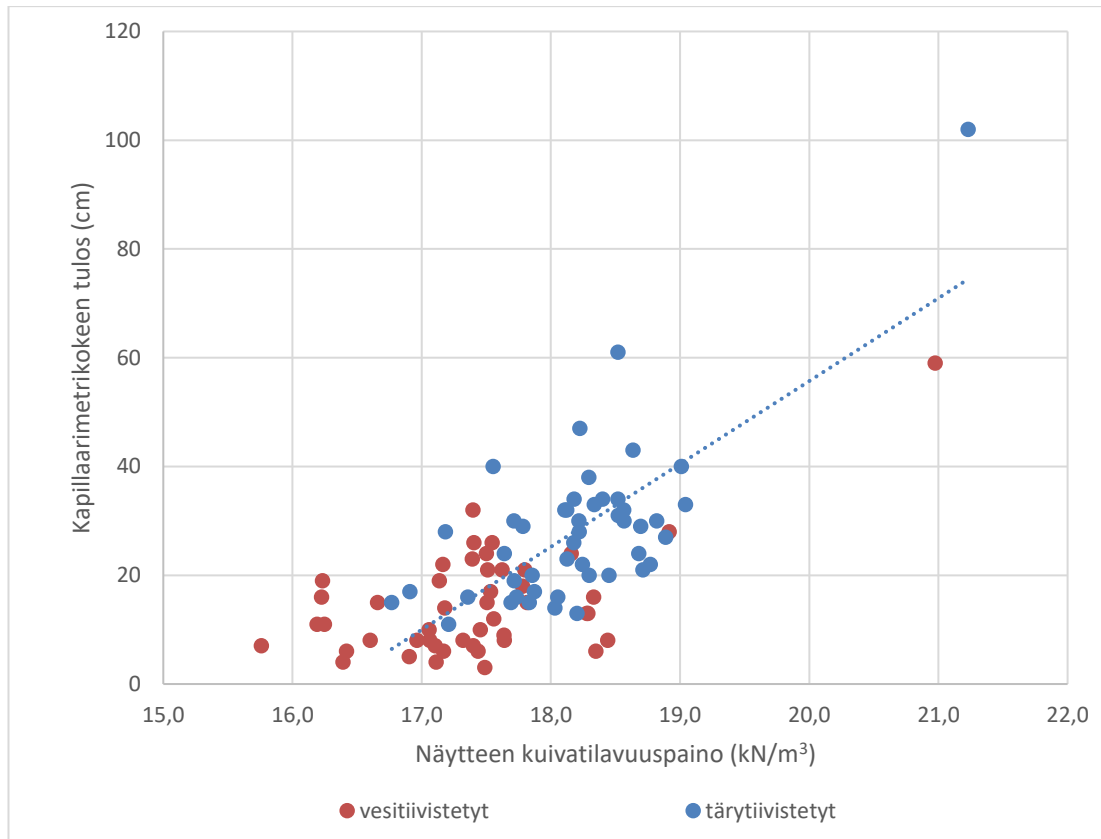
Kuvassa 73 on esitetty esikokeen ja varsinaisen kokeen tiivistilojen eron vaikutus kyseisten kokeiden tulosten suhteeseen sekä tärytiivistettyjen että vesitiivistettyjen näytteiden osalta. Kummankin tiivistystyyppin tapauksessa pisteiden asettuminen kuvaajaan voidaan nähdä varsin satunnaisena. Käytännössä tiiviyserot ovat olleen todennäköisesti niin pieniä, etteivät ne ole aiheuttaneet selkeitä eroja. Kun lisäksi otetaan huomioon aikaisemmin esitetty oletus näytteiden kuivatilavuuspainojen määrittämisen epätarkkuudesta, voidaan ajatella näiden tekijöiden selittävän pisteiden melko satunnainen asettuminen koordinaatistoon.



Kuva 73. Varsinaisen kokeen ja esikokeen mittausten perusteella määritettyjen kuivatilavuuspainojen suhteellisen eron vaikutus kyseisten kokeiden tulosten suhteeseen.

Kouvola-Kotka radan pienimmän ratakilometrilukeman näytteen (km 194+760, syvyysalue 400-600 mm) tulkittiin olevan tuhkaa, mikä aiheutti muista näytteistä poikkeavan käyttäytymisen kokeissa. Myös ratakilometrilukemaltaan kahden seuraavan näytteen epäiltiin mahdollisesti sisältävän tuhkaa. Näin ollen kyseiset näytteet on poistettu tästä eteenpäin kuvaajista ja tarkasteluista, ellei toisin mainita.

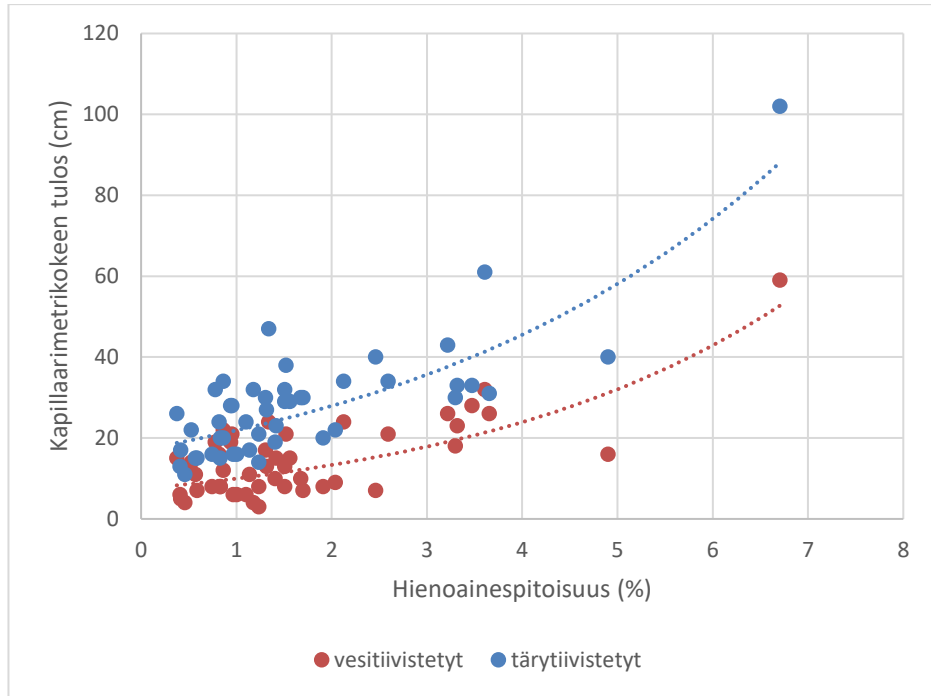
Kuvassa 74 on esitetty kapillaarimetrikokeiden tulokset näytteiden kuivatilavuuspainojen suhteen. Kyseisessä kuvassa sekä työn myöhemmissä kuvaajissa kapillaarimetrikokeen tuloksesta puhuttaessa tarkoitetaan luonnollisestikin varsinaisen kokeen tulosta, ellei toisin mainita. Kuvaajasta nähdään heikohko korrelaatio näytteen kuivatilavuuspainon ja kapillaarimetrikokeen tuloksen välillä tärytiivistettyjen näytteiden tapauksessa. Tapaan, jolla kuvaajaa tulkitaan, on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Tärytiivistettyjen näytteiden osalta kuhunkin näytteeseen pyrittiin kohdistamaan samanlainen tiivistystyö. Myös vesitiivistettyjen näytteiden tapauksessa veden lievä tiivistävä vaikutus oli kutakuinkin samanlainen jokaiselle näytteelle. Tärytiivistettyjen näytteiden osalta kuvan pääasiallisena viestinä voidaan pitää sitä, että mitä suuremman kuivatilavuuspainon näyttemateriaali luontaisesti saavutti tietyllä vakio tiivistystyöllä, sitä suurempi oli sen tulos kapillaarimetrikokeessa. Toisin sanoen rakeisuusiltaan erilaiset hiekat tiivistyvät samalla tiivistystyöllä luonteenomaisesti eri kuivatilavuuspainoihin. Suuri kuivatilavuuspaino viittaa pieneen huokoisuuteen, jonka voidaan otaksua korreloivan pienen huokoskoon kanssa käytettyjen materiaalien tapauksessa. Vesitiivistettyjen näytteiden osalta kuvaajassa ei ole havaittavissa selkeää suuntausta.



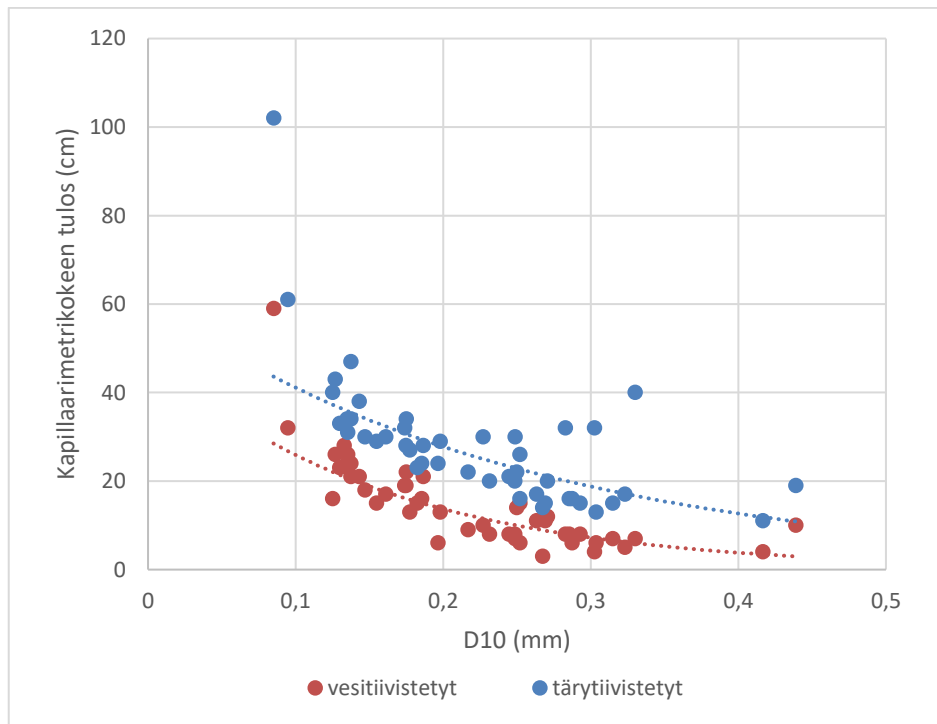
Kuva 74. Kapillaarimetrikokeen tuloksen suhde näytteen kuivatilavuuspainoon.

Voidaan myös ajatella, että vakio tiivistystyötä tavoiteltaessa todellinen tiivistystyö saattoi vaihdella hieman satunnaisuudesta johtuen. Esimerkkinä voidaan kuvitella tilanne, jossa näytemateriaaleissa olisi ollut rakeisuudeltaan kaksi äärimmäisen saman tyyppistä hiekkaa, jotka olisivat menneet sattumanvaraisesti hieman eri tiiviyteen. Tällöin hieman tiiviimmäksi mennyt hiekka olisi periaatteessa tuottanut hieman suuremman tuloksen. Tämän ilmiön merkitys on kuitenkin oletettavasti selvästi pienempi kuin aikaisemmin kuvattu materiaalien luontaisen tiivistymiskäyttäytymisen merkitys. Luonnollisesti myös näytteen korkeuden määrittämisen mahdollinen epätarkkuus voi heikentää näytteiden kuivatilavuuspainojen uskottavuutta lisätessään hajontaa.

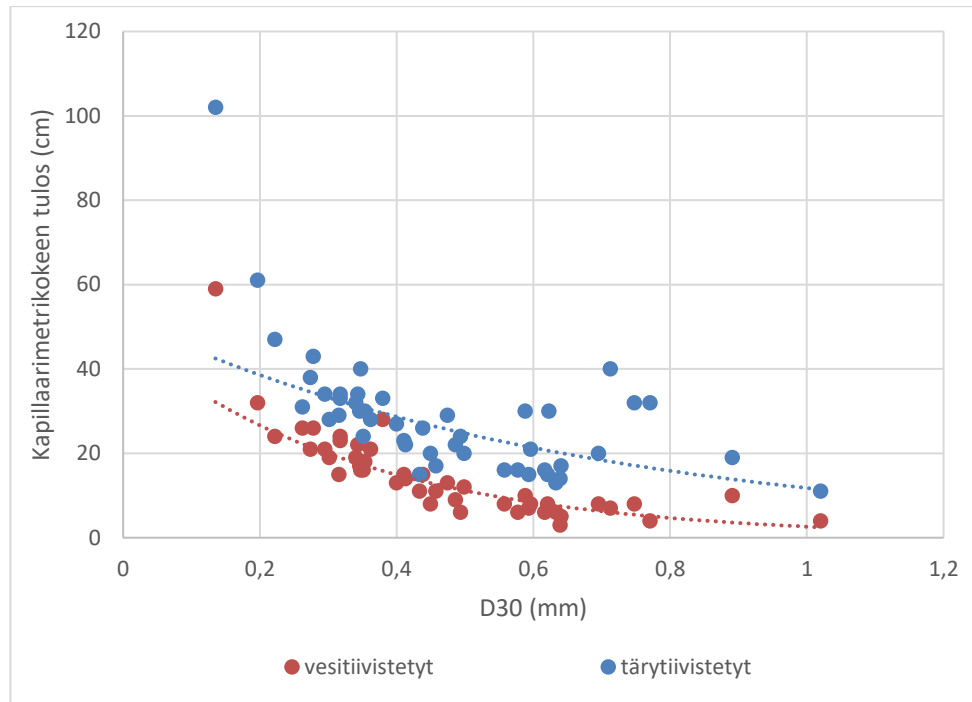
Kapillaarimetrikokeen tuloksesta muodostui sitä suurempi, mitä hienorakeisempaa näyte oli. Asia voidaan todeta vertaamalla saatuja tuloksia muutamiin rakeisuuden tunnuslukuun. Kuvassa 75 on esitetty kapillaarimetrikokeiden tulokset suhteessa hienoainespitoisuuksiin ja kuvissa 76-78 erilaisia läpäisyarvoja vastaaviin raekokoihin. Kyseiset läpäisyarvot kuvaavat sitä, mikä on rakeisuuskäyrän vaaka-akselin arvo (raekoko) siinä kohdassa käyrää, jossa se saa pystyakselilla D-merkinnän perässä olevan arvon (läpäisyprosentti).



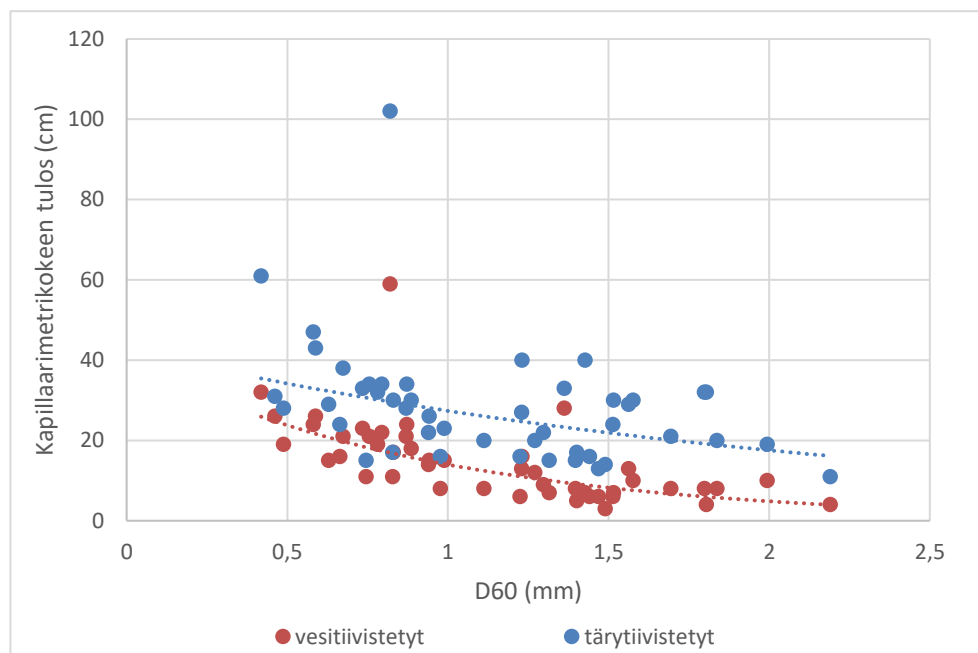
Kuva 75. Hienoainespitoisuuden vaikutus kapillaarimetrikokeiden tuloksiin.



Kuva 76. Näytteiden D10-arvon vaikutus kapillaarimetrikokeiden tuloksiin.



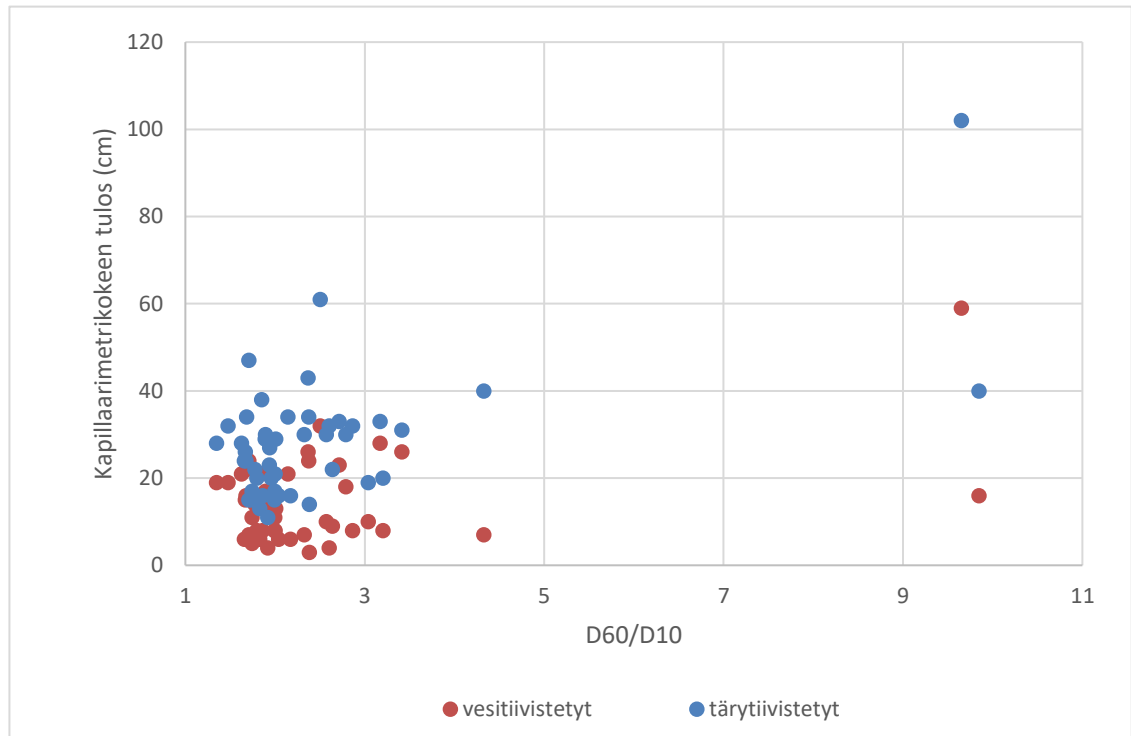
Kuva 77. Näytteiden D30-arvon vaikutus kapillaarimetrikokeiden tuloksiin.



Kuva 78. Näytteiden D60-arvon vaikutus kapillaarimetrikokeiden tuloksiin.

Raekoon ja kapillaarimetrikokeen tuloksen välinen yhteys on odotettu ja looginen. Mitä pienempiä rakeet ovat, sitä pienemmiksi niiden väliset huokokset muodostuvat ja täten vaadittava alipaine veden poistamiseksi suurimmasta huokosreitistä kasvaa työn teoriaosion mukaisesti. Kuviin on lisätty eksponentiaalinen sovitekäyrä tämän ollessa lineaarisovitetta paremmin tuloksia kuvaava. Kuvassa 75 hienorakeisimmat näytteet sijoittuvat vaak akselilla oikealle, kun taas kuvissa 76-78 ne sijoittuvat vaak akselilla vasemmalle. Näin ollen trendi näkyy kuvissa luonnollisesti eri suuntaisena.

Materiaalien suhteutuneisuuden ja koetulosten yhteyttä ei päästä käytettävissä olevan koetulosaaineiston kautta luotettavasti tutkimaan. Kuvassa 79 on esitetty koetulokset suhteessa yleisesti tasarakeisuuden/suhteutuneisuuden tunnuslukuna käytettyyn $D60/D10$ -arvoon. Jos kuvaan lisättäisiin lineaarisovitteet, asettuisivat ne nousevaan kulmaan. Koska päämassa tulospisteistä sijaitsee kuitenkin selkeästi vaaka-akselin vasemmassa päässä, ei sovituksen lisäys ja sitä myötä korrelaation tulkinta olisi välttämättä luotettavaa.



Kuva 79. Suhteutuneisuuden vaikutus kapillaarimetrikokeiden tuloksiin.

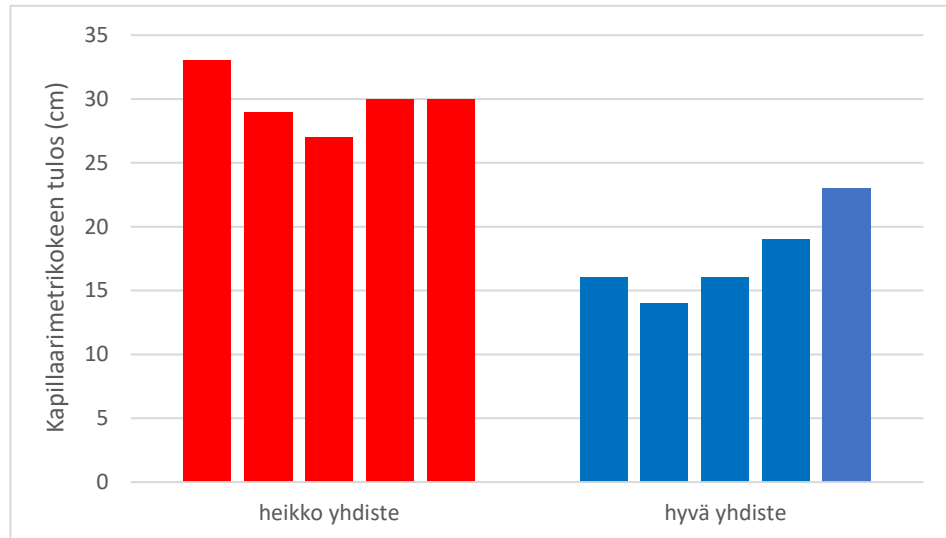
Kapillaarimetrikokeen tulosten kasvun suhteutuneisuuden kasvun myötä oltaisiin kuitenkin voitu olettaa olevan tuloksista havaittava ilmiö. Voidaan ajatella, että rakeiden väliset huokokset pienenevät suhteutuneisuuden kasvaessa. Tällöin suurimpien rakeiden väliset huokokset täyttyvät hieman pienemmillä rakeilla, joiden välit puolestaan täyttyvät vielä pienemmillä rakeilla. Asiaa on käsitelty tarkemmin työn teoriaosiossa kappaleessa 4.2.

Jotta tulosten kasvun tulkinta suhteutuneisuuden kasvaessa oltaisiin voitu luotettavasti tehdä, olisi se täytynyt tehdä pisteiden päämassan perusteella. Syyksi siihen, miksi teoreettisesti ennustettu korrelaatio ei ainakaan selkeästi tule ilmi pisteiden päämassan alueella, voidaan nähdä raekokosuhteiden arvojen pieni vaihteluväli eri näyttemateriaalien välillä. Käytetyn raekokosuhteen perusteella materiaali voidaan määrittää tasarakeiseksi ($D60/D10 < 5$), sekarakeiseksi ($5 < D60/D10 < 15$) tai suhteutuneeksi ($D60/D10 > 15$) [10]. Kahta näyttemateriaalia (neljä pistettä kuvaajassa) lukuun ottamatta kaikki näytteet ovat tulkittavissa tasarakeisiksi. Lisäksi näytteiden raekokosuhteet ovat keskittyneet tasarakeisella alueella hyvin kapealle sektorille.

Mahdollisena virhelähteenä tärytiivistetyissä kokeissa voidaan nähdä materiaalin lajittuminen tärytettäessä. On vaikeasti arvioitavissa, onko tärytettäessä voinut tapahtua niin merkittävää lajittumista, että näytteen alaosaan olisi syntynyt erityisen hienoainespitoinen vyöhyke, joka olisi voinut vaikuttaa kokeen tulokseen sitä suuremman tavalla.

7.2.2 Kvl-Kot yhdistenäytteille tehdyt toistettavuuskokeet

Sahi-kapillaarimerin tuloksia ei kirjallisuuden mukaan pidetä kovin luotettavina [10]. Kolmiakksiaalikoeketta varten Kvl-Kot-radan materiaaleista koostetuille yhdistenäytteille tehtiin kapillaarimetrikokeet kuten muillekin materiaaleille kuitenkin sillä erotuksella, että tärytiivistetty varsinainen koe toistettiin viisi kertaa. Tällä pyrittiin tuottamaan lisätietoa kokeen toistettavuudesta. Kuvasta 80 huomataan, että kokeiden tulokset ovat samassa suuruusluokassa, joskin niissä esiintyy kohtuullista satunnaisuutta. Niissä työn myöhemmissä osioissa, joissa Kvl-Kot yhdistemateriaalien kapillaarimetrituloksia tullaan käyttämään, tärytiivistettyjen varsinaisten kokeiden arvona käytetään kuvassa 80 esitettyjen arvojen mediaaneja.



Kuva 80. Kvl-Kot yhdistemateriaalien viisi kertaa toistettujen, tärytiivistettyjen varsinaisten kokeiden tulokset.

7.3 Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen putkimenetelmällä

7.3.1 Yleistä

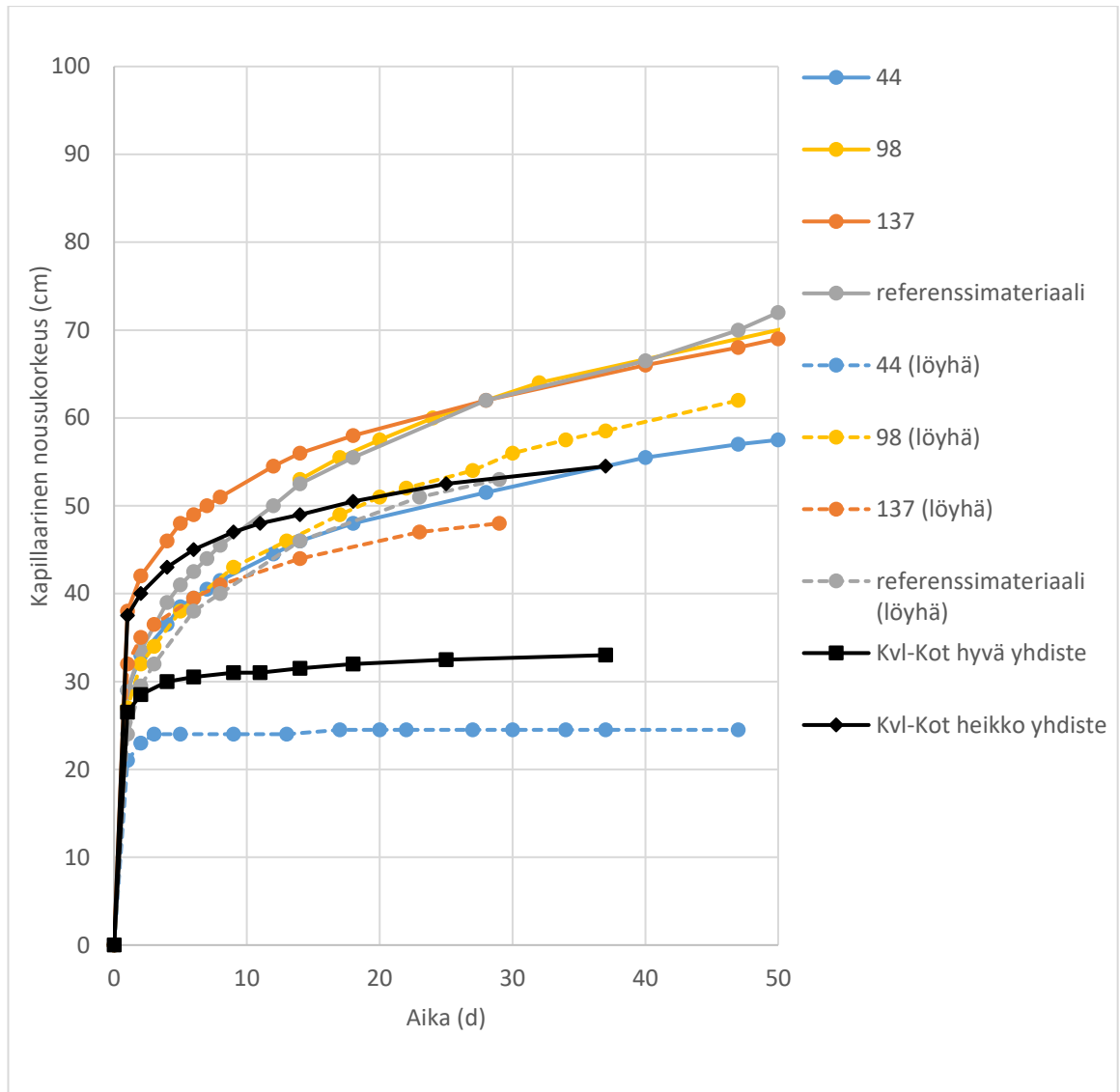
Erityisesti korkean kapillaarisuuden omaavilla maanäytteillä putkessa tehtävän kapillaarisen nousun määrittämisen tulos riippuu siitä, kuinka kauan kokeita pidetään käynnissä. Edeltävän projektin yhteydessä vuoden 2018 syksyllä Kouvola-Kotka-radan näytteille putkessa tehtyjen kapillaarisen nousun määrittämisen kesto oli 7-12 päivää. Seitsemän päivän vähimmäisaika edusti laboratorion yleistä käytäntöä putkessa tehtävien kapillaarisen nousun kokeiden ajallisesta kestosta ja sitä pidettiin oletusarvoisesti riittävänä aikana kapillaarisen nousun ilmenemiseen kyseisen tyyppisillä hiekoilla. Osalla näytteistä koe keskeytettiin tasan seitsemän päivän kohdalla ja osalla sen sallittiin jatkua hieman yli viikon, mikä perustui oletukseen siitä, ettei nousukorkeus muuttuisi enää merkittävästi seitsemän päivän jälkeisinä päivinä.

Rantaradan materiaalien kapillaarikokeissa ei noudatettu seitsemän päivän koekestoja vaan kokeita pidettiin käynnissä huomattavasti pidempi aika pyrkien tutkimaan kapillaarisen nousun kehittymistä pitkällä aikavälillä. Rantaradan materiaalien kapillaarisuus oli myös keskimäärin suurempaa kuin Kvl-Kot materiaalien, joten pidempi kokeen kesto oli myös tätä kautta luontevaa. Myös referenssimateriaalille ja Kvl-Kot-radan yhdistemateriaaleille tehtiin pitkäkestoiset kokeet. Kyseisten näytteiden kokeissa pitkä suoritus aika palveli laajemmin kapillaari-ilmion tutkimisen tarkoituksia.

7.3.2 Pitkäkestoiset kokeet

Tarkastellaan aluksi rantaradan materiaaleille, referenssimateriaaleille ja Kvl-Kot-radan yhdistemateriaaleille tehtyjen kokeiden tuloksia. Materiaaleista kahdelle ensiksi mainitulle kokeet tehtiin kahdessa eri tiivystilassa. Tiiviimpi tila saatiin, kun materiaali tiivistettiin putkeen täryraudan avulla siten, ettei lisätärytyksen havaittu enää merkittävästi tiivistävän materiaalia. Pienempi tiivystila saatiin tiivistämällä näytettä vain sen verran että sen kuivatilavuuspaino vastasi kutakuinkin 90 %:a tiiviimmän kokeen näytteen kuivatilavuuspainosta. Tähän vaadittu tiivistystyö vaihteli näyttemateriaalikohtaisesti. Tarkat tiedot näytteiden kuivatilavuuspainoista on esitetty liitteessä A. Rr 137 ja referenssimateriaalin pienemmän tiivystilan kokeiden käyrät edustavat jo aikaisempien projektien yhteydessä tehtyjen kokeiden tuloksia näiden kuivatilavuuspainojen edustaessa sattumalta kutakuinkin tavoiteltua 90 %:a tiiviimpien näytteiden kuivatilavuuspainoista. Kvl-Kot yhdistemateriaaleille kokeet tehtiin vain tiiviissä tilassa.

Rantaradan km 98 tiiviin näytteen koetta pidettiin käynnissä 201 päivää. Muiden rantaradan tiiviiden näytteiden kokeita ja referenssimateriaalin tiiviin näytteen koetta pidettiin käynnissä 121 päivää. Löyhien näytteiden kokeita pidettiin käynnissä huomattavasti lyhyempi aika. Kvl-Kot yhdistenäytteiden kokeita pidettiin käynnissä 37 päivää. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, eivät kokeiden lopetusajankohdat edusta kapillaarisen nousun päättymisen ajankohtaa, joskin tiiviiden näytteiden kokeiden lopetushetkillä vallinneet nousunopeudet ovat suuruusluokaltaan samoja. Nousukorkeudet ajan suhteen koko kokeiden kestoajalta on esitetty liitteessä B. Kuvassa 81 käyrät on katkaistu 50 päivän kohdalla käyrien alkupäiden luettavuuden parantamiseksi. Käyrissä olevan pallot kuvastavat mittaushetkiä. Tiiviille näytteille tehdyt kokeet on esitetty jatkuvalla viivalla ja löyhille näytteille tehdyt kokeet katkoviivalla. Rr 98 tiiviin näytteen tapauksessa nousukorkeus mitattiin ensimmäisen kerran vasta 14 päivän kohdalla. Seuraava tarkastelu perustuu sekä liitteessä B esitetystä kokonaiskuvaajasta, että kuvassa 81 esitetystä katkaistusta kuvaajasta tehtyihin havaintoihin.



Kuva 81. Vesirintaman etenemä ajan suhteen putkessa tehdyissä rantaradan materiaalien, Kvl-Kot yhdistemateriaalien ja referenssimateriaalin kapillaarikoikeissa ensimmäisen 50 päivän ajalta.

Kaikkien materiaalien kohdalla kummallakin tiivystilalla nousunopeus käyttäytyy logaritmisesti. Nousu on nopeinta heti aluksi ja se hidastuu yhä kiihtyvään tahtiin. Kaiken kaikkiaan voidaan sanoa, että kapillaarinen nousu jatkui näytteissä paljon pidempään kuin mitä ennakkoon oletettiin. Kokeissa ainoastaan löyhän tilan rr 44 näyte ja Kvl-Kot hyvä yhdiste saavuttivat nousun täydellisen pysähtymisen kokeen keston puitteissa.

Kuvasta voidaan tehdä havaintoja tiivyyden vaikutuksesta kapillaariseen nousuun. Tiiviit näytteet tuottivat jokaisella materiaalilla suuremman nousun kuin löyhät näytteet riippumatta tarkasteluajankohdasta. Tiiviin ja löyhän näytteen kokeiden keskinäiset erot vaihtelivat näytemateriaaleittain.

Kuvista voidaan huomata käyrien saman tyyppinen keskinäinen asettuminen kummankin tiivystilan tapauksessa. Rr 44 asettuu kulkemaan selvästi muiden kolmen käyrän alla kummassakin tiivystilassa. Rr 137 nousee kummassakin tiivystilassa aluksi muiden käyrien yläpuolelle tämän jälkeen kuitenkin leikaten rr 98 ja referenssimateriaalin käyrät siirtyessään kulkemaan näiden alapuolella. Ilmiö voi olla sattumaa, mutta toisaalta kyseisenlainen käyttäytyminen muistuttaa erästä työn teoriaosiossa esitettyä kapillaarisen

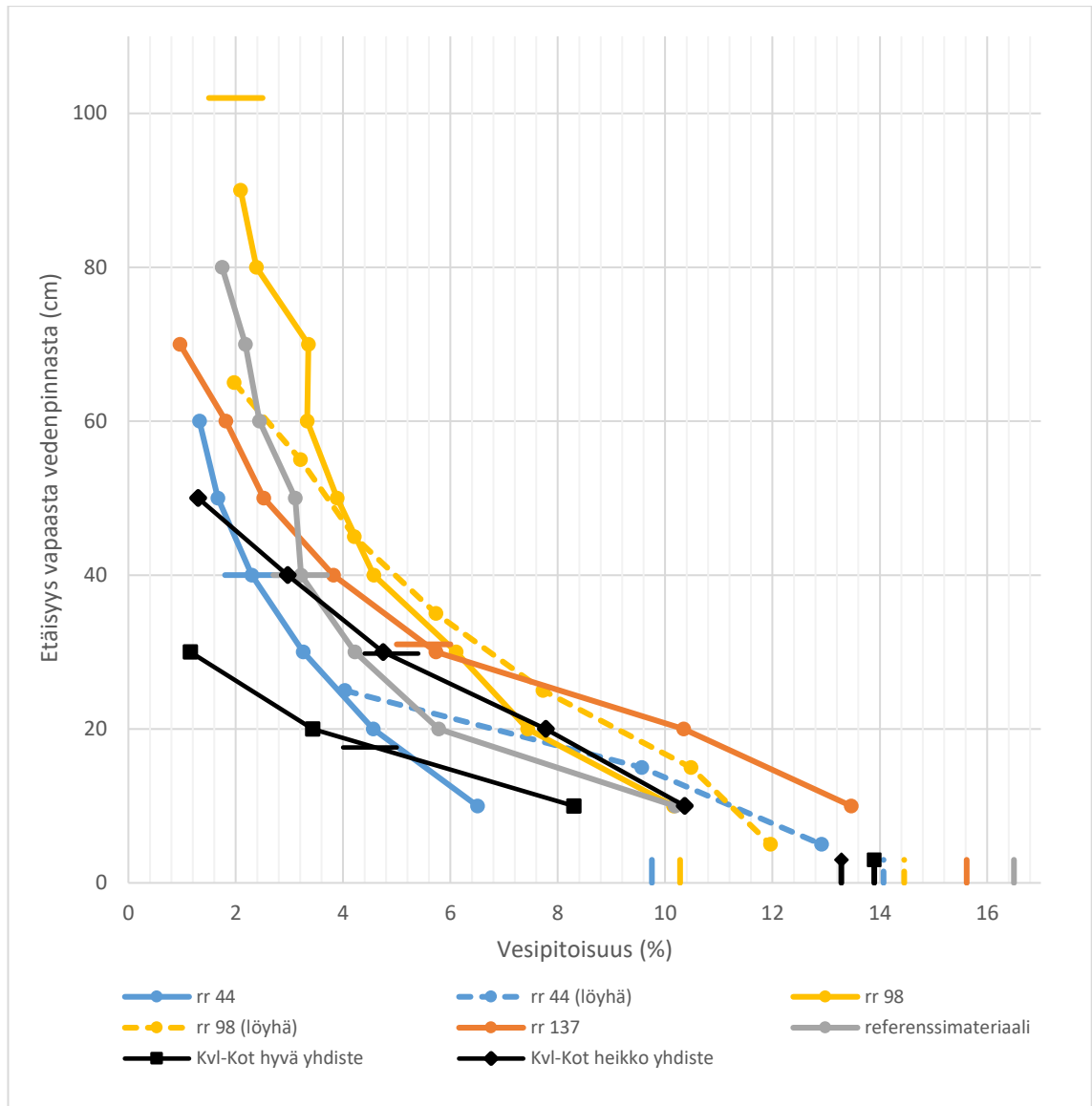
nousun piirrettä. Teoriaosion kappaleessa 4.2 todetaan hienorakeisessa materiaalissa, jossa lopullinen nousukorkeus on suuri, nousun tapahtuvan hitaammin kuin karkeamassa materiaalissa, jossa lopullinen nousukorkeus on pieni. Rr km 137 siirtyminen kulkemaan kahden muun materiaalin käyrän alla voisi siis olla selitettävissä näiden keskinäisten rakeisuuserojen kautta jos 137 olisi karkeampaa kuin 98 ja referenssimateriaali. Liitteessä E esitetyistä rakeisuuskäyristä huomataan kuitenkin, että d30:n yläpuolella 137 käyrä kulkee 98 käyrän vasemmalla puolella, joten 137 ei voida kaiken kaikkiaan pitää karkearakeisempänä kuin 98 materiaalia.

Mielenkiintoista on se, miksi 137 leikkaa myös referenssimateriaalin käyrän, jälkimmäisen ollessa selvästi karkearakeisempaa koko rakeisuuskäyrän matkalla (liite E). Kysymystä voidaan pitää myös osana laajempaa referenssimateriaalin tulosten erityistarkastelua. Liitteissä E esitetyistä kuvaajista voidaan todeta referenssimateriaalin olevan selvästi karkearakeisempaa kuin rantaradan materiaalien. Silti se tuottaa tiiviin näytteen kokeessa suuremman kapillaarisen nousun kuin mikään muu materiaali. Mielenkiintoista on myös huomata Kvl-Kot hyvän yhdistemateriaalin rakeisuuden muistuttavan vahvasti referenssimateriaalin rakeisuutta. Tärkeimpänä erona voidaan nähdä referenssimateriaalin hieman suurempi hienoainespitoisuus. Rakeisuuksien samankaltaisesta luonteesta huolimatta referenssimateriaalissa tapahtunut kapillaarinen nousu on paljon suurempaa. Kyseisenlainen käyttäytyminen on rakeisuuden näkökulmasta odottamatonta ja ristiriitaista.

Referenssimateriaali omasi eriävän, ruosteen sävyyn vivahtavan, värisävyn suhteessa muihin materiaaleihin. Tämä viittaa eriävään mineraalikoostumukseen. Mineraalikoostumus voi periaatteessa vaikuttaa materiaalin kapillaarisiin ominaisuuksiin. Mineraalikoostumuseron vaikutuksen suuruutta kapillaariominaisuuksiin on vaikea arvioida.

Kvl-Kot heikon yhdistemateriaalin käyttäytyminen muistuttaa rr 137:n käyttäytymistä; nousu on alussa nopeampaa kuin suurempia lopullisia nousunopeuksia tuottavien yhdisteiden (pl. rr 137) mutta hidastuu sitten voimakkaasti. Kvl-Kot heikko yhdiste on rakeisuudeltaan hieman rr 137:aa karkeampaa.

Kokeiden päättyessä osa näytteistä purettiin kerroksittain kosteusprofiilin selvittämiseksi. Aluksi näyteputken yläosan kuivana pysynyt hiekka kaadettiin pois putken yläpäästä. Tämän jälkeen kostea materiaali poistettiin putken alapäästä noin 10 cm pituisissa osissa. Kuvassa 82 on esitetty näytteiden kosteusprofiilit niistä kuvassa 81 käsitellyistä näytteistä, joista määrittäminen tehtiin. Pysty akselin lukema edustaa kunkin purkuosion keskikohdan likimääräistä etäisyyttä vapaasta vedenpinnasta.



Kuva 82. Puretuista näytteistä määritetyt kosteusprofiilit. Etäisyydet vapaasta vedenpinnasta eivät ole täysin tarkkoja.

Näyteputki oli alaosastaan 5 cm matkalta veden alla. Suurin osa näytteistä purettiin siten, että tätä osaa ei poistettu ennen ensimmäisen 10 cm näyteosan ottoa, vaan kyseinen ensimmäinen osa koostui puoliksi vedenpinnan alapuolella olleesta näytteen osasta. Tällaisten näytteiden tapauksessa ensimmäinen purkuosio on jätetty kuvasta pois ja käyrän alin piste on 10 cm kohdalla pystyakselilla. Tällöin ensimmäiset 5 cm vedenpinnan yläpuolella jäävät tarkastelun ulkopuolelle kyseisissä näytteissä.

Kuvan 82 vaaka-akselilta lähtevät pystysuorat viivat edustavat materiaalien laskennallisia maksimivesipitoisuuksia kyseisissä kuivatilavuuspainoissa. Laskelmissa kiviaineksen kiintotiheydeksi on oletettu $26,5 \text{ kN/m}^3$. Tiiviiden näytteiden osalta voidaan nähdä, etteivät ne rr 98:a lukuun ottamatta olleet täysin kyllästyneitä ainakaan 15 cm korkeudelle asti. Käytännössä voidaan arvioida, että kyseisissä näytteissä täysin kyllästyneen vyöhykkeen yläraja oli todennäköisesti paljonkin 15 cm:ä alempana sillä 10 cm pisteet sijoittuvat vaakasuunnassa huomattavan kauas laskennallisista maksimivesipitoisuuksista. Kuten mainittiin, poikkeuksen muodostaa rr 98. Tässä materiaalissa täysin kyllästyneen kerroksen korkeus ulottuu vähintään 15 cm:iin. Kyseisen materiaalin koetta pidettiin

käynnissä kauemmin kuin muiden materiaalien kokeita. Epäselvää on, onko pidempi suoritus aika voinut vaikuttaa näytteen alaosan muista poikkeavaan vesipitoisuuteen.

Löyhän tilan kokeiden (katkoviiva kuvaajat) osalta voidaan nähdä, ettei täysin kyllästyneen vyöhykkeen korkeus ulottunut ainakaan 10 cm asti. Rr 137:n jatkuva kuvaaja leikkaa rr 98 ja referenssimateriaalin kosteusprofiilikäyrät samaan tapaan kuin kuvassa 81 esitettyjen kapillaarisen veden rintamien etenemiskuvaajissa.

Kuvasta 82 on havaittavissa, että vesipitoisuusprofiili ei ole pääteltävissä suoraan kokonaisnousukorkeudesta. Kuvaajan käyrät leikkaavat joissain tapauksissa toisiaan ja pienemmän kokonaisnousun omanneen materiaalin kuvaaja saattaa paikoin saada suurempia arvoja tietyllä pysty akselin arvolla kuin suuremman kokonaisnousun omaavan näytteen käyrä. Huomionarvoista on myös se, että löyhemmän tilan näytteiden alaosien vesipitoisuus on suurempi kuin samojen materiaalien tiiviimpien tilojen näytteiden alaosien. Kun huokostilat rakeiden välissä ovat suurempia mahtuu niihin enemmän vettä. Kuitenkin huokostilojen koon kasvaessa vesi ei pysty nousemaan yhtä korkealle kuin pienemmät huokostilan omaavassa näytteessä.

Kuvaajaan 82 asetetuista maksimaalista laskennallista vesipitoisuutta kuvaavista merkinnöistä voidaan päätellä kyseisten materiaalien huokoisuuksia. Suurin huokoisuus on referenssimateriaalilla. Suuri huokoisuus ei kuitenkaan välttämättä kerro yksittäisten huokosten koosta.

Ennen kokeita pidettiin teoreettisesti mahdollisena, että kapillaarimetrikokeen tulos saattaisi edustaa täysin kyllästyneen vyöhykkeen korkeutta. Tarkastellaan asiaa hyödyntäen tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden tuloksia kyseisten kokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen ollessa keskimäärin lähempänä putkikokeiden kuivatilavuuspainoja kuin vesitiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen. Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden tulokset on kuvattu kuvassa 82 kunkin materiaalin vesipitoisuus käyrälle sijoitetulla vaakasuoralla viivalla. Rr 98 materiaalin viiva sijaitsee käyrän yläpuolella. On helppo huomata, että tärytiivistetystä näytteestä tehdyn kapillaarimetrikokeen tulos ei edusta putkikokeen täysin kyllästyneen kerroksen korkeutta ainakaan kyseisten materiaalien osalta. Huomio oli toki ennustettavissa jo aikaisempien tarkastelujen perusteella. Tärytiivistettyjen näytteiden kapillaarimetrikokeet tulokset olivat keskimäärin varsin lähellä putkikokeiden tuloksia ja joidenkin materiaalien kohdalla jopa suurempia kuin putkikokeiden tulokset. Vesitiivistettyjen näytteiden kapillaarimetrikokeet tulosten sovitaminen kuvaan ei ole perusteltua näiden kuivatilavuuspainojen ollessa yleisesti kauempana putkikokeiden kuivatilavuuspainoista kuin tärytiivistettyjen näytteiden kuivatilavuuspainot.

Näytteiden purkamisen yhteydessä mahdollisia virhelähteitä olivat putken nostovaihe ja kuivan hiekan poiskaatamiseksi tehty putken kallistaminen. On epäselvää, onko näytteen alaosan vesipitoisuus voinut pienetä, kun putki on nostettu vesikaukalosta ylös. Ei voida myöskään varmasti tietää, onko näytteen alaosan kosteusprofiilissa tapahtunut muutoksia kaadettaessa pois näytteen yläosan kuivaa materiaalia.

7.3.3 Putkikokeiden tulosten yhtenäistarkastelu

Kuten jo edeltävän osion perusteella voidaan aavistaa, kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen putkessa saattaa hyvin karkearakeisia materiaaleja lukuun ottamatta olla joskus tulkinnallista. Seuraavaksi putkessa tehtyjen kapillaarisuuksien määrittämisen tuloksia käytetään tarkasteluissa ainoastaan yhtenä luku arvona. Jotta tämä voidaan tehdä luotettavasti, on aluksi syytä tehdä kokeiden ajalliseen keston liittyviä huomioita.

Kouvola-Kotka näytteiden putkessa tehtyjen kapillaarisuusmääritysten ajallisen keston riittävyys suhteessa näytteille ominaisen kapillaarisuustuloksen saamiseen herätti kokeiden suorittamisen jälkeen kysymyksiä. Kyseinen seikka on melko vaikeasti arvioitavissa ja vaatii muutamia oletuksia. Joistain Kouvola-Kotka radan näytteiden mittauspöytäkirjoista on löydettävissä mittauslukemia seitsemän päivän jälkeisiltä päiviltä. Näiden perusteella voidaan joissain määrin arvioida sitä, olisiko kapillaarinen nousu muodostunut merkittävästi isommaksi, jos kokeita olisi jatkettu pidempään. Koska kyseisiä kokeita tehdessä seitsemää päivää pidettiin oletusarvollisesti riittävänä, ovat seitsemän päivän ylittävät lukemat otettu vain harvoista näytteistä ja niistäkin varsin epäsäännöllisesti. Näytteitä, joista on otettu lukemia 9-12 päivän ajalta on 18 kappaletta. Näissä keskimääräinen nousunopeus seitsemän päivän ylittäviltä päiviltä on 0,14 cm/d. Suurin nousunopeus on 0,5 cm/d, joka esiintyy kahdessa näytteessä. Kahdeksassa näytteessä nousunopeus saa arvon nolla. Kun otetaan huomioon, että kyseisiin näytteisiin sisältyi kuusi kappaletta kymmenestä suurimman hienoainespitoisuuden omaavista näytteistä, voidaan todeta, että käytetyillä kokeiden ajallisilla kestoilla on saavutettu kohtuullisesti näytteille ominaiset kapillaariset nousut, joskin jotkut näytteet olisivat tuottaneet hieman korkeammat tulokset, mikäli kokeet olisivat jatkuneet pidempään.

Lisäksi huomioita voidaan tehdä aikaisemmin esitetyistä Kvl-Kot yhdistemateriaalille tehdyistä pitkistä kokeista. Heikko yhdistemateriaali, joka oli koostettu materiaalien kutaquinkin hienorakeisimmista näytteistä, tuotti kapillaarista nousua keskimäärin 0,67 cm/d päivien 6-9 välisenä aikana. Hyvä yhdistemateriaali, joka oltiin koostettu näytesarjan karkearakeisimmista näytteistä, tuotti nousua keskimäärin 0,17 cm/d päivien 6-9 välisenä aikana. Korkeita nousukorkeuksia tuottaneiden näytteiden tuloksiin voidaan siis nähdä sisältyvän hieman epätarkkuutta.

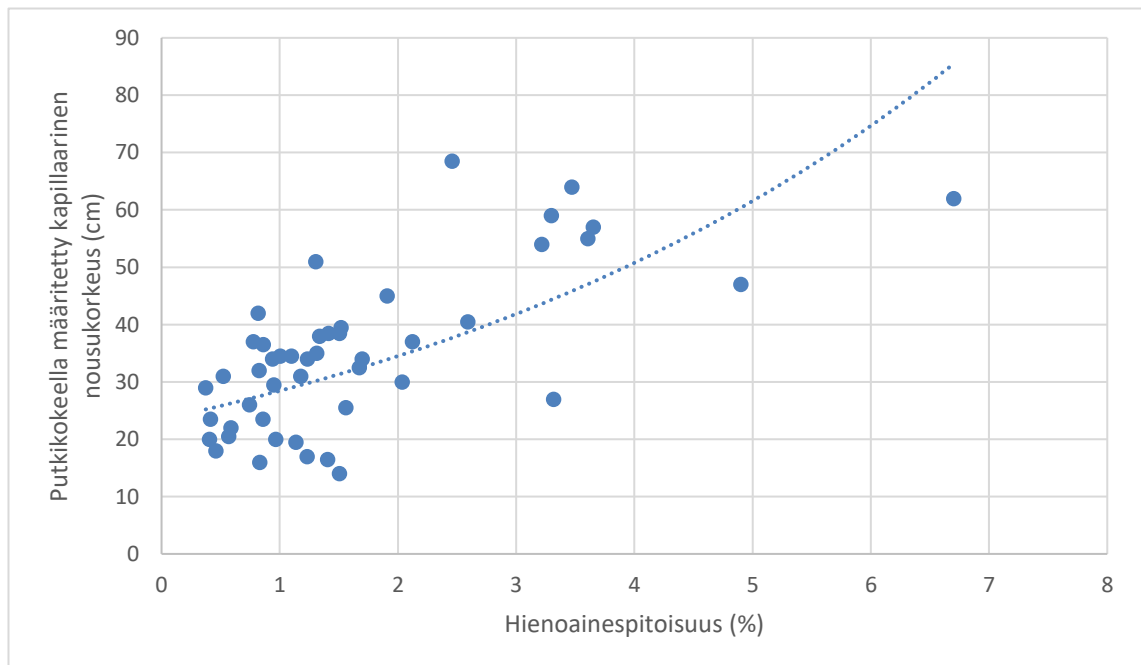
Seuraavissa tarkasteluissa ovat mukana rantaradan materiaalien ja referenssimateriaalin kokeista ainoastaan tiiviimmässä tilassa tehdyt kokeet. Tällöin vertailu on perusteltua suhteessa Kouvola-Kotka materiaalien kokeisiin, joissa näytteet tiivistettiin samalla tavalla.

Rantaradan materiaalien, referenssimateriaalin ja Kvl-Kot yhdistemateriaalien kapillaarikokeita pidettiin käynnissä huomattavasti pidempään kuin Kouvola-Kotka radan materiaalien kokeita pyrittäessä tutkimaan kapillaarisuuden kehittymistä pitkällä aikavälillä. Viikon kohdalla nousunopeudet olivat keskimäärin selkeästi suurempia kuin Kouvola-Kotka materiaaleilla. Jotta materiaaleja voidaan käyttää tarkasteluissa rinnakkain, täytyy rantaradan materiaalien ja referenssimateriaalin putkessa määritettyjä kapillaarisuustuloksia redusoida pienemmiksi vastaamaan paremmin muiden kokeiden suoritustapaa. Soveltuvimman leikkauskohdan valinta on tulkinnallista. Interpoloidaan tuloksista kapillaarinen nousukorkeus kohdassa, jossa nousunopeus laskee tasolle 0,5 cm/d. Kyseinen luku vastaa suurinta Kvl-Kot materiaalien mittauspöytäkirjoista löydettyä keskimääräisen nousunopeuden arvoa seitsemän päivän ylittäviltä päiviltä. Kyseisten materiaalien alkupe-
räiset tulokset ja analyysyjä varten redusoidut tulokset tarkentavine tietoineen on esitetty taulukossa 7.

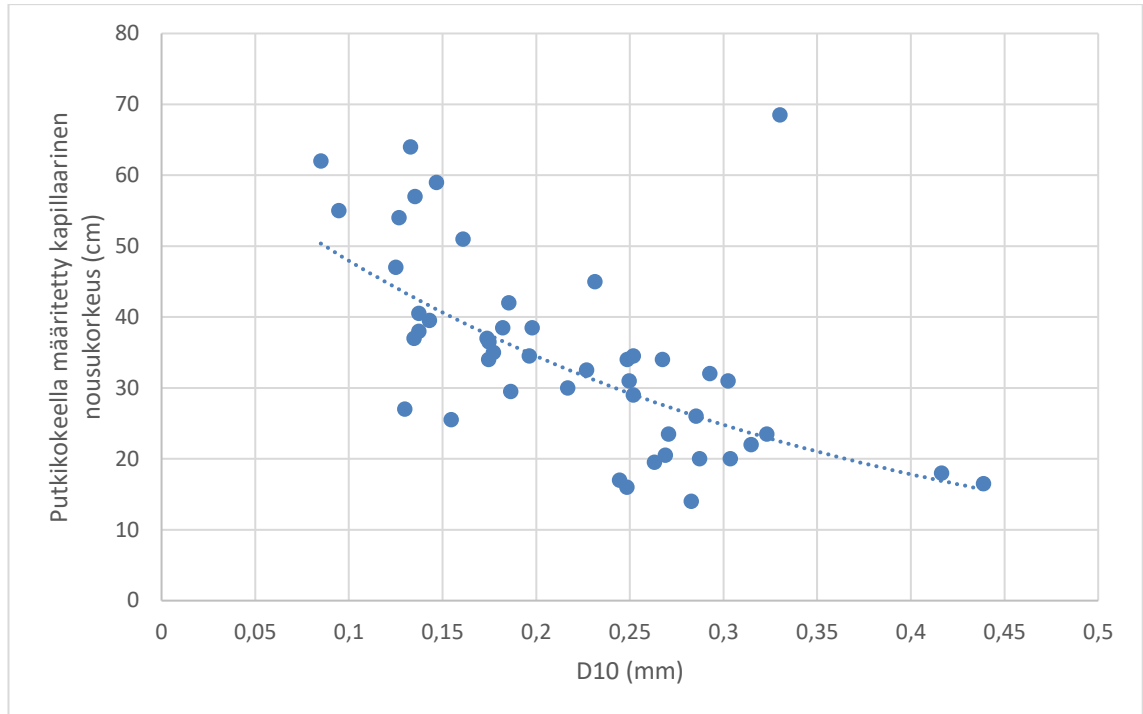
Taulukko 7. *Rantaradan materiaalien ja referenssimateriaalin pitkien kapillaarikokeiden tulosten redusoiminen yhdessä Kvl-Kot radan materiaalien kanssa tehtäviä tarkasteluja varten.*

	rr 44	rr 98	rr 137	referenssimateriaali
Kokeen kokonaissuoritus aika (d)	121	201	121	121
Kokeen lopullinen tulos kokonaissuoritus aikana (cm)	68	94	76,5	88
Aika kokeen aloituksesta nousunopeuden las- kiessa arvoon 0,5 cm/d (d)	16	28	16	44
Kapillaarinen nousukorkeus nousunopeuden las- kiessa arvoon 0,5 cm/d (cm)	47	62	57	68,5
Redusoidun nousukorkeuden osuus lopullisesta kokonaissuoritus aikana saavutetusta nousukor- keudesta (%)	69	66	75	78

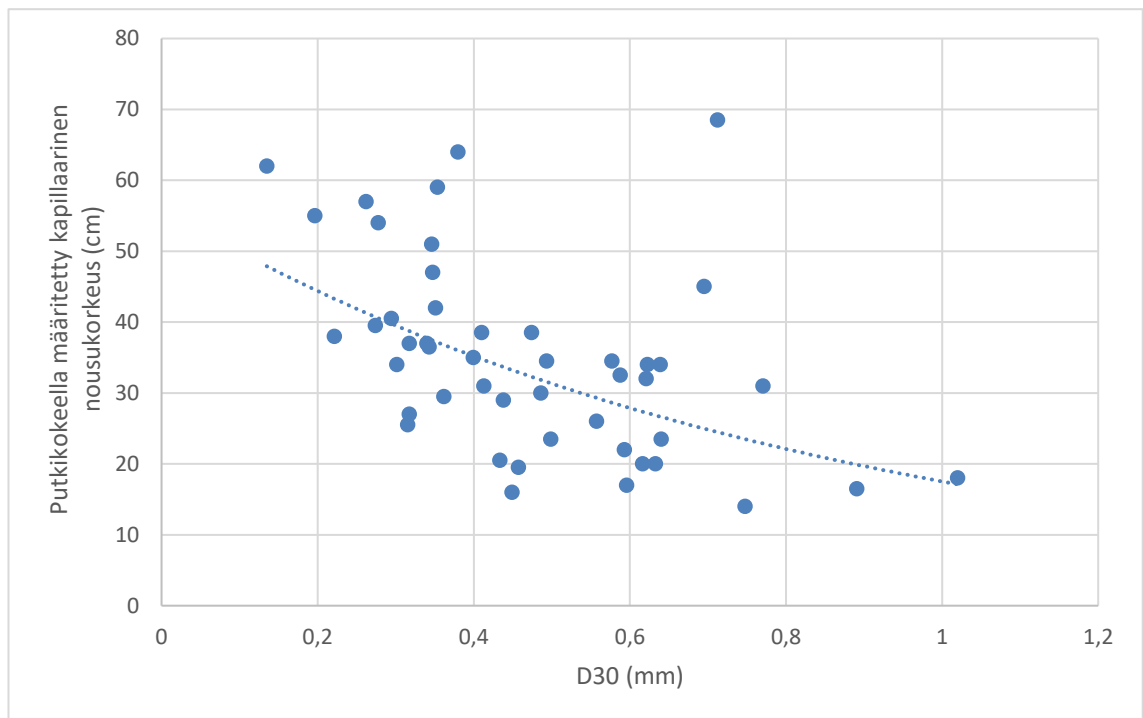
Kvl-Kot radan näytteistä on käytetty tarkasteluissa samoja näytteitä, joita käytettiin kapillaarimetrikoetulosten tarkasteluissa. Aloitetaan Kvl-Kot radan ja rantaradan materiaalien sekä referenssimateriaalin koetulosten yhteinen tarkastelu rakeisuuden näkökulmasta. Kuvissa 83-86 on esitetty kapillaarinen nousu putkikokeissa suhteessa samoihin rakeisuuden tunnuslukuihin kuin kapillaarimetrikokeiden tulosten tarkastelun yhteydessä. Mitä hienorakeisempaa materiaali oli, sitä suurempi kapillaarinen nousu siinä tapahtui. Mitä pienempiä rakeet ovat, sitä pienemmiksi niiden väliset huokokset muodostuvat ja täten vesi kykenee nousemaan korkeammalle. Selkeiden korrelaatio näkyy vertailtaessa kapillaarista nousua suhteessa d10-arvoon. Jo aikaisemmin todettiin referenssimateriaalin tuottaneen putkikokeissa odottamattoman suuren tuloksen suhteessa rakeisuuteen. Kyseinen materiaali esiintyy kuvissa suurimman pysty akselin arvon (68,5 cm) saavana pisteinä. On helppo huomata, että varsinkin rakeisuuden tunnuslukuna d10 ja d30 arvoja käytettäessä, piste sijoittuu voimakkaasti vasten vallitsevaa trendiä.



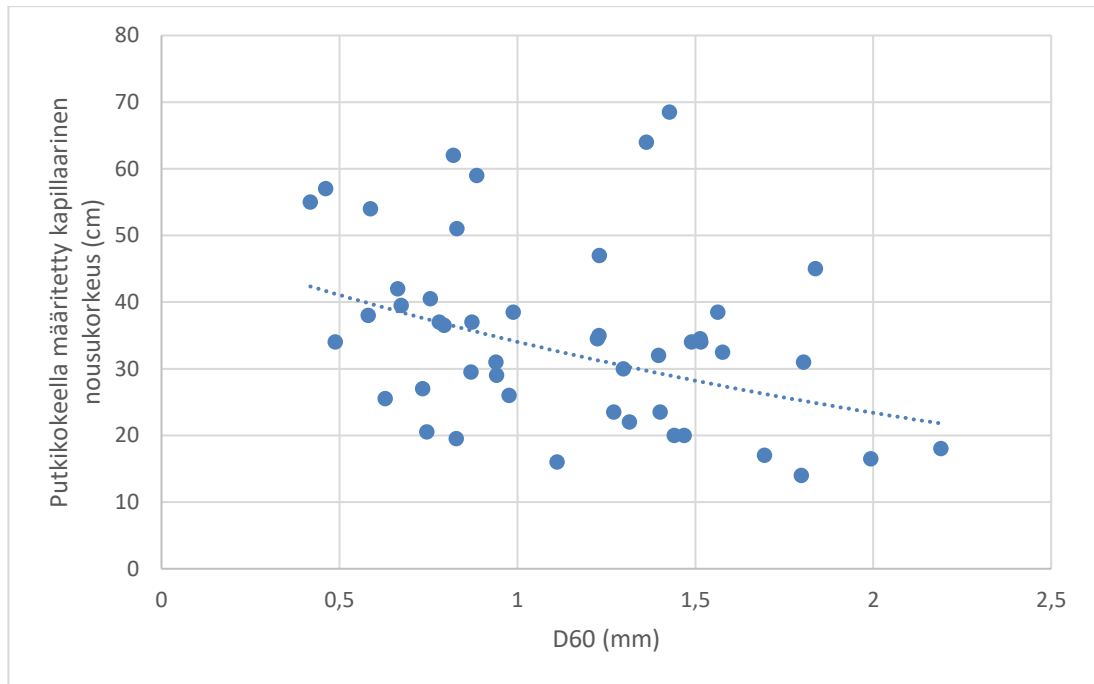
Kuva 83. *Näytteiden hienoainespitoisuuden vaikutus putkikokeiden tuloksiin.*



Kuva 84. Näytteiden D10-arvon vaikutus putkikokeiden tuloksiin.

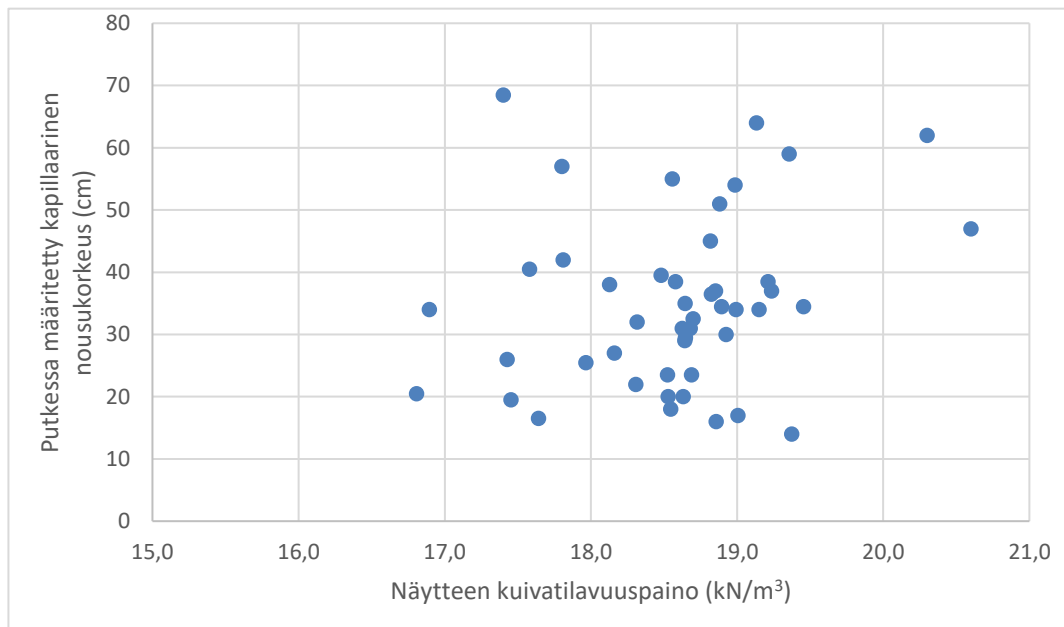


Kuva 85. Näytteiden D30-arvon vaikutus putkikokeiden tuloksiin.



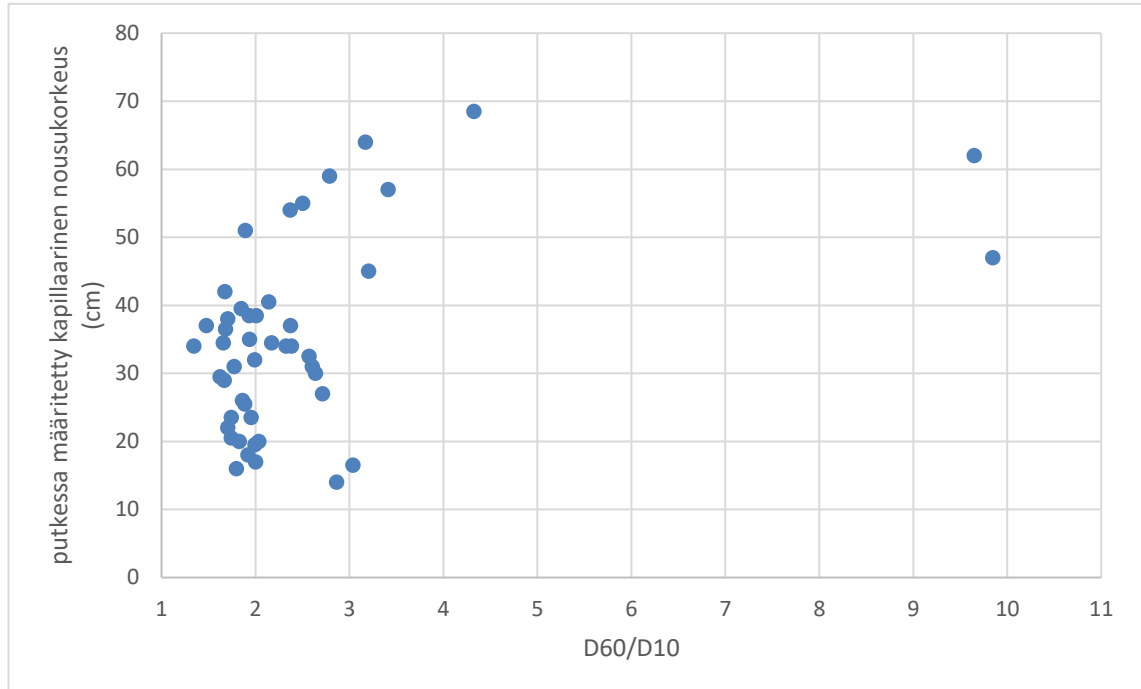
Kuva 86. Näytteiden D60-arvon vaikutus putkikokeiden tuloksiin.

Kuvassa 87 on esitetty putkikokeiden tulokset suhteessa näytteiden kuivatilavuuspainoihin. Näytteisiin pyrittiin kohdistamaan samanlainen tiivistystyö täryttämällä näyteputkea kunnes hiekkapatsaan korkeus ei enää merkittävästi pienentynyt. Näin ollen näytemateriaalien eriävät kuivatilavuuspainot kuvaavat lähinnä materiaalien luontaista pyrkimystä asettua eri kuivatilavuuspainoihin. Kuvasta ei ole havaittavissa selkeää riippuvuutta, vaan pisteiden sijoittuminen on varsin satunnaista.



Kuva 87. Putkikokeissa saavutetut kapillaariset nousut esitettyinä näytteiden kuivatilavuuspainojen suhteen.

Kuvassa 88 on esitetty kokeiden tulokset suhteessa näytteiden D60/D10-arvoon. Kapillaarisuuden ja suhteutuneisuuden välistä riippuvuutta ei voida tuloksista luotettavasti tulkitä. Kuten jo kapillaarimetrikokeiden tarkastelun yhteydessä todettiin, ovat lähes kaikki näytteet suhteutuneisuuksiltaan niin samanlaisia, ettei suhteutuneisuuden ja kapillaarisen nousun välisen oletetun korrelaation puuttuminen ole yllättävää.



Kuva 88. Suhteutuneisuuden vaikutus putkikokeiden tuloksiin.

Putkikokeissa minkään materiaalin kohdalla ei tehty useampaa koetta koetuloksen varmistamiseksi, sillä koetyypin toistettavuuden oletettiin olevan hyvä. Veden kapillaarisen nousukorkeuden visuaalisen havainnoinnin todettiin olevan tarkka menetelmä.

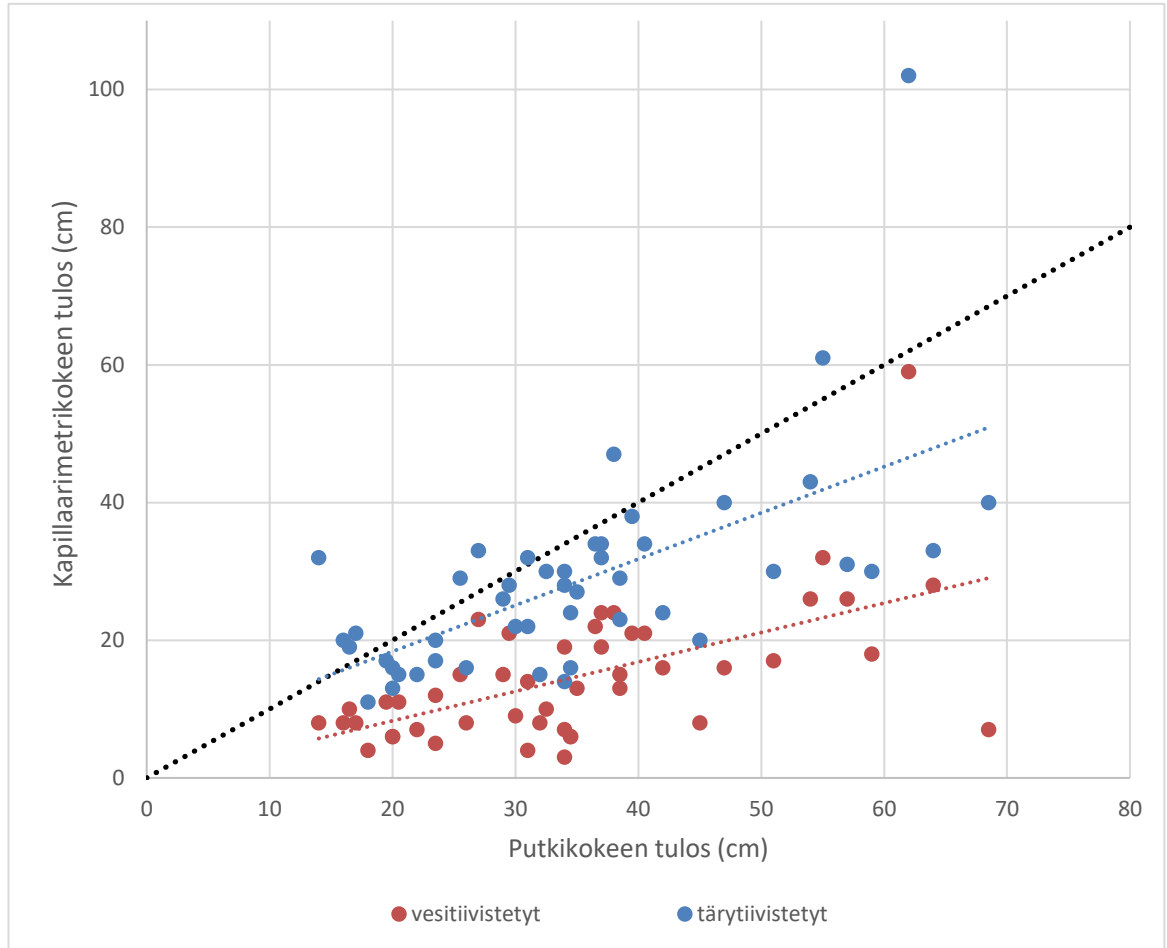
Muutamaa tarkoituksella löyhemmäksi jätettyä näytettä lukuun ottamatta täryraudalla tehtyä tiivistystyötä jatkettiin, kunnes maa-ainespatsaan yläpinta ei enää merkittävästi laskenut. Kokeita tehtiin eri läpimittaisissa putkissa. Tiivistyksen yhteydessä oletettiin, että maa-materiaalipatsas menee kutakuinkin samanlaiseen kuivatilavuuspainoon koko korkeudeltaan, vaikka näytemateriaalipatsaassa alaspäin liikuttaessa yläpuolisen maa-materiaalipatsaan tuottama paine kasvaakin. Käytännössä näytteen alaosa on todennäköisesti mennä hieman tiiviimmäksi kuin yläosa, mikä voidaan nähdä virhelähteenä. Materiaalin tiivistäminen osissa nähtiin epäkelvoksi menetelmäksi mahdollisten lajittuneiden vyöhykkeiden syntymisen vuoksi.

7.4 Kapillaarimetri- ja putkikokeiden tulosten vertailu

Koska sekä kapillaarimetrikoe että putkikoe käytetään maamateriaalin kapillaarisen nousun määrittämiseen, on syytä verrata koetyyppien tuottamia tuloksia toisiinsa. Tärytiivistetyn kapillaarimetrikokeen tulos edusti keskimäärin 85 %:a putkikokeen tuloksesta. Vesitiivistetyn kapillaarimetrikokeen tulos sen sijaan edusti keskimäärin vain 42 %:a putkikokeen tuloksesta.

Kuvassa 89 on esitetty saadut kapillaarimetritulokset suhteessa putkessa tehtyjen kapillaarisen nousukorkeusmääritysten tuloksiin. Punaiset pisteet edustavat vesitiivistettyjä

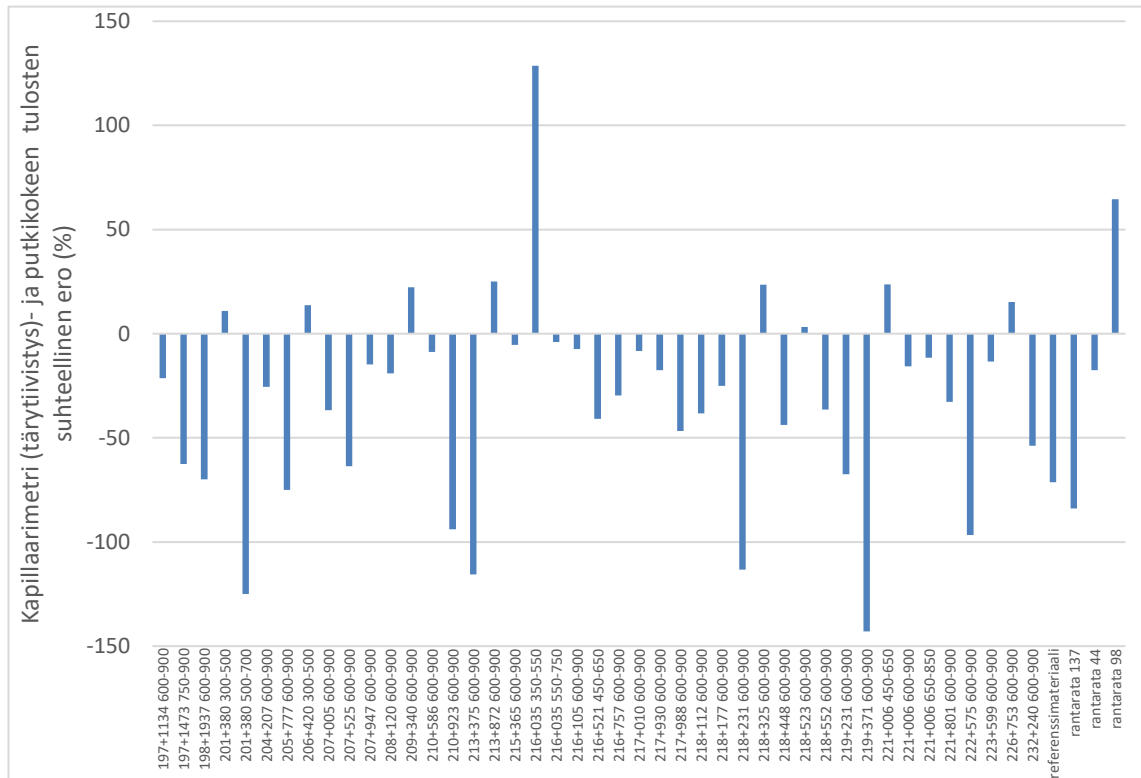
ja siniset tärytiivistettyjä kapillaarimetrinäytteitä. Putkikokeen tulos on kummassakin tapauksessa luonnollisesti sama. Kuvaajasta havaitaan heikohko korrelaatio, jossa suuri kapillaarisen nousun tulos putkessa ennustaa myös suurta kapillaarimetritulosta. Kuvaajassa on kuitenkin paljon hajontaa kummankin tiivistystavan tapauksessa. Musta pisteiviiva edustaa tapausta, jossa kumpikin koe olisi tuottanut saman tuloksen.



Kuva 89. Kapillaarimetri- ja putkikokeiden tulosten korrelaatio.

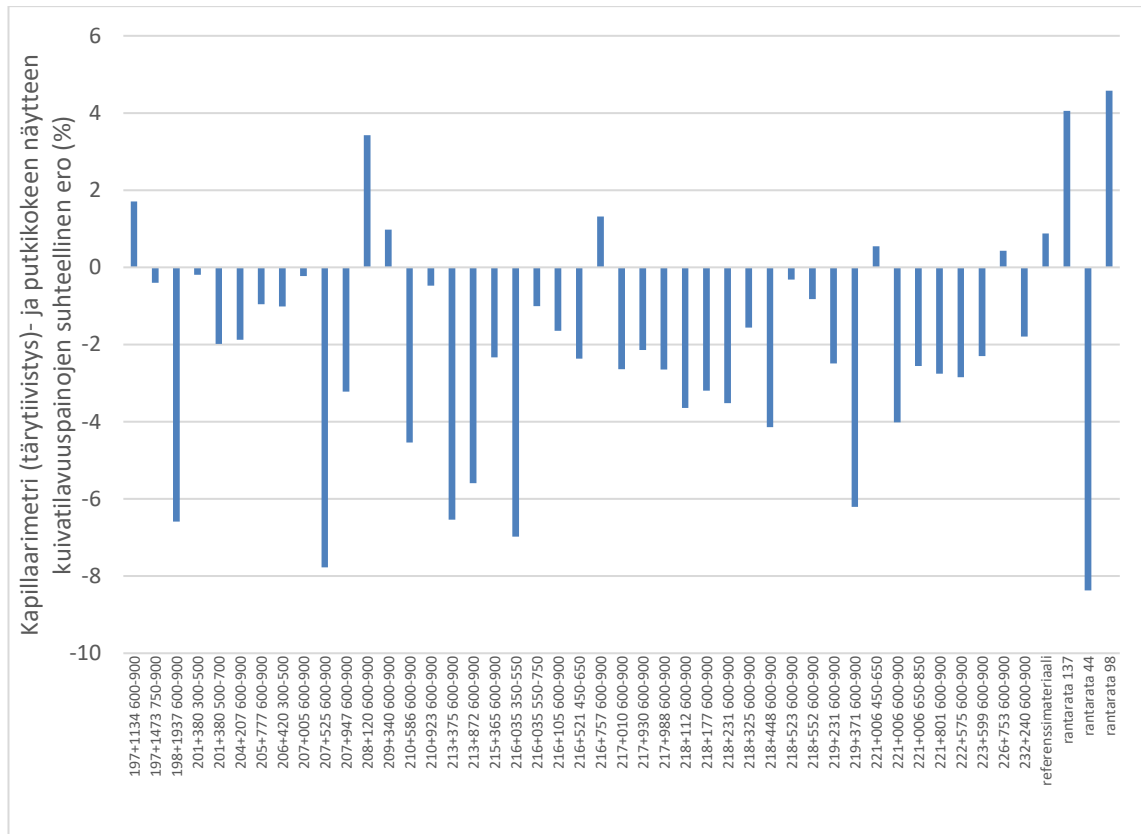
Kapillaarimetrikokeissa näytteen kuivatilavuuspaino vastasi paremmin putkikokeen näytteen kuivatilavuuspainoa tärytiivistys- kuin vesitiivistystekniikkaa käytettäessä. Tarkastellaan eri tavoilla tiivistettyjen kapillaarimetrikoe näytteiden keskimääräisiä kuivatilavuuspainoja suhteessa putkikokeiden näytteisiin. Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoe näytteiden keskimääräinen kuivatilavuuspaino ($18,1 \text{ kN/m}^3$) edustaa putkikokeiden keskimääräistä kuivatilavuuspainoa ($18,5 \text{ kN/m}^3$) paremmin kuin vedellä tiivistettyjen kapillaarimetrikoe näytteiden keskimääräinen kuivatilavuuspaino ($17,3 \text{ kN/m}^3$). Putkikokeen ja kapillaarimetrikokeen tulosten eroavaisuuksia tarkasteltaessa onkin syytä keskittyä tärytiivistettyihin näytteisiin näiden tiivistytilan edustaessa paremmin putkikokeiden näytteiden tiivistystä. Kuten kuvasta 89 nähdään, sijoittuu tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden lineaarisovite melko lähelle samoja koetuloksia kuvaavaa mustaa pisteiviivaa. On perusteltua olettaa, että mikäli tärytiivistettyjen näytteiden kuivatilavuuspainot olisivat olleet keskimäärin samat kuin putkikokeissa, sijaisi tärytiivistettyjen kapillaarimetrinäytteiden lineaarisovite hyvin lähellä kummallakin akselilla identtisiä tuloksia kuvaavaa pisteiviivaa. Vaikuttaa siltä, että suurin osa kapillaarimetrikokeen ja putkikokeen tulostasojen erosta selittyy näytteiden tiivistytilaerojen kautta. Asiaan tulee kuitenkin suhtautua pienellä varauksella aikaisemmin mainitun kapillaarimetrikokeiden tärytiivistettyjen näytteiden mahdollisen lajittumisen ollessa vaikeasti arvioitavissa.

Kaikkien materiaalien tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden ja putkikokeiden tulosten suhde ei ole samanlainen. Kuvassa 90 on esitetty kapillaarimetri- ja putkikokeiden tulosten suhteet näytemateriaaleittain tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden tapauksessa. Positiiviset arvot edustavat tapauksia, joissa kapillaarimetrikokeen tulos on ollut putkikokeen tulosta suurempi ja negatiiviset arvot tapauksia, joissa kapillaarimetrikokeen tulos on saanut putkikokeen tulosta pienemmän arvon.



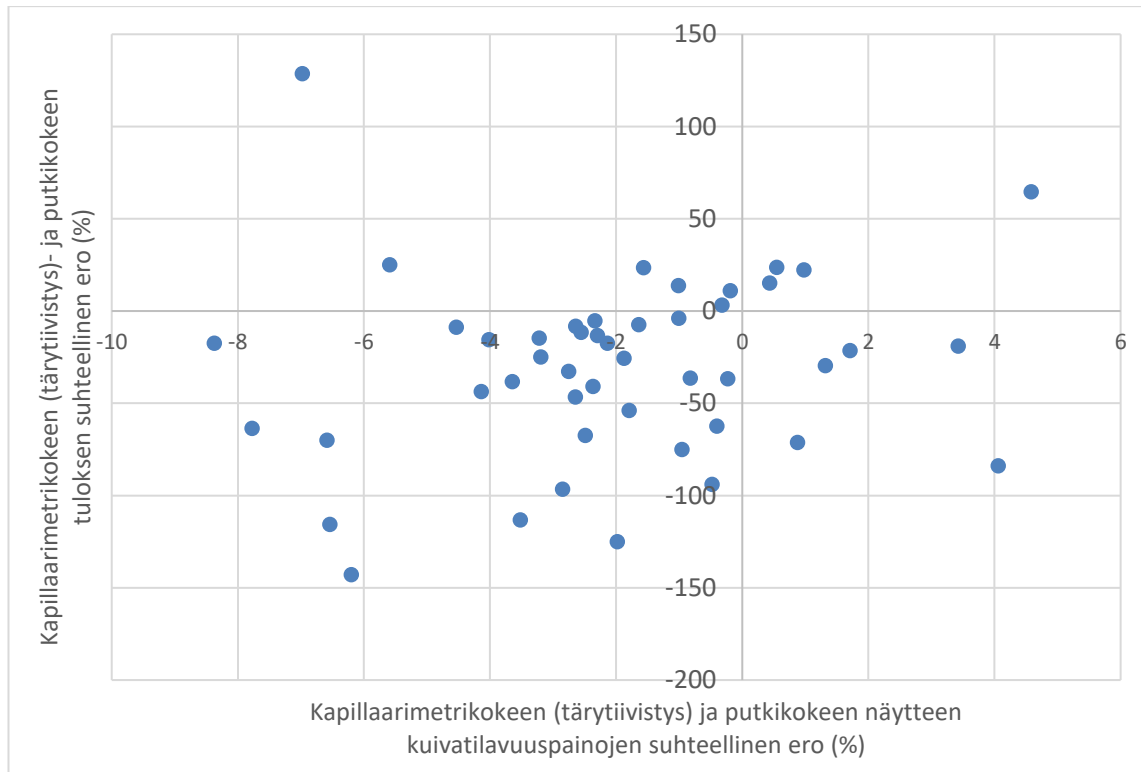
Kuva 90. Kapillaarimetri (tärytiivistys)- ja putkikokeen tulosten suhteellinen ero näytemateriaaleittain.

Tarkasteltaessa, mitkä asiat vaikuttavat kapillaarimetrikokeen ja putkikokeen tulosten suhteen arvoon, on kiinnitettävä huomiota kuivatilavuuspainoihin, jotka kokeiden näytteissä ovat vallinneet. Kuvassa 91 on esitetty tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeen näytteiden kuivatilavuuspainojen ja putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen suhteelliset erot. Positiivisten tulosten tapaukset edustavat näytemateriaaleja, joissa kapillaarimetrikokeen näyte on ollut putkikokeen näytettä tiiviimpi. Suurin osa näytemateriaaleista on saanut tarkastelussa kuitenkin negatiivisen arvon. Näissä tapauksissa kapillaarimetrikokeen näyte on ollut putkikokeen näytettä löyhemmässä tilassa. Suhteellisten erojen keskiarvo on -2,0 %. Yhdeksällä materiaaleista kapillaarimetrikokeen kuivatilavuuspaino on muodostunut putkikokeen kuivatilavuuspainoa suuremmaksi, vaikka yleisesti kyseinen suuruus suhde ilmenee tuloksissa toisin päin. On mahdollista, että ilmiö selittyy testattavan materiaalin jollain ominaisuudella, johon koetyyppien erilaiset reagoivat eri tavalla. Voi myös olla, että kyseessä on vain tulosten satunnaisesta vaihtelusta johtuva ilmiö. Kuten aikaisemmin todettua, kapillaarimetrikokeen näytteiden kuivatilavuuspainot eivät ole täysin tarkkoja. Putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainot sen sijaan ovat varsin tarkkoja johtuen näytteen suuremmasta korkeudesta ja tästä seuraavasta tilavuuden määrittämisen suuremmasta tarkkuustasosta.



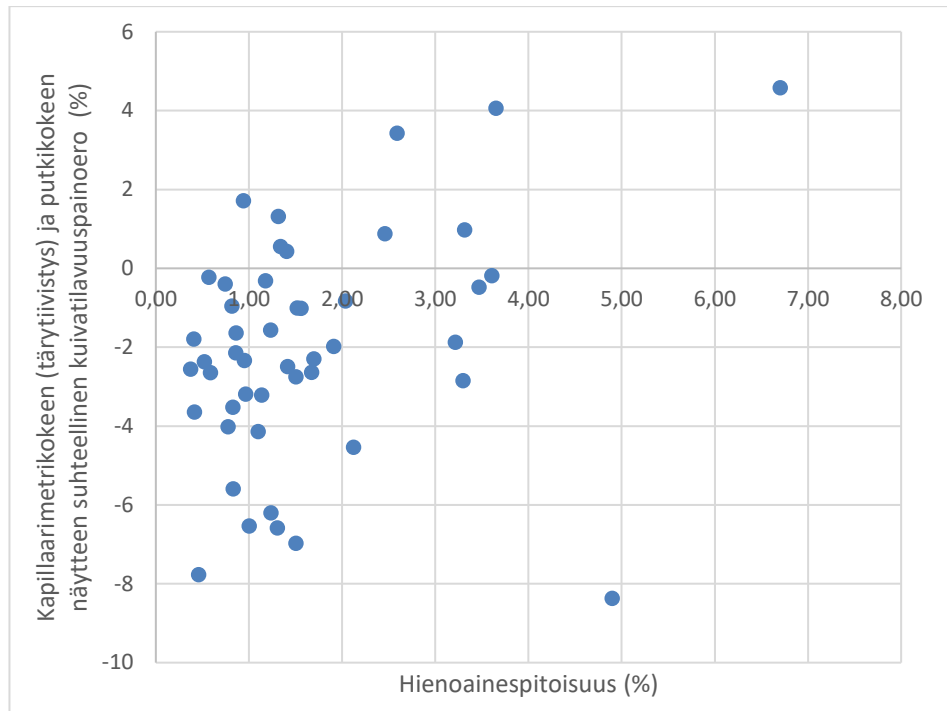
Kuva 91. Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoenäytteiden ja putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen suhteelliset erot näytemateriaaleittain.

Tarkastellaan, voidaanko tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden ja putkikokeiden tulosten erojen ja kyseisten kokeiden näytteiden kuivatilavuuspainoerojen välille löytää yhteyttä. Kuvassa 92 on esitetty eri koetyyppien tulosten erot kuivatilavuuspainoerojen suhteen. Kuvaajasta ei ole tulkittavissa selkeää korrelaatiota.

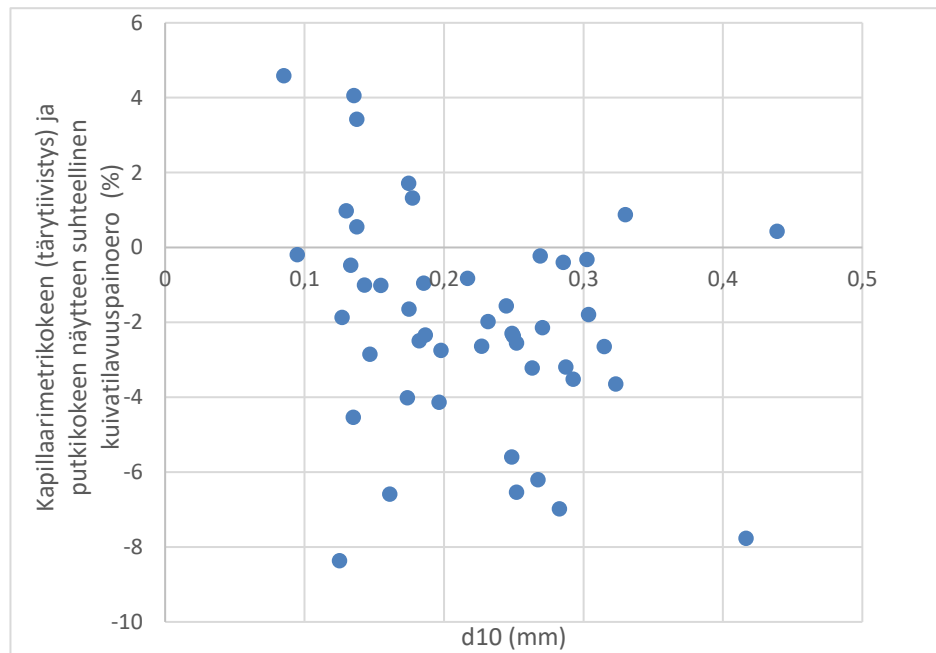


Kuva 92. Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoe­näytteiden ja putkikokeiden näytteiden suhteellisten kuivatilavuuspainoerojen tarkastelu suhteessa kyseisten kokeiden tulosten suhteellisiin eroihin.

Jo kuvasta 91 huomattiin, että kaikkien materiaalien tiivistylaero ei ollut sama verrattaessa eri koetyyppejä. Putkikokeissa näytteet olivat tiivistettäessä täysin kuivia ja kapillaarimetrikokeissa vedellä kyllästettyjä. Vaikka näytteet tiivistettiin tiivistysraudalla sekä putkikokeissa, että tiiviimmän tilan kapillaarimetrikokeissa, ei ole varmaa onko erilainen kosteustila näytteissä tuottanut erilaisen tiivistyksen eri ominaisuudet omaavissa näytemateriaaleissa. Tarkastellaan, onko näytemateriaalien tiivistymiskäyttäytymisessä eroa rakeisuuden suhteen. Kuvissa 93 ja 94 on esitetty tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoe­näytteiden kuivatilavuuspainojen ja putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainojen suhteelliset erot suhteessa hienoainespitoisuuteen ja d_{10} -läpäisyarvoon. Kuvaajien pysty­akselin positiiviset lukemat edustavat näytemateriaaleja, joissa kapillaarimetrikokeen näytteen kuivatilavuuspaino oli suurempi kuin putkikokeen näytteen kuivatilavuuspaino. Kyseisen akselin negatiiviset arvot kuvaavat näytemateriaaleja, joissa putkikokeen näytteen kuivatilavuuspaino oli suurempi kuin kapillaarimetrikokeen näytteen kuivatilavuuspaino. Kuvista ei ole tulkittavissa selkeää riippuvuussuhdetta.



Kuva 93. Tiivistymiskäyttäytymisen erot hienoainespitoisuuden suhteen.

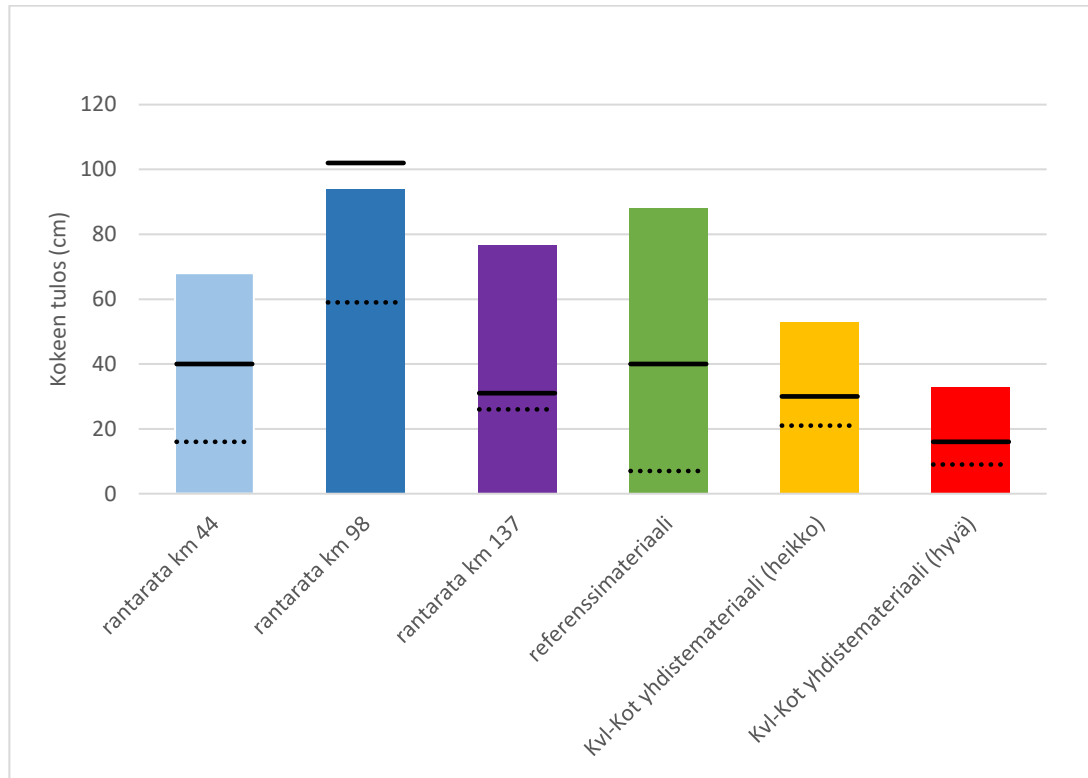


Kuva 94. Tiivistymiskäyttäytymisen erot d_{10} -läpäisyarvon suhteen.

7.5 Kolmiaksaalikoetulosten tarkastelu suhteessa kapillaarisuuksiin ja rakeisuuksiin

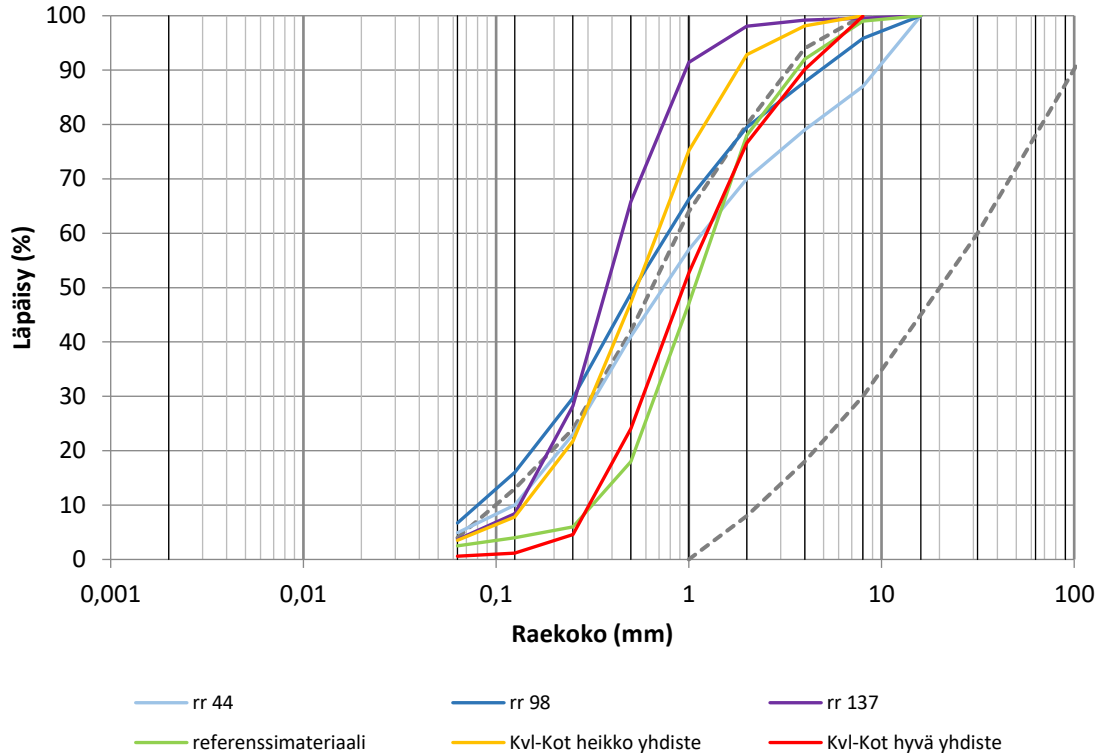
7.5.1 Materiaalien kapillaarisuudet ja rakeisuudet

Kuvassa 95 on esitetty tarkasteltavien materiaalien putkimenetelmällä ja kapillaarimetriellä tehtyjen kapillaarisuusmäärittysten tulokset. Kuvassa pylvään korkeus edustaa putkikokeen tulosta. Vaakaviivat edustavat tärytiivistettyjen (jatkuva viiva) ja vesitiivistettyjen (katkoviiva) kapillaarimetrikokeiden tuloksia.



Kuva 95. Kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tulokset tarkasteltavien materiaalien osalta.

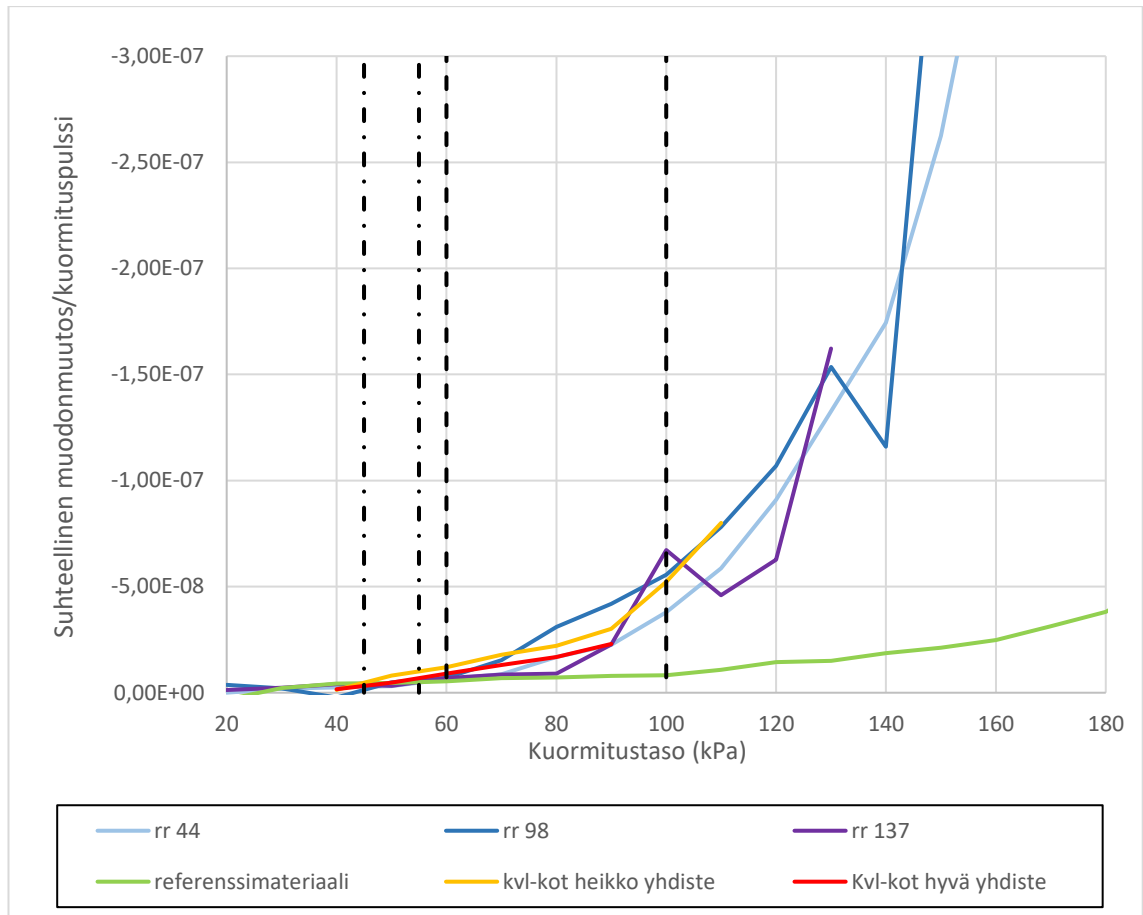
Tarkasteltavien materiaalien rakeisuudet on esitetty kuvassa 96. Kuvan harmaat katkoviivat rajaavat alusrakennemateriaalien nykyisen rakeisuusohjealueen. Kuten kuvasta huomataan, sijoittuvat materiaalien rakeisuudet ohjealueen sisään kokonaisuudessaan vain referenssimateriaalilla ja Kvi-Kot hyvällä yhdistemateriaalilla. Muut materiaalit poikkeavat ohjealueelta joko rakeisuuskäyrän ylä- tai alapäästä.



Kuva 96. Tarkasteltavien materiaalien rakeisuudet.

7.5.2 Osittain kyllästyneiden näytteiden syklisen kolmiaksoalikoikeiden tulosten tarkastelu

Kuvassa 97 on esitetty tarkasteltaville materiaaleille osittain kyllästyneessä tilassa tehtyjen syklisen kolmiaksoalikoikeiden tulokset. Tarkastelu perustuu yhden pulssin aiheuttaman keskimääräisen suhteellisen muodonmuutoksen havainnointiin kuormitustasotain. Kuvaan on rajattu katkoviivoilla alue, jolle tavaraliikenteen aiheuttamat kuormitukset eristyskerroksessa tyypillisesti sijoittuvat. Matkustajaliikenteen aiheuttamien kuormitusten alue eristyskerroksessa on vastaavasti osoitettu kuvassa pistekatkoviivalla. Kuvan 97 rr 98 ja rr 137 materiaalien kuvaajissa esiintyvät terävät piikit ovat saattaneet aiheuttaa esimerkiksi kuormituksessa pidetyistä tauoista.



Kuva 97. Osittain kyllästettyjen näytteiden syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset.

Näytteiden sullonnassa ja kuormituksessa käytetyt vesipitoisuudet vaihtelivat 6 ja 7 prosenttiyksikön välillä. Näytteissä vallinneet kyllästysasteet on esitetty taulukossa 8. Rr 44 ja rr 98 materiaalien kyllästysasteiden suuruusluokka (60 %-65 %) on hieman suurempi kuin muiden materiaalien kyllästysasteiden suuruusluokka (35 %-40 %). On vaikea arvioida tarkasti, onko esitetyllä kyllästysaste-erolla vaikutusta materiaalien kuormituskäyttäytymiseen. Oletettavasti kyllästysaste eron vaikutus ei kuitenkaan ole suuri.

Taulukko 8. Osittainkyllästyneiden kolmiaksaalikoenäytteiden kyllästysasteet.

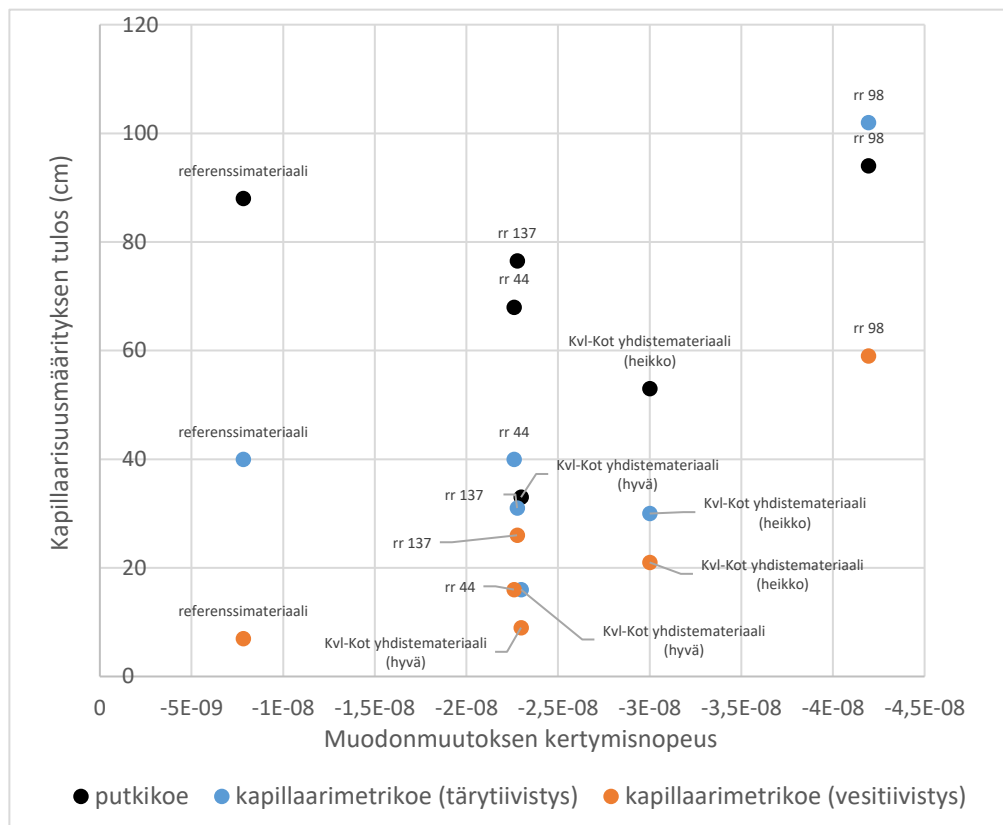
	rr 44	rr 98	rr 137	referenssimateriaali	Kvl-Kot heikko yhdiste	Kvl-Kot hyvä yhdiste
Kyllästysaste (%)	65	60	35	40	40	40

Mitä pienempiä muodonmuutokset näytteessä ovat kullakin kuormitustasolla, sitä laadukkaampana materiaalia voidaan pitää. Kuvasta 97 huomataan, että pienillä kuormitustasoilla kaikkien materiaalien muodonmuutokset ovat pieniä. Kuormitustason noustessa muodonmuutokset kasvavat kiihtyvään tahtiin. Tarkastelun kannalta mielenkiintoisin alue on aikaisemmin mainittu tavaraliikenteen aiheuttamien kuormitusten alue. Referenssimateriaalin käyttäytyminen on ollut kokeissa erittäin hyvää. Siinä muodonmuutokset ovat pysyneet hyvin pieninä jopa erittäin korkeilla kuormitustasoilla. Henkilöliikenteen aiheuttamien kuormitusten alueella kaikki materiaalit ovat suoriutuneet kokeissa erittäin hyvin. Referenssimateriaalia lukuun ottamatta materiaalien muodonmuutokset ovat läheneet kasvamaan selkeästi tavaraliikenteelle ominaisen kuormitustason alueella. Muo-

donmuutokset ovat kuitenkin pysyneet kaikilla materiaaleilla verrattain pieninä tavaraliikenteenkin kuormitusalueella ja kyseisten materiaalien voidaan otaksua toimivan radan alusrakenteessa ongelmitta kyseisten kyllästysasteiden tapauksessa. Kvl-Kot hyvän yhdistemateriaalin kuormitus on keskeytetty jo 90 kPa kuormitustason kohdalla, joten sen käyttäytyminen jää kyseisen kohdan jälkeen pimentoon.

Tutkitaan kuormitustulosten ja kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tulosten mahdollista korrelaatiota kuvaamalla kuormitustuloksia kuormitustason 90 kPa kohdasta otetuilla suhteellisen muodonmuutoksen kertymisnopeuksilla. Tarkastelun suorittaminen kyseisen kuormitustason kohdasta otetuilla arvoilla kuvaa materiaalien käyttäytymistä verrattain raskaan tavaraliikenteen kuormituksen alaisena. Kyseisen kuormitustason kohdassa suhteellisen muodonmuutoksen kertymisnopeudet ovat kaikilla kuvaajilla sellaiset, että ne edustavat kohtuullisen hyvin kuvaajan yleistä kulkua kyseisen kuormitustason ympäristössä.

Kuvassa 98 on esitetty kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tulokset 90 kPa kuormitustasoa vastaavien suhteellisten muodonmuutoksen kertymisnopeuksien suhteen. Muodonmuutoksen kertymisnopeutta kuvaavan vaak-akselin arvot pienenevät akselilla oikealle liikuttaessa. Kuvassa on käytetty kolmiaksiaalikoekiden muodonmuutosnopeuksien arvoja alkuperäisessä negatiivisessa muodossaan. Näin ollen mitä enemmän oikealla piste sijaitsee, sitä suurempi on sen kuvaama muodonmuutosnopeus.



Kuva 98. Kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tulokset esitettynä suhteessa 90 kPa kuormitustasoa vastaaviin muodonmuutosten kertymisnopeuksiin osittain kyllästytneiden näytteiden syklisissä kolmiaksiaalikoekissa.

Näytepisteitä on niin vähän, ettei korrelaatioiden voimakkuuksien tulkitseminen ole luotettavaa. Voidaan kuitenkin otaksua, että jos suuri kapillaarisuusmäärityksen tulos ennustaisi suurta muodonmuutoksen kertymisnopeuden arvoa luotettavasti, näkyisi tämä

kuvaajassa. Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden ja putkikokeiden osalta pisteet eivät asetu kuvaajassa johdonmukaisesti nousevaan järjestykseen vaan niiden asettumista voidaan pitää varsin satunnaisena. Vesitiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden osalta kuvaajassa voidaan tulkita heikko trendi, jonka mukaan suuri kapillaarikokeen arvo tuottaa myös suuren muodonmuutoksen kertymisnopeuden arvon. Satunnaisuus on kuitenkin voimakasta ja näytepisteiden määrä hyvin pieni.

Kuvaan 98 lisättyjen materiaalitunnusten avulla voidaan yrittää arvioida aikaisemmin esitettyjen kyllästysaste-erojen vaikutusta kuormituskäyttäytymisen ja kapillaarimäärittysten tulosten välisen yhteyden tulkintaan. Kyllästysasteen nostaminen 40 %:sta 60 %:iin todennäköisemmin heikentää materiaalin kykyä vastustaa pysyvää muodonmuutosta kuin parantaa sitä. Tällöin voitaisiin otaksua rr 44 ja rr 98 näytteitä edustavien pisteiden sijaitsevan mahdollisesti hieman enemmän vasemmalla, jos niissä käytetty kyllästysaste olisi ollut vain noin 40 %. On kuitenkin muistettava, että ainoastaan referenssimateriaalin kuormituskäyttäytyminen erosi selkeästi muiden materiaalien kuormituskäyttäytymisestä kokonaisuutta kuvasta (kuormituskuva) tarkasteltaessa. Kun otetaan vielä huomioon, että kuormituskäyttäytymiskuvaajien pääjoukossa kuvaajien keskinäiseen asettumiseen liittyy satunnaisuudesta johtuvaa epävarmuutta, voidaan kyllästysaste-eron mahdollinen merkitys nähdä kaiken kaikkiaan pienenä tulkittaessa kuvaa 98.

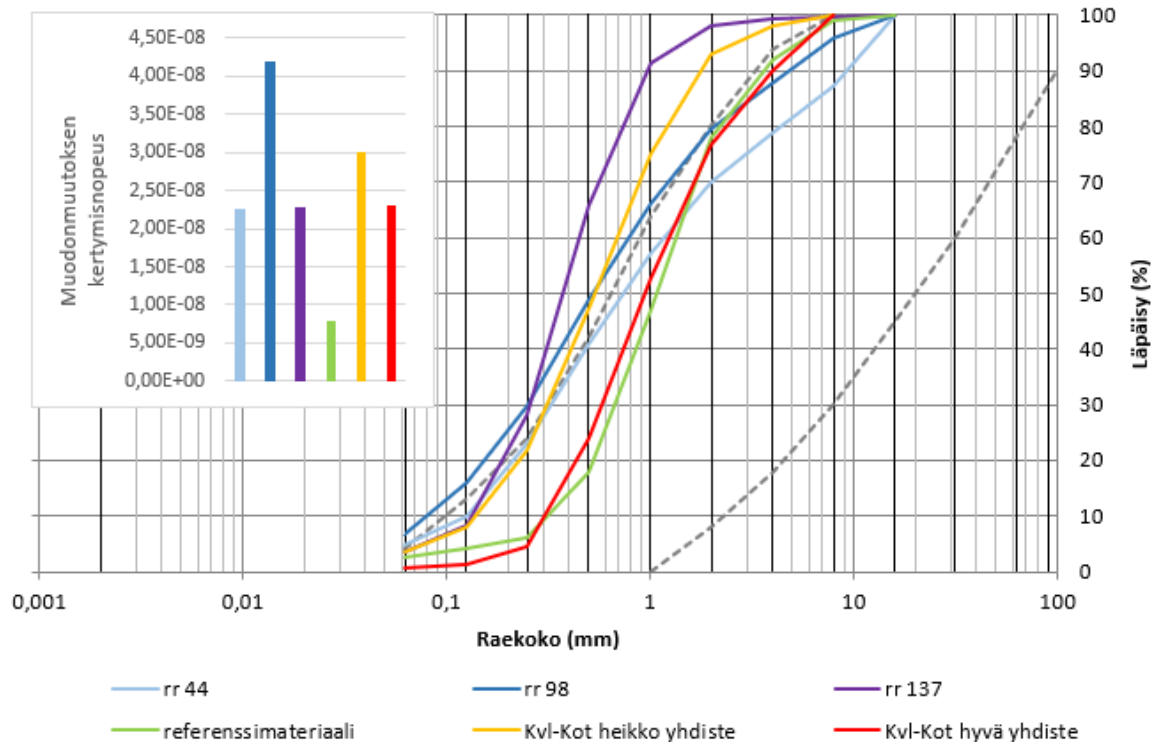
Rakeisuus on ilmeinen alusrakennemateriaalin laadunarviointikriteeri. Materiaalin rakeisuuskäyrän on kuljettava tietyllä ohjealueella, jotta materiaali täyttää radan alusrakennemateriaalin kelpoisuusvaatimukset. Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka materiaalien rakeisuuskäyrien osuvuus ohjealueelle suhteutuu materiaalien muodonmuutosten kertymisnopeuksien arvoihin. Kuvassa 99 on esitetty materiaalien rakeisuudet ja niiden osuvuus katkoviivalla kuvatulle ohjealueelle. Kuvan vasempaan yläreunaan on lisätty tarkastelua helpottamaan 90 kPa jännitystasoa vastaava muodonmuutoksen kertymisnopeuden arvo palkkikuvaajana rakeisuuskuvaajia vastaavilla värikoodeilla. Palkkikuvaajassa muodonmuutoksen kertymisnopeuden arvot on ilmaistu itseisarvoina. Suoritetaan tarkastelu edeten muodonmuutostason mukaan hyvistä materiaaleista heikompiin päin.

Referenssimateriaalin muodonmuutostaso on hyvin pieni ja sen rakeisuuskäyrä kulkee sulavasti rakeisuuden ohjealueella kuitenkin hieman pystymmässä ohjekäyrien suuntaan verrattuna. Rr 44, rr 137 ja Kvl-Kot hyvä yhdistemateriaali omaavat kutakuinkin saman muodonmuutostason rakeisuuskäyrien ollessa hyvinkin erilaisia. Kvl-Kot hyvän yhdisteen rakeisuus on hyvin samankaltainen kuin referenssimateriaalin. Ainoaksi merkittävänä eroksi jää sen pienempi hienoainespitoisuus verrattuna referenssimateriaaliin. Yleensä hienoainespitoisuuden nousu yhdistetään heikompaan kuormituskäyttäytymiseen. Tällöin tarkastelun näkökulma on kuitenkin usein täysin kyllästyneessä tilanteessa, jossa hienorakeinen aine pienentää materiaalin vedenläpäisevyyttä ja estää veden nopean poistumisen kuormituksen alaisena. Osittain kyllästyneessä tilanteessa hienorakeisessa maassa huokoskulmaveden tuottama näennäinen koheesio on kuitenkin suurempaa kuin karkearakeisessa [41]. Toisaalta kuvasta 59 huomattiin, että referenssimateriaalilla huokoskulmavesi oli tuottanut staattisissa kolmiaksoalikoikeissa lisälujuutta vain 40 %:a pienemmällä kyllästysasteen arvoilla.

Rr 44 on käyrän alapäätä lukuun ottamatta paremmaksi luokiteltavaa materiaalia kuin rr 137. Rr 44 omaa kuitenkin lievästi suuremman hienoainespitoisuuden kuin rr 137. On ainakin näennäisesti ristiriitaista, että huomattavasti paremmin ohjealueelle sijoittuva rr 44 on saanut saman tuloksen kuin rr 137.

Rr 137 on tasarakeisempaa kuin rr 44. Jos tasarakeisuuden kasvu korreloisi pienempien pysyvien muodonmuutosten kanssa, voitaisiin tämän ajatella nousevan merkittäväksi vaikuttavaksi tekijäksi materiaalin keskimääräisen raekoon rinnalle. Tämä voisi selittää kyseisten käyrien muodonmuutostyttäytymisen samankaltaisuuden. Toisaalta käyrät

ovat sitä etäämmällä toisistaan, mitä korkeamman läpäisyprosentin arvoa tarkastellaan. Mikäli käyrien yläosien kulku olisi kuormituskestävyyden näkökulmasta epäoleellisempaa kuin käyrien alaosien, voisi tämä osaltaan selittää rr 137 ja rr 44 muodonmuutostasojen samankaltaisuutta. On tärkeää kuitenkin muistaa, etteivät kolmiaksoalituloksetkaan välttämättä anna täydellistä kuvaa materiaalin todellisesta käyttäytymisestä.



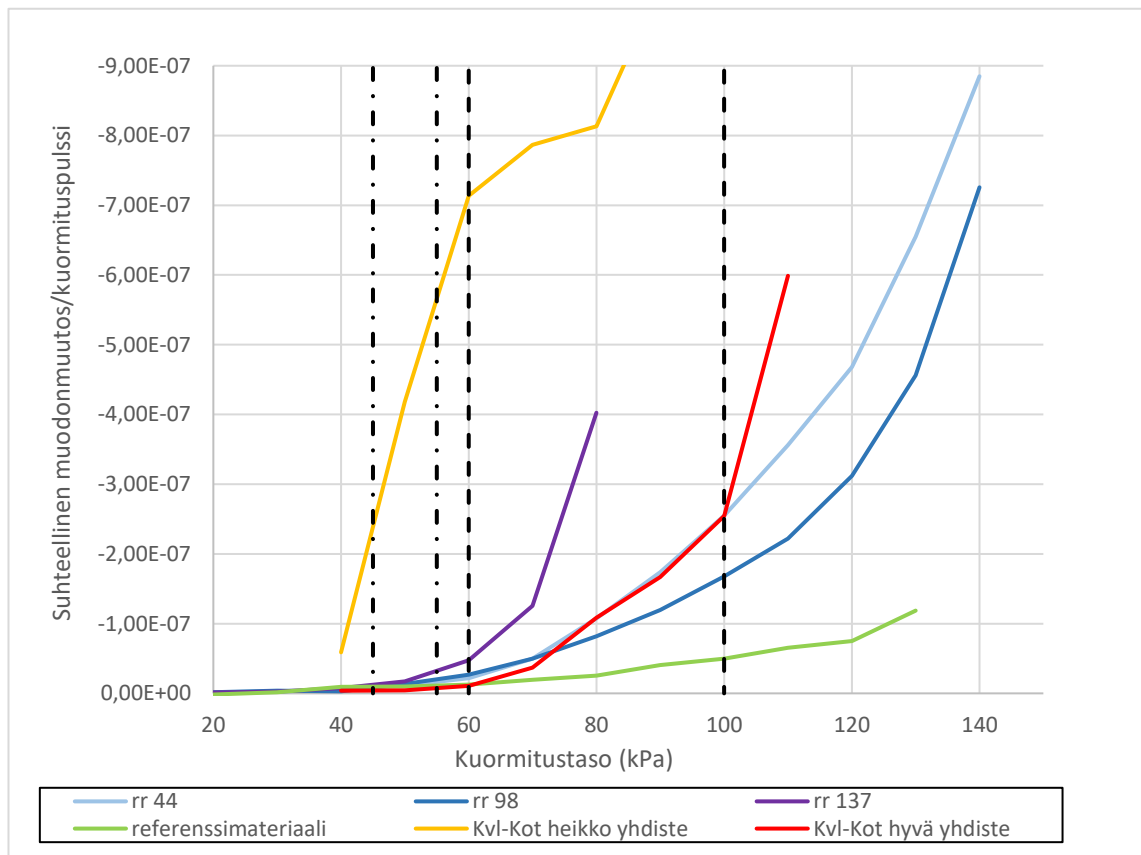
Kuva 99. 90 kPa kuormitustasoa vastaavat osittain kyllästyneiden näytteiden muodonmuutostasot esitettynä materiaalien rakeisuuskäyrien yhteydessä. Katkoviivat rajaavat rakeisuuden ohjealueen.

Rr 44 ja 98 materiaalien käyrät ovat muodoiltaan hyvin samanlaisia, rr 98 ollessa kuitenkin hieman hienorakeisempaa. Rr 137 ja Kvl-Kot hyvän yhdistemateriaalin käyrät ovat myös muodoiltaan varsin samankaltaisia, rr 137 ollessa kuitenkin huomattavasti hienorakeisempaa. Kummassakaan tapauksessa hienorakeisemmän materiaalin muodonmuutostaso ei kuitenkaan ole karkearakeisempaa suurempi vaan rr 44 ja rr 98 materiaalien tapauksessa asia on jopa toisin päin.

Kaiken kaikkiaan rakeisuuskäyrän ohjealueelle osuvuuden perusteella tehdyt havainnot materiaalin laadusta kuvaavat yllättävän huonosti muodonmuutostasoa. On otettava huomioon, että referenssimateriaalia lukuun ottamatta materiaalien erot kuormitettaessa olivat pieniä. Tämä pätee varsinkin, jos tarkastellaan myös tavaraliikenteen kuormitusalueen yläpuolisia kuormitusportaita. Näin ollen satunnaisuus kolmiaksoalikuloksissa saattaa olla niin isoa, että se voi osin tuottaa ristiriitaisuutta koetulosten tulkinnaan. Suurin ristiriita tarkastelussa koskee referenssimateriaalin ja Kvl-Kot hyvän yhdistemateriaalin kuormituskäyttötymisen eroa.

7.5.3 Täysin kyllästyneiden näytteiden syklisten kolmiaksaalikokeiden tulosten tarkastelu

Kuvassa 100 on esitetty täysin kyllästyneiden näytteiden syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset. Referenssimateriaalin muodonmuutokset ovat pysyneet pieninä vielä hyvin korkeillakin kuormitustasoilla. Rr 44, rr 98 ja Kvl-Kot hyvä näyte ovat käyttäytyneet kutakuinkin toistensa kaltaisesti, joskin rr 98 materiaalin muodonmuutokset ovat jääneet hieman pienemmiksi kuormitustason noustessa tavaraliikenteen keskimääräistä kuormitustasoa suuremmiksi. Näistä kolmesta materiaalista melko selkeästi eroaa rr 137, joka muodonmuutokset lähtevät selvään nousuun tavaraliikenteen kuormitustasoalueen alarajalla. Selvästi heikoiten kokeissa on käyttäytynyt Kvl-Kot huono materiaali, jonka muodonmuutostaso lähtee selvään nousuun jo hyvin pienillä kuormitustasoilla.



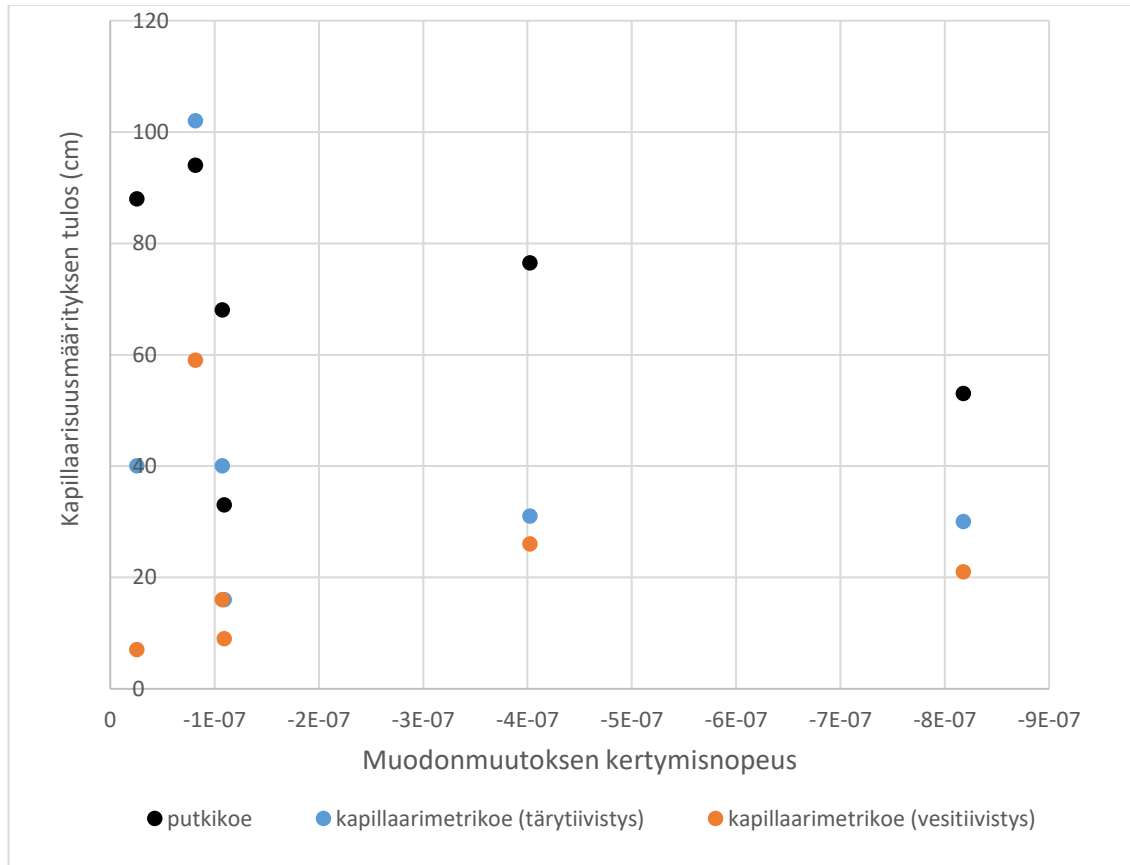
Kuva 100. Täysin kyllästettyjen näytteiden syklisten kolmiaksaalikokeiden tulokset.

Kyllästettyjen näytteiden kokeiden tuloksia on syytä verrata osittain kyllästettyjen näytteiden kokeiden tuloksiin. Kummassakin tapauksessa referenssimateriaali kesti kokeissa erinomaisesti verrattuna muihin materiaaleihin. Täysin kyllästyneessä tilanteessa Kvl-Kot heikko näyte tuotti erittäin suuret muodonmuutokset jo hyvin pienillä kuormitustasoilla. Osittain kyllästyneessä tilanteessa kyseisen materiaalin kuormituskäyttäytyminen vastasi paljon muiden materiaalien (pl. referenssimateriaali) käyttäytymistä. Rr 137 käyttäytyy täysin kyllästettynä melko selvästi heikommin kuin rr 44, rr 98 ja Kvl-Kot hyvä yhdiste. Tällaista havaintoa ei osittain kyllästettyjen näytteiden kokeiden tapauksessa voitu tehdä.

Suoritetaan seuraavaksi täysin kyllästettyjen näytteiden syklisten kolmiaksaalikokeiden tulosten vertailu kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tuloksiin. Valitaan vertailuun kuvan

100 käyrien suhteelliset muodonmuutosnopeudet kuormitustason 80 kPa kohdasta. Tällöin kuormitustaso edustaa keskimääräistä tavaraliikenteen tuottamaa kuormitusta. Tässä kohdassa käyrät ovat jo eronneet toisistaan paljastaen materiaalien luonteenomaisen käyttäytymisen. 80 kPa edustaa myös rr 137 materiaalin viimeistä kuormitustasoa.

Kuvassa 101 on esitetty pystyakselilla kapillaarisuusmäärittysten tulokset ja vaaka-akselilla suhteellinen muodonmuutosnopeus 80 kPa kuormitusportaalla. Pisteiden asettuminen kuvaajaan on varsin satunnaista kaikkien kapillaarisuutta mittaavien koetyyppien suhteen.

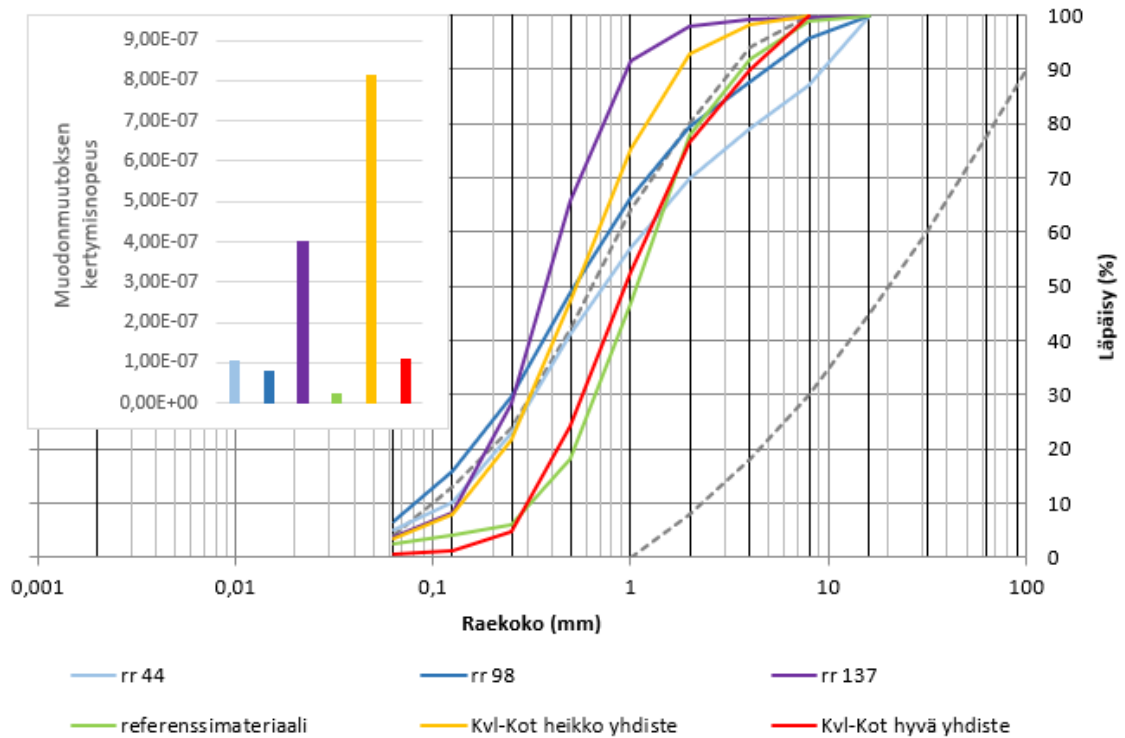


Kuva 101. Kapillaarisuutta mittaavien kokeiden tulokset esitettynä suhteessa 80 kPa kuormitustasoa vastaaviin muodonmuutosten kertymisnopeuksiin täysin kyllästyneiden näytteiden syklistä kolmiaksiaalikoeteissa.

Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka materiaalien rakeisuuskäyrien osuvuus ohjealueelle suhteutuu materiaalien muodonmuutosten kertymisnopeuksiin. Kuvassa 102 on esitetty näytteiden rakeisuudet sekä kuvan vasemmassa yläkulmassa 80 kPa kuormitustasoa vastaavat muodonmuutoksen kertymisnopeudet. Kvl-Kot hyvän yhdisteen ja referenssimateriaalin tulosten suuruusjärjestys on nurinkurinen suhteessa rakeisuuksiin. Vaikka Kvl-Kot hyvässä yhdisteessä on vähemmän hienoainesta, tuottaa se suuremman muodonmuutoksen kertymisnopeuden. Täysin kyllästettyjen näytteiden tapauksessa hienoaineksen pitäisi yleisen käsityksen mukaan heikentää materiaalin kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Rr 137 materiaalin muodonmuutostaso eroaa selkeästi neljästä pienemmän muodonmuutostason näytteestä.

Rr 44 on tuottanut hieman suuremmat muodonmuutoksen kertymisnopeudet kuin rr 98. Kyseisten materiaalien rakeisuuskäyrät ovat lähes saman muotoiset rr 44 materiaalin ollessa kuitenkin hieman karkearakeisempaa.

Selkeästi suurimman muodonmuutostason omaa Kvl-Kot heikko yhdiste. Kyseinen näyte vastaa rakeisuuskäyrän muodoltaan hyvinkin paljon Kvl-Kot hyvää yhdistettä ja referenssimateriaalia, ollen kuitenkin näitä kohtuullisen paljon hienorakeisempaa. Rr 44 ja rr 98 omaavat hieman enemmän hienoainesta ja ovat käyrän yläpäästä karkeampaa materiaalia kuin Kvl-Kot heikko yhdiste. Rr 44 ja rr 98 ovat selkeästi vähemmän tasarakeisia kuin Kvl-Kot heikko yhdiste. Ristiriitaisena voidaan nähdä Kvl-Kot heikon yhdistemateriaalin ja rr 137:n suuri muodonmuutostasoero rr 137:n ollessa lievästi hieno- ja tasarakeisempaa.



Kuva 102. 80 kPa kuormitustasoa vastaavat täysin kyllästettyjen näytteiden muodonmuutostasot esitettynä materiaalien rakeisuuskäyrien yhteydessä. Katkoviivat rajaavat rakeisuuden ohjealueen.

Kvl-Kot yhdistemateriaalien näytteet olivat altistuneet ennen täysin kyllästettyjä kokeita osittain kyllästyneessä tilassa tehtyjen kokeiden aiheuttamille muodonmuutoksille. On mahdollista, että nämä aikaisemmat muodonmuutokset vaikuttivat negatiivisesti kyseisten materiaalien kuormituskestävyysominaisuuksiin täysin kyllästetyissä kokeissa. Heikon yhdisteen kuormitusta jatkettiin hyvän yhdisteen kuormitusta pidemmälle osittain kyllästettyjen näytteiden kokeissa. Vastaavasti täysin kyllästyneiden näytteiden koetuloksista huomataan, että heikon yhdisteen käyttäytyminen suhteessa sen rakeisuuteen on huomattavasti heikompaa kuin hyvän yhdisteen vastaava. Vaikuttaa todennäköiseltä, että ainakin Kvl-Kot heikossa yhdisteessä on tapahtunut merkittävää vaurioitumista jo osittain kyllästyneen näytteen kuormituksessa.

Koska tutkimuksissa käytetyt materiaalit olivat hiekköjä, oletettiin eri materiaalien välisen raemuotoerojen olevan pieniä. Jos materiaalien raemuodoissa on kuitenkin ollut eroja, ovat ne periaatteessa voineet vaikuttaa kokeiden tuloksiin.

7.6 Proctor-kokeet ja tiivistystilan merkityksen arviointi

Kuten kapillaarimetrikokeiden eri tiivistystavoilla tiivistettyjen näytteiden tuloksia vertailemalla huomattiin, on tiivistystilan vaikutus materiaalin kapillaariseen käyttäytymiseen merkittävä. Myös pitkäaikaisten putkikokeiden tuloksia vertailemalla todettiin tiiviimpien näytteiden tuottaneen suuremmat kapillaariset nousut kuin löyhempien. Jos kokeissa käytetyt tiiviyydet eroavat radan alusrakenteessa vallitsevasta tiivistystilasta, eroavat oletettavasti myös kapillaariominaisuudet.

Sekä Kouvola-Kotka rata, että rantarata ovat vanhoja ratoja kuten suurin osa Suomen muustakin rataverkosta. 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alkupuolen aikainen ratarakentaminen on eronnut voimakkaasti nykyisestä ja oletettavaa on, ettei tuolloin alusrakenteen tiivistykseen kiinnitetty huomiota kovinkaan paljon. Kirjallisuuden perusteella on tehtävissä oletus siitä, että puutteelliseksi jäänyt tiivistys on johtanut ajan myötä tapahtuvaan hitaaseen tiivistymiseen.

Huonosti tiivistetty rakenne tiivistyy ajan kuluessa esimerkiksi sääolojen ja ulkoisen kuormituksen vaikutuksesta. Tällainen jälkitiivistyminen on nopeinta heti rakentamisen jälkeen ja se hidastuu ajan mittaan. Jälkitiivistyminen on mahdollista välttää lähes kokonaan tekemällä tiivistystyö hyvin rakentamisen aikana. [56]

Epäselvää on, mikä on alusrakennemateriaalien nykyinen tiivistystila käsiteltävillä rataosilla. Jos tiivistystila olisi korkeampi kuin koenäytteissä, voidaan ajatella kapillaarisen nousun olevan todellisuudessa isompaa kuin kokeissa tehtyjen määritysten perusteella voisi olettaa. Vastaavasti todellisen rakenteen ollessa pienemmässä tiivistystilassa kuin koenäytteiden, olisi todellisen kapillaarisuus pienempää kuin mitä se koetulosten mukaan on.

Voi olla mahdollista, että erityyppiset materiaalit reagoivat erityyppisiin tiivistystekniikoihin eri tavoilla. On siis syytä tarkastella eri kokeiden näytteissä vallinneita kuivatilavuuspainoja näytemateriaaleittain. Olisi myös hyödyllistä tarkastella kokeissa saavutettuja kuivatilavuuspainoja suhteessa sellaisiin kuivatilavuuspainoihin, joiden voidaan ajatella kuvastavan radalla vallitsevaa kuivatilavuuspainoa.

Parannettu Proctor-koe on kehitetty jäljittelemään työmailla toteutettavaa tiivistystyötä. Alkuperäisestä proctor-kokeesta parannettu versio eroaa siinä, että se jäljittelee paremmin nykyisenlaista, tehokasta tiivistyskalustoa, joka työmailla on käytössä. [10]

Kaiken kaikkiaan Proctor-kokeella määritettyä maksimi kuivatilavuuspainoa voidaan pitää hyvin korkeana. Proctor-kokeen tuottama tiivistystyö ja tiivistysraudalla suoritettu tiivistystyö ovat luonteeltaan varsin erilaisia, vaikka niiden tuottamat kuivatilavuuspainot saattavatkin joissain tapauksissa olla varsin samanlaiset. Proctor-tiivistys pyrkii sullomaan rakeet tiiviiseen tilaan tuottaen niihin suuritehoisia iskuja. Tiivistysrautaa käytettäessä rakeet eivät joudu samanlaisen pakottavan sullomisen alaisiksi, vaan täristävän vaikutuksen voidaan otaksua pyörittelevän niitä uusiin asentoihin ja toistensa ohi. Proctor kokeen voi nähdä edustavan luonteeltaan enemmän todellista radan alusrakenteen tiivistymistapaa tapahtui se sitten oikeaoppisesti rakennusvaiheessa tiivistyskalustolla tai tämän puuttuessa liikennekuormituksen johdosta hitaasti tapahtuvana jälkitiivistymisenä.

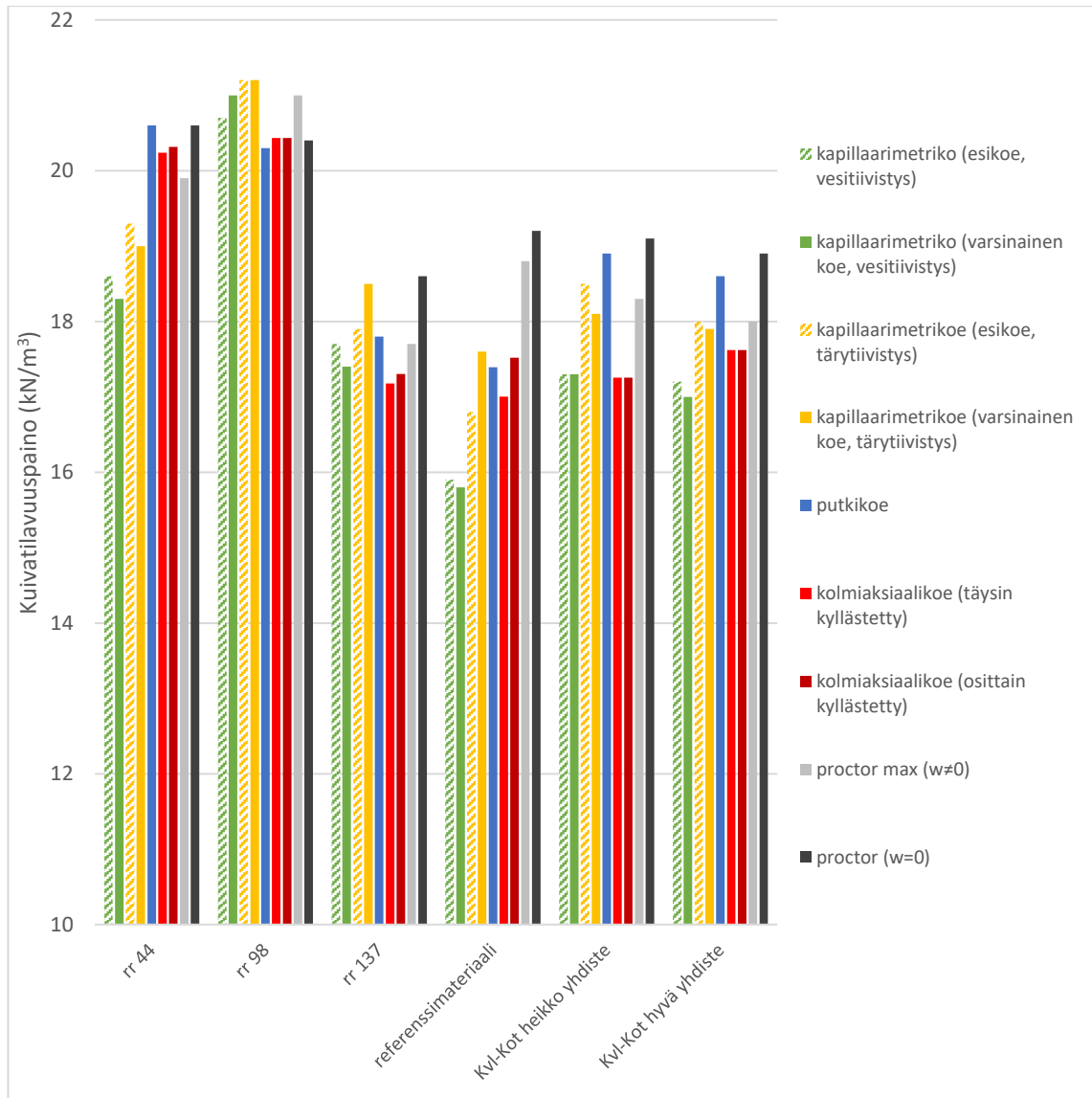
Nykyisin radan alusrakenteen tiivistystyötä valvotaan tarkasti. Radassa eristys- ja välikerroksen tiiviyksasteen mittausten keskiarvovaatimus on vesivolymetrillä tai levykuormituskokeella mitattaessa 95 % [56]. Yksittäisen mittauspisteen tiiviyksasteen on oltava vähintään 92 % [56]. Kuitenkin esimerkiksi Kvl-Kot-rata ja rantarata on rakennettu aikaan, jolloin rakennetta ei yleensä tiivistetty hyvin. On vaikea arvioida, kuinka paljon vanhojen

ratojen alusrakenne on tiivistynyt ajan saatossa junakuorman vaikutuksesta. Hyvin todennäköisesti todellinen tiivistila on Proctor-kokeen kautta määritettyä maksimitiiviyyttä pienempi. Käytännössä tiivistila vaihtelee myös radan poikkileikkauksen eri osissa; suoraan pölkkyjen alla oleva materiaali joutuu junaliikenteen kuormituksen alaiseksi pysyen kuitenkin paikoillaan siinä missä poikkileikkauksen reunaosien materiaali pyrkii usein pursuamaan sivulle.

Liitteessä C on esitetty rantaradan materiaalien, referenssimateriaalien ja Kouvola-Kotka radan yhdistemateriaalien Proctor-käyrät. Lähes kaikkien materiaalien kohdalla maksimaalinen kuivatilavuuspaino saavutettiin Proctor-kokeissa itseasiassa uunikuivaa näytettä käyttäen. Tällöin Proctor-käyrään muodostui useita huippukohtia. Syy siihen, miksi täysin kuiva näyte meni usein tiiviimmäksi kuin pienessä vesipitoisuudessa ollut näyte, saattaa olla huokoskulmaveden lujutta lisäävä vaikutus. Suuremmilla vesipitoisuuksilla huokoskulmaveden tuottama näennäinen koheesio kaiketi pieneni ja veden lisääminen alkoi parantaa tiivistymiskäyttäytymistä aina Proctor-käyrän huippukohtaa vastaavaan vesipitoisuuteen asti. Muutamilla materiaaleilla Proctor-käyrän nollasta eroavaankin osaan muodostui useita huippukohtia, jolloin optimivesipitoisuuden määrittäminen on vaikeahkoa. Referenssimateriaalin kuivairtoteiheys pienenee koko ajan liikuttaessa vaakakselillä suurenevan vesipitoisuuden suuntaan.

Yleensä Proctor-kokeen maksimikuivatilavuuspaino tulkitaan mittaustulosten perusteella piirretystä, alaspäin aukeavasta käyrästä, jonka huippupiste paljastaa maksimi kuivairtoteiheyden ja tätä vastaavan optimivesipitoisuuden. Seuraavassa tarkastelussa käytetään sekä Proctor-kokeen mukaista maksimikuivatilavuuspainoa nollassa eroavalla vesipitoisuudella että Proctor-kokeen mukaista kuivatilavuuspainoa kuivana sulletussa näytteessä.

Kuvaan 103 on kerätty eri kokeissa vallinneet kuivatilavuuspainot materiaaleittain ja Proctor-kokeiden tulokset. Kapillaarimetrikokeiden tulokset on esitetty sekä esikokeiden että varsinaisten kokeiden osalta mittaustarkkuuden ollessa näissä merkittävä virheteijä.



Kuva 103. Proctor-kokeiden mukaiset maksimikuivatilavuuspainot sekä koenäytteiden kuivatilavuuspainot.

Putkikokeissa vallinneet kuivatilavuuspainot ovat suuria. Rr 137:aa ja referenssimateriaalia lukuun ottamatta ne muistuttavat kuivana sullottujen Proctor-kokeiden näytteiden kuivatilavuuspainoja. Rr 98:a ja referenssimateriaalia lukuunottamatta putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainot ovat suurempia kuin kolmiaksaalikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainot. Rr 98 on myös ainoa materiaali, jolla suurinta kuivatilavuuspainoa Proctor-kokeissa ei saavutettu kuivana sullottaessa.

Jo aikaisemmin huomattiin putkikokeen tuloksen olleen referenssimateriaalilla huomattavasti suurempi kuin mitä sen voisi olettaa rakeisuuksien perusteella olevan. Kvi-Kot hyvä yhdiste on rakeisuudeltaan hyvin samankaltainen kuin referenssimateriaali omaten kuitenkin hieman pienemmän hienoainespitoisuuden. Kyseinen materiaali on ollut putkikokeessa referenssimateriaalia tiiviimmässä tilassa ja tuottanut silti selkeästi pienemmän kapillaarisen nousun. Referenssimateriaalin putkikokeen kuivatilavuuspaino vaikuttaa kaiken kaikkiaan pieneltä verrattaessa sitä siihen minkälaisiksi muiden materiaalien putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainot ovat muodostuneet suhteessa muiden kokeiden näytteiden kuivatilavuuspainoihin sekä Proctor-kokeissa saavutettuihin kuivatilavuuspainoihin.

Kolmiakksiaalikoekoiden osalta rr 44 ja rr 98 vastaavat kutakuinkin Proctor-kokeissa saavutettuja tiiviyksiä. Muiden materiaalien osalta kolmiakksiaalinytteen kuivatilavuuspainot ovat vaihtelevissa määrin pienempiä kuin Proctor-kokeissa saavutetut kuivatilavuuspainot.

Kvl-Kot heikko yhdiste tuotti kolmiakksiaalikoekissa täysin kyllästyneen näytteen tapauksessa erittäin suuret muodonmuutokset suhteessa rakeisuuteensa. Kyseisen näytteen kolmiakksiaalikoekoiden kuivatilavuuspainot ovat hieman Proctor-kuivatilavuuspainoja pienempiä kuin monen muun materiaalin kohdalla. Toisaalta referenssimateriaali tuotti hyvin pienet muodonmuutokset, vaikka myös sen tiivystila kolmiakksiaalikoekissa on ollut vaatimaton suhteessa muihin materiaaleihin. Kvl-Kot heikon näytteen suuret muodonmuutokset täysin kyllästyneen näytteen kokeessa selittynevät jo aikaisemmin esitettyjen osittain kyllästyneessä tilassa suoritettuna kokeen aikana syntyneiden vaurioiden kautta.

Kolmiakksiaalikoekoiden tuloksia tarkastellessa havaittiin ristiriita referenssimateriaalin ja Kvl-Kot hyvän materiaalin tulosten välillä; vaikka rakeisuudet vastasivat paljolti toisiaan, käyttäytyi referenssimateriaali kokeissa huomattavasti paremmin. Kuitenkin referenssimateriaalin kuivatilavuuspaino on ollut varsinkin täysin kyllästyneessä kokeessa jopa hieman pienempi kuin Kvl-Kot hyvän yhdistemateriaalin näytteen kuivatilavuuspaino. On syytä muistaa, että muista materiaaleista eroten referenssimateriaalin Proctor-käyrä oli koko pituudeltaan laskeva. Osin odottamattomiin kolmiakksiaalituloksiin ei voida kaiken kaikkiaan löytää selviä syitä tiivystiloja tarkastelemalla.

Kapillaarimetrikokeissa vallinneiden kuivatilavuuspainojen suhde Proctor-kokeissa saavutettuihin kuivatilavuuspainoihin vaihtelee voimakkaasti näytemateriaalikohtaisesti. On syytä muistaa kapillaarimetrikoiden korkeuden mittauksen epätarkkuudesta aiheutunut epätarkkuus kyseisten kokeiden näytteen kuivatilavuuspainoissa. Esimerkiksi rr 98 näytteen kapillaarimetrikoiden tuloksia kuvaavat palkit muodostuvat huomattavan suuriksi suhteessa Proctor-maksimikuivatilavuuspainoja kuvaaviin palkkeihin, mihin tulee suhtautua varauksella. On huomioitava kuitenkin, että Rr 98 on ainoa näytemateriaali, jossa suurinta kuivatilavuuspainoa ei saavutettu kuivana sülleottaessa. Vesitiivistettyjen kapillaarimetrikoiden näytteen kuivatilavuuspainot ovat kaikkien materiaalien kohdalla pienempiä kuin tärytiivistettyjen.

Rr 44 ja rr 98 näytteen kuivatilavuuspainot olivat kokeissa ja Proctor-sullonnoissa keskimäärin selkeästi suurempia kuin muiden näytteen. Selittäväenä tekijänä voidaan nähdä kyseisten näytemateriaalien suurempi sekarakaisuus suhteessa muihin materiaaleihin (kuva 102).

Putkikoekoiden näytteen tiivistäminen täryraudalla osoittautui toimivaksi ja hyvin tehokkaaksi tiivistysmenetelmäksi. Tiivistys voidaan suorittaa täryraudalla myös lyhyempää tärytysaikaa käyttäen, jolloin saavutetaan pienempi kuivatilavuuspaino. Tärytiivistykselle vaihtoehtoisena tiivistystekniikkana voidaan käyttää sullova menetelmä kuten esimerkiksi standardin SFS-EN 1097-10 mukaisessa menettelyssä. Kyseisessä standardissa sekä näytteen valmistelu että koejärjestelyt suoritetaan tässä työssä esitettyjen kokeiden suoritustavasta erivällä tavalla. Standardissa tiivistys tapahtuu puusauvalla, jonka pituus on noin 50 cm ja halkaisija noin 0,25 kertaa putken halkaisija. Näyte rakennetaan kerroksittain ja jokainen kerros tiivistetään pudottamalla puusauva korkeintaan 5 cm korkeudelta näytteen pintaan kymmenen kertaa. Kuvailtu tiivistystapa tuottaa hyvin todennäköisesti pienemmän kuivatilavuuspainon ja sitä kautta pienemmän kapillaarisen nousukorkeuden kuin tämän työn kokeissa käytetty tiivistystapa, jossa tiivistysraudalla suoritettua tärytystä jatkettiin, kunnes näytepatsaan yläpinta aleni tärytyksen vaikutuksesta korkeintaan hyvin hitaasti. Voidaan nähdä todennäköisenä, että tässä työssä käytetty putkikoekoiden näytteen tiivistäminen menetelmä tuottaa vähintään yhtä suuren tiiviyden

kuin mikä radan alusrakenteessa kyseisillä materiaaleilla vallitsee. Jos putkikokeiden näytteet tiivistetään radalla vallitsevaa tiivistilaa pienempään tiiviyteen, jäävät kapillaariset nousukorkeudet pienemmiksi kuin todellisessa rakenteessa.

7.7 Vertailu muihin tutkimuksiin

Tämän diplomityön kokeellisen osion koeasetelmaa muistuttavan koesarjan ovat tehneet myös Lane ja Washburn jo vuonna 1947 tutkiessaan kahdeksan materiaalin kapillaariominaisuuksia sekä putkessa tehtävin kapillaarisen nousun kokein, että Beskown kapillaarimetrillä. Näytteistä määritettiin myös vedenläpäisevyyskertoimet. Näytteiden rakeisuudet on esitetty liitteessä D, jossa näytteille annetut nimet perustuvat tekijöiden käyttämään luokittelujärjestelmään. Class 8 materiaalia lukuun ottamatta kaikki näytteet koostettiin keinotekoisesti seulomalla hiekkaista soraa, joka oli mineraalikoostumuksestaan kvartsia ja raemuodoltaan pyöristynyttä. Näytteiden kuivatilavuuspainot pyrittiin saamaan samoiksi sekä putki- että kapillaarimetrikokeissa. [57]

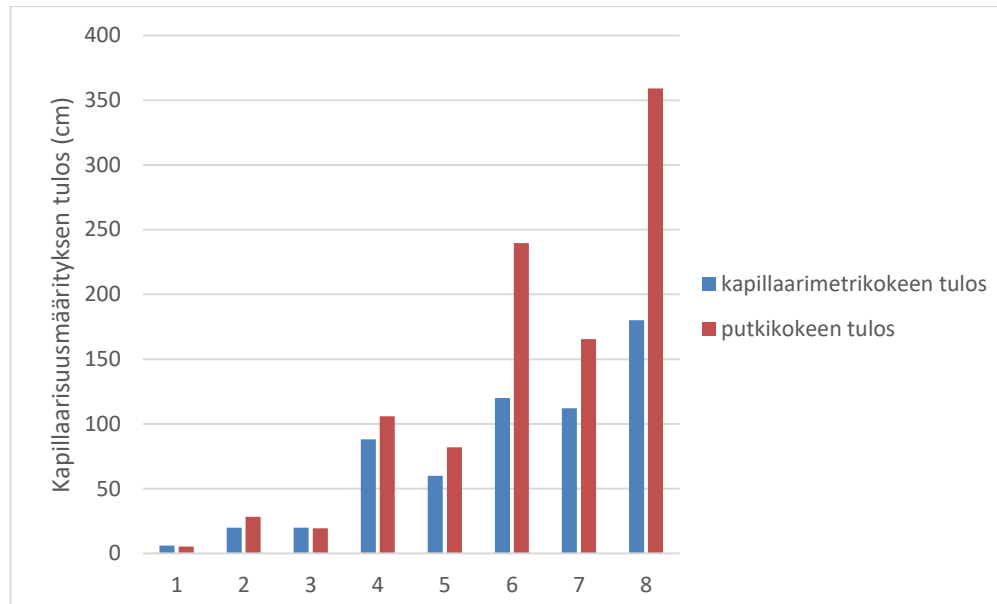
Kapillaarimetrikoe näytteet tiivistettiin kirjoittajien mukaan ilmakuivina tavoitellen tiivistilaa, jossa materiaalit esiintyvät luontaisissa esiintymissä. Näytteiden kyllästämisen tapahtui alhaalta ylöspäin vedellä, josta oltiin poistettu siihen liuenut ilma. [57]

Putkikokeiden näytteiden kuivatilavuuspainot pyrittiin saamaan samoiksi kuin kapillaarimetrikokeissa. Näytteet tiivistettiin putkiin ilmakuivina kerroksittain. Jokaisen kerroksen jälkeen näytteen yläpinta rikottiin lajittumisen vähentämiseksi. Tiivistysmenetelmiksi putkikokeiden osalla mainitaan koputtelu putken kylkeen ja sullonta. Näytteet eivät kuitenkaan menneet ilmeisesti kovin tiiviiseen tilaan tekijöiden raportoidessa kapillaarisesti nousseen veden tiivistäneen joissain tapauksissa näytteiden alaosa siten että putkessa olleeseen näytteeseen oli syntynyt rako, joka oli kuitenkin saatu umpeen koputtamalla näyteputkea, jolloin ylempi näytteen osa oli valahtanut alas sulkien raon. [57]

Kyseinen ilmiö vaikuttaa ristiriitaiselta suhteessa toteamukseen näytteiden tiivistilojen ja kyseisten kaltaisten materiaalien luonnollisten esiintymisen tiivistilojen vastaavuudesta. Vaikka rako saatiin umpeen, eivät rakokohdassa esiintyvät rakeiden väliset huokoskoot välttämättä edusta ehyen näytteen sisäisiä huokoskokoja.

Lane ja Washburn kertovat, että nousukorkeushavaintoja tehtiin ensimmäisen päivän aikana tunneittain, jonka jälkeen havaintotiheyttä harvennettiin kerran päivässä tehtyihin havaintoihin ja lopulta kerran viikossa tehtyihin havaintoihin. Putkikokeita jatkettiin, kunnes nousun havaittiin pysähtyvän kaikilla muilla materiaaleilla paitsi Class 8-materiaalilla, joka edusti hienorakeisinta näytettä. Liitteessä D on esitetty putkikokeista tehdyt nousukorkeushavainnot ajan suhteen. Kyseisestä kuvaajasta huomataan kokeiden kestojen vaihdelleen materiaalikohtaisesti muutamasta päivästä aina yli 400:n päivään. [57]

Liitteessä D on esitetty näyttemateriaalien ominaisuudet, kummankin koetyypin tulokset ja näytteiden kuivatilavuuspainot ja huokosluvut. Kuvassa 104 on esitetty Lanen ja Washburnin putki- ja kapillaarimetrikoe tulokset näyttemateriaaleittain. Näytteiden nimistä on jätetty etuliitteet pois. Putkikokeiden tulokset ovat lähes kaikilla materiaaleilla suurempia kuin kapillaarimetrikokeiden tulokset. Putki- ja kapillaarimetrikokeiden tulosten suhde vaihtelee voimakkaasti näyttemateriaaleittain.



Kuva 104. *Lanen ja Washburnin putki- ja kapillaarimetrikoetulokset näyttemateriaaleittain. [57]*

Lane ja Washburn päättävät kapillaarimetrikokeen tuloksen määräytyvän pääasiassa suurimpien huokosten koon perusteella siinä missä putkikokeiden tuloksiin nähdään vaikuttavan kaiken kokoisten huokosten. Kapillaarimetrikokeiden tuloksia Lane ja Washburn luonnehtivat passiivisena kapillaarisena nousukorkeutena. Putkikokeiden tuloksista puhuttaessa tekijät käyttävät ilmaisua aktiivinen kapillaarinen nousukorkeus. [57]

Putkikokeiden lopussa näytteet purettiin kerroksittain vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon kerroskohtaista määrittystä varten. Liitteissä D on esitetty purettujen näytteiden vesipitoisuudet, kyllästysasteet ja kuivatilavuuspainot niiden näytteiden osalta, joista tekijät kyseiset tiedot ilmoittavat. Kyllästysasteen laskettujen arvojen mainitaan olevan luonnon virhelähteiden vuoksi epätarkkoja. [57]

Tekijät mainitsevat, että sullonta tuotti kerroksittain vaihtelevat tiiviystilat ja arvelevat että tiiviystilan vaihtelu on ollut yksittäisen näytteen sisällä vielä suurempaa. Kun otetaan huomioon, että yksittäinen purkunäyte oli vain noin 8 cm:n korkuinen ja erot perättäisten näytteiden tiiviyksissä usein selkeitä, on syytä epäillä myös, että purkuosion korkeuden mittaaminen ei ole välttämättä tuottanut täysin tarkkaa tulosta, mikä osaltaan selittäisi epäsuunnollisia tiiviystiloja. Monissa kuvaajissa saturaatioasteen kuvaajan piikit osuvat tiiviyskuvaajan piikin kohtaan ilman että vesipitoisuuskuvaajassa olisi samalla syvyydellä piikkiä. Näyttää siltä, että virheet tiiviystilan kuvaajassa ovat tuottaneet virheitä kyllästysasteen kuvaajaan. Joissain kuvaajissa esiintyy yli 100 %:in kyllästysasteita, mikä on luonnollisesti mahdotonta.

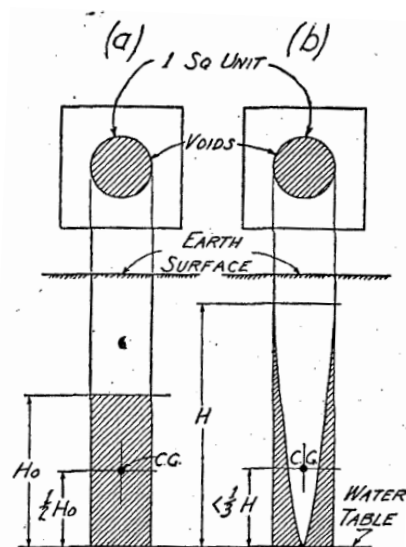
Liitteessä D on esitetty putkikokeiden kapillaarisen nousun käyrät suhteessa teoreettiseen, kaavasta 19 laskettuun, nousunopeuteen niiden näytteiden osalta mitkä Lane ja Washburn ovat raportissaan kyseisellä tavalla kuvanneet (class 4- class 8). Kuvissa on esitetty teoreettiset käyrät sekä liitteessä D esitettyjen vedenläpäisevyyksien perusteella laskettuina, että pienennetyillä arvoilla. Pienennettyjen vedenläpäisevyyksien käyttöä perustellaan sillä, että vedenläpäisevyyksikokeissa käytettiin täysin ilmasta vapaata vettä, jonka ilmaistaan tuottavan vedenläpäisevyyksiarvoltaan huomattavasti suuremman tuloksen kuin vesi, johon ilmaa on liuennut. Pienennettyjen vedenläpäisevyyksien käyrät on saatu siirtämällä vedenläpäisevyyden perusteella laskettu käyrä kokeellisen käyrän

päällä siten, että ne leikkaavat toisiaan kokeellisen käyrän puolesta välistä pystyakselilla. Class 6-materiaalin kuvaajaan on lisätty myös class 6-materiaalin kosteusjakauman mukaisesta, korkean kyllästysasteen alueesta saadun, hc-arvon perusteella laskettu teoreettinen käyrä. [57]

Veteen liuenneen ilman lisäksi teoreettisen kaavan ja koetulosten yhteensopimattomuutta lisäävät muutkin seikat. Lane ja Washburn näkevät kaavan sopivan erityisesti ideaaliselle maamateriaalille, jossa kaikki huokokset ovat saman kokoisia. Näytemateriaaleista tasarakeisimmissa (class 4,6,8) teoreettinen ja kokeellinen käyrä vastaavat muodoltaan toisiaan kohtuullisesti, siinä missä sekarakeisempien materiaalien (class 5,7) kohdalla kyseinen eroavaisuus on suuri eikä teoreettista käyrää ole täten edes yritetty siirtää leikkaamaan kokeellista käyrää nousukorkeuden puolessavälissä. [57]

Näyttää siltä, että Lanen ja Washburnin kokeiden tulokset putki- ja kapillaarimetrikokeiden tulosten keskinäisen suuruuden suhteen ovat jokseenkin samansuuntaisia kuin tämän työn yhteydessä tehtyjen kokeiden tulosten suhteet. Kapillaarimetri tuotti yleensä pienemmän tuloksen kuin putkikoe kuitenkin siten, ettei kokeiden tulosten suhde ole aina säännönmukaisesti sama. On kuitenkin huomattava, että Lanen ja Washburnin kokeissa näytteiden tiiviystilat olivat hyvin samanlaiset kummankin koetyypin suhteen siinä missä tämän työn yhteydessä tehdyissä kokeissa putkikokeiden näytteiden tiiviystila oli keskimäärin hieman suurempi kuin kapillaarimetrikokeiden näytteiden tiiviystila, mikä nähtiin selittävänä tekijänä eri koetyyppien erilaisille tuloksille oletettaessa, etteivät tärytiivistetyt kapillaarimetrikoe näytteet lajittuneet. Huomioitavaa lienee myös se, että Lane ja Washburn käyttivät tutkimuksissaan erityyppistä kapillaarimetriä kuin tämän työn yhteydessä käytettiin. Lanen ja Washburnin näytemateriaalit valmistettiin keinoitekoisesti seulomalla, mitä tekijät eivät ainakaan itse pidä tulosten uskottavuutta heikentävänä tekijänä suhteessa aitoihin luonnonmateriaaleihin.

Krynine on ottanut kantaa Lanen ja Washburnin kokeisiin kapillaarimetri ja putkikokeiden tulosten suhteiden osalta. Krynine lähestyy kapillaarimetrikokeiden ja putkikokeiden eroja kuvan 105 mukaisen asetelman näkökulmasta. [57]



Kuva 105. Kryninen näkemyksen mukainen kapillaarinen nousukorkeus kapillaarimetrikokeissa (a) ja putkikokeissa (b). [57]

Kuvassa 105 a on esitetty pystysuuntainen maa-aineksestä koostuva prisma. Kyseisen prisman kaikki huokokset on esitetty pystysuuntaisena sylinterinä, jota vastaa myös ylimpänä oleva leikkauskuva. H_0 edustaa kapillaarimetrikokeen tulosta, joka vastaa täydellisesti kyllästynyttä tilaa. Kuvassa 105 b on esitetty putkikokeen asetelma, jossa maa ei ole täysin kyllästynyttä ja täten nousukorkeus H on suurempi kuin H_0 . Kryninen mukaan voidaan ajatella, että kummassakin tapauksessa maa-ainesprisma kykenee tuottamaan tietyn vakioarvoisen määrän työtä nostaessaan kosteutta vapaasta vedenpinnasta. Kryninen mukaan voidaan myös nähdä, että näin ollen vesipatsaiden massakeskipiste pystysuunnassa täytyy olla sama. Kosteusjakautuma kuvassa 105 b on yleensä kupera. Jos se kuitenkin oletetaan lineaariseksi, voidaan massakeskipisteen nähdä sijoittuvan korkeudelle $H/3$. Kuvan 105 a massakeskipiste sijaitsee korkeudella $H_0/2$. Kapillaarimetri- ja putkikokeiden suhde voidaan Kryninen mukaan nähdä kaavan 28 mukaisena. [57]

$$\frac{1}{2}H_0 = \frac{1}{3}H \quad (28)$$

Mikäli kuvan 105 b pystysuuntainen massakeskipiste halutaan nähdä sijoittuneena korkeudelle $H/4$, kaava saa muodon:

$$\frac{1}{2}H_0 = \frac{1}{4}H \quad (29)$$

[57]

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kapillaarimetrikokeet

Sahi-kapillaarimetrillä tehtävä koe edustaa epäsuoraa tapaa määrittää materiaalin kapillaarisuus. 50 näytemateriaalia käsittäneen kapillaarimetrikoesarjan tulosten perusteella voidaan päätellä käytetyn tiivistysmenetelmän vaikutuksen kapillaarimetrikokeen tulokseen olevan hyvin suuri. Kaikki näytemateriaalit tiivistyivät täryraudalla suoritettulla tärytiivistyksellä tehokkaammin kuin perinteisellä vesitiivistyksellä, joka edustaa normaalia tapaa valmistella Sahi-tyyppisen kapillaarimetrikokeen näyte. Kuivatilavuuspainoerojen keskiarvoksi muodostui 4,8 %. Tärytiivistettyjen näytteiden tuottamat tulokset olivat keskimäärin noin kaksinkertaisia vesitiivistettyjen näytteiden tuottamiin tuloksiin verrattuna. Kapillaarimetrikokeiden tulokset korreloivat ennako-odotusten mukaisesti näytteiden rakeisuuksien kanssa; mitä karkearakeisempaa materiaali oli, sitä pienemmän tuloksen se sai kapillaarimetrikokeessa.

Sahi-kapillaarimetrillä toteutettavan kapillaarisuuden määrittämisen toistettavuudesta pyrittiin luomaan karkeitakin arvioita toistamalla kahden Kvl-Kot yhdistemateriaalin tärytiivistetyt kokeet viisi kertaa. Lisäksi arvioita toistettavuudesta voitiin tehdä esikokeiden ja varsinaisten kokeiden tuloksia vertaamalla. Tulosten perusteella toistettavuus vaikuttaa kohtuulliselta. Täysin luotettavana yksittäisen kokeen tulosta ei kuitenkaan voida pitää.

Putkessa tehdyt kapillaarisen nousun määrittäykset

Putkessa tehtävä kapillaarisen nousun määrittäminen edustaa suoraa menetelmää kapillaarisen nousukorkeuden mittaamisessa. Kuudelle materiaalille tehtiin pitkäaikaiset kapillaarisen nousun kokeet putkimenetelmällä. Tulokset osoittivat, että kapillaarinen nousu voi jatkua hyvinkin pitkään jopa pienen hienoainespitoisuuden omaavilla hiekoilla. Neljälle materiaalille tehtiin pitkäaikaiset putkikokeet normaalin tiiviin tilan lisäksi löyhemmässä tilassa, jossa kuivatilavuuspaino vastasi noin 90 prosenttia tiiviimmän tilan näytteen kuivatilavuuspainosta. Myös näiden kokeiden perusteella voidaan todeta, että pienempi tiivistilasta tuottaa pienemmän kapillaarisen nousun, joskin vaikutus näytti olevan pienempi kuin kapillaarimetrikokeissa. Kapillaarisissa nousukorkeuksissa havaittiin huomattavia ristiriitaisuuksia suhteessa rakeisuuksien perusteella ennustettaviin nousukorkeuksiin.

Pitkäaikaisten putkikokeiden puretuista näytteistä tuotettuja vesipitoisuusprofiileita tarkastelemalla saatiin tietoa siitä, kuinka paljon kapillaarinen imu oli tuonut vettä maamateriaaliin eri korkeustasoille. Puretuissa näytteissä vesipitoisuusgradientti oli pääsääntöisesti näytteen alaosassa suuri ja yläosassa pieni. Teoreettisesti ennustettu täysin kyllästynyt vyöhyke jäi puretuissa näytteissä hyvin matalaksi suhteessa kokonaisnousuun. Sahi-kapillaarimetrikokeen tulos ei näytä vastaavan täysin kyllästyneen kerroksen korkeutta.

Aikaisemman projektin yhteydessä Kvl-Kot-radan materiaaleille oli tehty kapillaarisen nousun määrittäykset putkimenetelmällä. Putkikokeiden tulosten sisäiseen tarkasteluun sisällytettiin niiden näytemateriaalien tulokset, joille tämän työn yhteydessä tehtiin kapillaarimetrikokeet. Lisäksi putkikokeiden tulosten tarkasteluun otettiin mukaan neljän pitkäaikaisen putkikokeen tulokset redusoituina paremmin vastaamaan lyhytaikaisten putkikokeiden keston mahdollistamaa tulostasoa. Kapillaarimetrikokeiden tulosten tapaan myös putkikokeiden tulokset korreloivat näytteiden rakeisuuksien kanssa.

Koemenetelmien tuottamien kapillaaristen nousukorkeuksien erot ja tiiviystilan vaikutus kokeiden tuloksiin

Sekä kapillaarimetrin että putkessa tapahtuvan kapillaarisen nousun määrittämisen oletetaan usein mittavaan samaa asiaa ja kumpaakin tekniikkaa käytetään kapillaarisen nousukorkeuden määrittämisessä. Näin ollen koemenetelmien tuottamia tuloksia tarkasteltiin keskenään 47 materiaalin osalta. Taulukossa 9 on esitetty eri menetelmillä saatujen kapillaaristen nousukorkeuksien keskiarvot ja näytteiden keskimääräiset kuivatilavuuspainot. Kuten taulukosta 9 voidaan päätellä, suurimmalla osalla näytemateriaaleista putkikokeen tulos ja putkikokeen näytteessä vallinnut kuivatilavuuspaino olivat suurempia kuin tärytiivistetyn kapillaarimetrikokeen vastaavat arvot. Tärytiivistetyn kapillaarimetrikokeen ja putkikokeen tulosten ja näytteiden kuivatilavuuspainojen suhde muodostui eri materiaaleilla hyvinkin erilaiseksi. Joidenkin näytteiden kohdalla kokeen tulos tai näytteessä vallinnut kuivatilavuuspaino olivat tärytiivistetystä kapillaarimetrikokeesta jopa suurempia kuin putkikokeesta. Vesitiivistettyjen kapillaarimetrikokeiden tulokset ja näytteiden kuivatilavuuspainot jäivät selvästi putkikokeiden tuloksia pienemmiksi.

Taulukko 9. *Kapillaarimäärittysten tulosten ja koenäytteiden kuivatilavuuspainojen keskiarvot koetyypeittäin.*

Koetyyppi	Näytteiden kuivatilavuuspainojen keskiarvo (kN/m ³)	Koetulosten keskiarvo (cm)
Putkikokeet	18,5	35
Kapillaarimetrikokeet (tärytiivistys)	18,1	28
Kapillaarimetrikokeet (vesitiivistys)	17,3	15

Tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoenäytteiden jääminen keskimäärin hieman putkikoenäytteitä löyhemmiksi selittänee ainakin näennäisesti suurimman osan putkikokeiden suuremmasta tulostasosta. Kyseiset koetyypit saattavat mitata teoreettisesti nähtynä hieman eri asioita, joten tältä näkökannalta nähtynä tulosten ei toisaalta pitäisikään olla täysin samoja, vaikka kuivatilavuuspainot olisivat olleet samoja. Esimerkiksi Lanen ja Washburnin näkemyksen mukaan putkikokeessa kaiken kokoiset huokokset vaikuttavat kapillaarisen nousun korkeuteen, siinä missä kapillaarimetrikokeen tulokseen vaikuttavat lähinnä suurimmat huokokset. Jos materiaalit olisivat lajittuneet merkittävästi tärytiivistettyjen kapillaarimetrinäytteiden valmistuksessa, voisi tämä selittää miksi vain tiiviystilaero näyttää tekevän putkikokeiden tuloksista suurempia kuin kapillaarimetrikokeiden tuloksista. Esitetyn laisen lajittumisen tapahtumista ei kuitenkaan voida pitää oletettavana ilmiönä ilman lisätutkimuksia. Asiaa voitaisiin tutkia purkamalla näyte osissa ja seulomalla purkukerrokset. Toisaalta esitetty teoria putkikokeen ja kapillaarimetrikokeen eri asioita mittavasta luonteesta on hieman spekulatiivinen ja monissa yhteyksissä määrittämiä käytetään myös samanveroisina, joskin kapillaarimetrikoe pidetään usein epätarkempana kuin putkikoe.

Putkikoe voidaan kaiken kaikkiaan nähdä kapillaarimetrikoe luotettavampana tapana mitata kapillaarista nousua. Tulokseen vaikuttavina tekijöinä ovat kuitenkin tällöinkin tiiviystila ja kokeen suoritus aika.

Periaatteessa näytteen tiiviystilan tulisi vastata todellisessa rakenteessa vallitsevaa tiiviystilaa, jonka arvioiminen voi olla vaikeaa. Tässä työssä esitetyt putkikokeiden näytteet tiivistettiin täryttämällä näyteputkea täryraudalla, kunnes näyte ei enää merkittävästi painunut kasaan tärytystä jatkettaessa. Näin saadut kuivatilavuuspainot muodostuivat varsin suuriksi suhteessa Proctor-kokeissa saavutettuihin maksimikuivatilavuuspainoihin. Yleensä kapillaarinen nousu on haitallista rakenteessa ja se pyritään minimoimaan karkearakeisia materiaaleja käyttämällä. Tällöin kokeiden suorittaminen todellisessa rakenteessa vallitsevaa tiiviystilaa suuremman tiiviystilan omaavilla näytteillä tuottaa tulosta-

sollisesti varmalla puolella olevat tulokset. Jos materiaali jäisi koenäytteessä merkittävästi löyhemmäksi kuin rakenteessa, tuottaisi koe liian pieniä arvoja, mikä saattaisi joutaa haittoihin esimerkiksi kapillaarikatkokerrosten tapauksessa. Kapillaarisen veden merkitys ratarakenteessa on kuitenkin moninainen sen kyetessä jopa lisäämään maan lujuutta näennäisen koheesion kautta pienten kyllästysasteiden tapauksessa.

Vaikka on selvää, että suurempi tiivistila tuottaa suuremman kapillaarisen nousun, jäi ilmiön voimakkuus jossain määrin epäselväksi. Pitkäaikaisten putkikokeiden löyhien näytteiden nousut vaikuttivat ainakin kokeen keston puitteissa jäävän useimmilla materiaaleilla suuremman tiivistilan omaavien näytteiden nousuja vain kohtuullisen paljon pienemmiksi. Pitkäaikaisissa putkikokeissa löyhien ja tiiviiden näytteiden kuivatilavuuspainoero oli noin 10 %. Kapillaarimetrikokeissa tärytiivistettyjen ja vesitiivistettyjen näytteiden kuivatilavuuspainoero oli keskimäärin vain 4,8 % mutta silti tärytiivistetyt näytteet tuottivat keskimäärin noin kaksi kertaa suuremmat tulokset kuin vesitiivistetyt näytteet. Jos tärytiivistettyjen kapillaarimetrikoenäytteiden alaosaan on syntynyt lajittumisen seurauksena merkittävästi keskimääräistä rakeisuusprofiilia hienorakeisempi vyöhyke, on tämä voinut tehdä tuloksesta liian suuren. On myös epäselvää millaiseksi pitkäaikaisten putkikokeiden tiiviiden ja löyhien näytteiden tulosten ero olisi lopulta muodostunut, jos löyhien näytteiden kokeita olisi pidetty käynnissä yhtä kauan kuin tiiviiden näytteiden kokeita.

Putkikokeissa kokeen suoritus aika voi vaikuttaa merkittävästi kokeen tulokseen niillä näyttemateriaaleilla, joilla nousu jatkuu pitkään. Jos koe tehdään lyhytkestoisena, voidaan kokeen lopussa vallitsevaa nousunopeutta havainnoimalla tehdä arvioita siitä, tapahtuisiko nousu vielä merkittävästi korkeammalle, jos koetta jatkettaisiin pidempään. Kapillaarisen nousun määrittämisessä kapillaarimetrimenetelmän etu suhteessa putkikokeeseen on kokeen lyhyempi suoritus aika. Kapillaarimetrikokeiden tuloksiin on kuitenkin suositeltavaa suhtautua varauksella varsinkin, jos näytteen tiivistys tapahtuu perinteisellä tavalla vain veden vaikutuksesta ilman täryraudalla tehtävää tärytystä.

Kapillaarisuuksien ja rakeisuuksien suhde syklisten kolmiaksiaalikoekoiden tuloksiin

Työssä tutkittiin hypoteesia, jonka mukaan näyttemateriaalin suuri tulos kapillaarisuuden määrittämisessä ennustaisi näyttemateriaalin heikkoa kuormituskäyttäytymistä syklisessä kolmiaksiaalikoekossa. Tutkimus toteutettiin vertaamalla kuuden materiaalin kapillaarimetri- ja putkikoetuloksia suhteellisen muodonmuutoksen kertymisnopeuden arvoihin, jotka syklisissä kolmiaksiaalikoekossa oli saavutettu tavaraliikenteen kuormitusta vastaavilla kuormitustasoilla.

Kapillaarimetrillä tai putkimenetelmällä määritettyjen kapillaarisuuksien ja syklisten kolmiaksiaalikoekoiden tulosten välillä ei havaittu riippuvuutta. Tarkastelu suoritettiin suppeahkon aineiston varassa eivätkä koemateriaalit sisältäneet erittäin huonolaatuisia materiaaleja. Jos koesarjan laajuutta pidetään riittävänä, voidaan alkuperäinen hypoteesi, jonka mukaan suuri kapillaarimäärittämis tulos ennustaisi materiaalin heikkoa kuormituskäyttäytymistä syklisessä kolmiaksiaalikoekossa, hylätä.

Rakeisuus voidaan nähdä perinteisenä tapana arvioida materiaalin laadukkuutta radan alusrakennemateriaalina. Vertailtaessa materiaalien rakeisuuskyärien sopivuutta ohjealueelle ja materiaalien muodonmuutoksen kertymisnopeuksia syklisissä kolmiaksiaalikoekossa todettiin rakeisuuden kuvaavan muodonmuutuskäyttäytymistä vajavaisesti. Kyseinen vertailu käsitti vain kuusi materiaalia, joten tuloksiin on suhtauduttava varauksella rakeisuuden ollessa paljolti käytetty kuormituskestävyyden mittari.

Kokeiden perusteella jää epäselväksi olisivatko rakeisuuksiin perustuneet laatuarvot tai kapillaariset nousukorkeudet kuvanneet materiaalien kuormituskäyttäytymistä syklisissä kolmiaksiaalikoekossa, jos tutkittavien materiaalien laadullinen skaala olisi ollut laajempi.

Koetuloksiin vaikuttivat monet virhelähteet, joista kaikkien merkitystä ei pystytty tarkasti arvioimaan.

LÄHTEET

- [1] Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne, Liikennevirasto, 2018, 39 s.
- [2] A.Nurmikolu, P. Kolisoja, XPS-routaeristelevyt ratarakenteessa; 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot, Ratahallintokeskuksen julkaisuja, 2001, 97 s.
- [3] Diplomityön ohjauskeskustelut ja palautteet
- [4] InfraRYL 2019
- [5] M. Alameri, Suomen rautatiet, Slezak, 1979, 192 s.
- [6] A.Kalliainen, P.Kolisoja, A. Nurmikolu, Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2014, 174 s.
- [7] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann, S. Chrismer, Railway Geotechnics, CRC Press, 2016, 574 s.
- [8] S. Iwnicki, Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press, 2006. 535 s.
- [9] M. Kurtz, Handbook of Transportation Engineering, McGraw-Hill Companies, 2003, 937 s.
- [10] R. Jääskeläinen, Geotekniikan perusteet, Tammertekniikka, 2011, 387 s.
- [11] Khan Towhid Osman, Soils Principles, properties and management, Springer science+business media Dordrecht, 2013, 271 s.
- [12] J. Airaksinen, Maa- ja pohjavesihydrologia, Kirjapaino Oy Kaleva, 1978, 248 s.
- [13] MA Dippenaar, JL van Rooy, N Breedt, A Huisamen, SE Muravha, S Mahlangu & JA Mulders, Vadose Zone Hydrology: concepts and techniques, 2014, 174 s.
- [14] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons inc., 1993, 517 s.
- [15] A. R. Jumikis, Soil Mechanics, D. Van Nostrand Company, 1962, 791 s.
- [16] F.Zunker, Das Verhalten des Bodens zum Wasser, Die Physikalische Beschaffenheit des Bodens, Springer, 1930, s.67.
- [17] F. Zunker, Das Verhalten des Bodens zum Wasser, Handbuch der Bodenlehre, Vol.6, J. Springer, 1930
- [18] A. A. Rode 1952, Pochvennaya vloga, Izd AN SSSR, moscow, Das wasser im boden, akademie verlag, 1959
- [19] L. Rétháti, Groundwater in Civil Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983, 477 s.
- [20] J. S. D'arrigo, Screening of membrane surface charges by divalent cations: and atomic representation, American journal of physiology, 1978, s. 109-117.

- [21] T. Saarenketo, T. Scullion, Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates, Texas Transportation Institute, 1996, 71 s.
- [22] D. Hillel, Soil and water, Academic press, 1971, 288 s.
- [23] W. Jury, R. Horton, Soil Physics, John Wiley & Sons, 2004, 370 s.
- [24] Shrinking and Swelling Soils, Pavement Tools Consortium, saatavissa: <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/shrinking-and-swelling-soils/> (viitattu 12.9.2019)
- [25] S. Ylitapio, TS-testin käyttö sitomattomien ja sidottujen murskeiden laadunvalvonnassa, 1998, 39 s.
- [26] T Saarenketo, T. Scullion, Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates, 1995, 71 s.
- [27] D. Kirkham, W.L powers, Advanced soil physics, John Wiley & Sons, Inc., 1972, 534 s.
- [28] R. D. Morrison, Ground water monitoring technology:procedures, equipment and applications, Timco mfg, 1983, 111 s.
- [29] E.Ehrola, Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet, Rakennustieto Oy, 1996, 365 s.
- [30] B.Indraratna, W.Salim, C.Rujikiatkamjorn, Advanced Rail Geotechnology-Bal- lasted Track, CRC Press, 2011, 414 s.
- [31] K. Terzaghi, R. Peck, Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons inc., 1948, 566 s.
- [32] J. Latvala, Radan kuivatuksen toimivuuden arviointi ja parantaminen olemassa olevilla radoilla, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 50/2018, 136 s.
- [33] F.J. Heyns Railway Track Drainage design techniques, doctoral dissertation, university of Massachusetts, 2001
- [34] R. Sanudo, M. Miranda, C. Garcia, D. Garcia-Sanchez, Drainage in Railways, Construction and Building materials, 2019, s. 391-412
- [35] J. Latvala, A. Nurmikolu, H. Luomala, ICTG 2016: Problems with Railway Track Drainage in Finland, Tampere University of Technology, 2016, s. 1051-1058.
- [36] Ilmasto-opas, Ilmatieteenlaitos, 2017, saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastomuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/27922915-7ee5-4122-ae60-51f58e6aef9a/sademaarat-kasvavat.html>
- [37] S. Saarelainen, L. Makkonen, Ilmastonmuutokseen sopeutuminen radanpidossa, Ratahallintokeskuksen julkaisu A 16/2008, 46 s.
- [38] J.S Rowlinson, B. Widom, Molecular theory of capillarity, Dover Publications inc., 1982, 352 s.

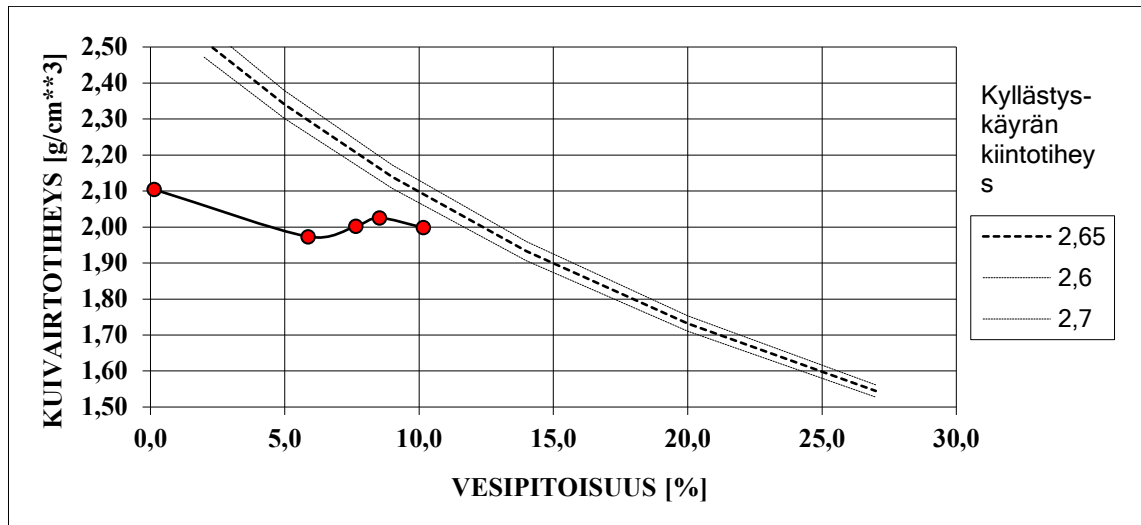
- [39] U. Soveri, L.K. Kauranne, Rakennusgeologia 1: Suomen rakennusgeologia, Otakustantamo, 1972, 194 s.
- [40] Maalajien luokitus, GTK, Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/maalajiluokitus2.htm>
- [41] P. Kolisoja, Resilient Deformation Characteristics of Granular materials, Tampere University of Technology, 1997, 188 s.
- [42] D.Hillel, Applications of Soil Physics, Academic press, 1980, 385 s.
- [43] K. Pylkkänen, A. Nurmikolu, Routa ja routiminen ratarakenteessa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 2015, 210 s.
- [44] M.G. Lay, Modelling pavement behaviour, Road & transport research Australian Vol. 2. No.2, 1993, s. 17-27.
- [45] F. Brecciaroli, P. Kolisoja, Deformation behavior of railway embankment materials under repeated loading, Finnish Rail Administration, 2006, 201 s.
- [46] S. F. Brown, Determination of young's modulus for bituminous materials in pavement design, Highway research record, number 431, 1993a, s.38-49
- [47] P. Kolisoja, Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet, Tielaitoksen selvityksiä, 38/1993, 147 s.
- [48] N.H. Thom, S.F. Brown, The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomite limestone, Proceedings of Australian Road Research Board 1417, 1988, s. 94 – 100
- [49] H. R. Cedergren, Seepage, drainage and flow nets, John Wiley and sons, 1989, 486 s.
- [50] K.V. Helenelund, Maarakennustekniikka 137, Otakustantamo, 1967, 278 s.
- [51] J.H. Haynes, E.J. Yoder, Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used at the AASHO road test, Highway research record 39, National academy of science, Washington DC, 1963, 12 s.
- [52] Juha Latvala, esittelykalvot 13.12.2019 kokous, Etevä-tutkimusprojekti, Tampereen yliopisto
- [53] J. K. Mitchell, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons, 1976, 422 s.
- [54] Valle-Rodas, C, A. Hogentogler, Capillarity in sands, Highway research board, vol 24, 1944, s. 389-396
- [55] R. B. Peck, W. E. Hanson, T. H. Thornburn, Foundation engineering, John Wiley & Sons Inc., 1953, 486 s.
- [56] A. Kalliainen et al., Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011, 152 s.
- [57] K.S. Lane, D.E. Washburn, Capillary tests by capillarimeter and by soil filled tubes, Proceedings of the Twenty-Sixth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C., 1946, s. 460-473.

- [58] K. Terzaghi, Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons Inc., 1943, 510 s.
- [59] Työohje: Sahi-mallin kapillaarimetri, Tampereen yliopisto, Maa-, pohja- ja ratarakenteet, 2019, 3 s.

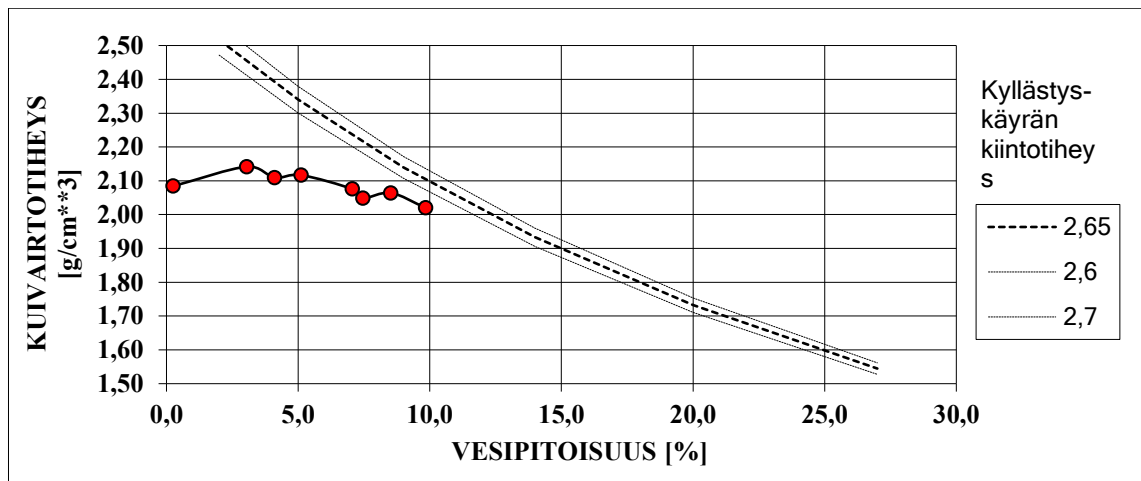
LIITE A: PITKÄKESTOISTEN PUTKIKOKEIDEN NÄYTTEIDEN KUIVATILAVUUSPAINOT

Materiaali	rr 44	rr 98	rr 137	referenssi- materiaali	Kvl-Kot heikko yhdiste	Kvl-Kot hyvä yh- diste
Kuivatilavuuspaino tiiviimmässä tilassa (kN/m ³)	20,6	20,3	17,8	17,4	18,8	18,6
Kuivatilavuuspaino löyhemmässä tilassa (kN/m ³)	18,5	18,3	15,9	15,9	-	-
Löyhemmän näytteen kuivatilavuuspai- non suhde tiiviimmän näytteen kuivati- lavuuspainoon (%)	90	90	89	91	-	-

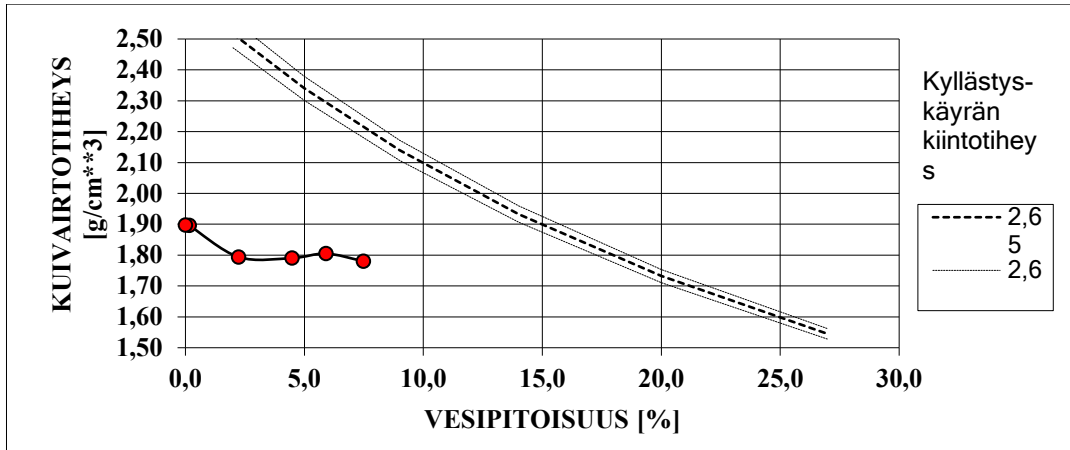
LIITE C: PROCTOR KOKEIDEN TULOKSET



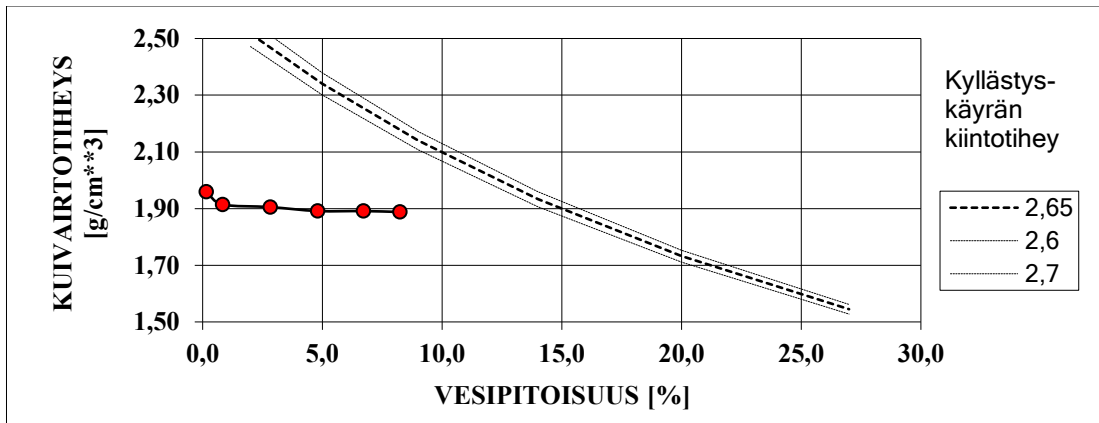
Rr 44



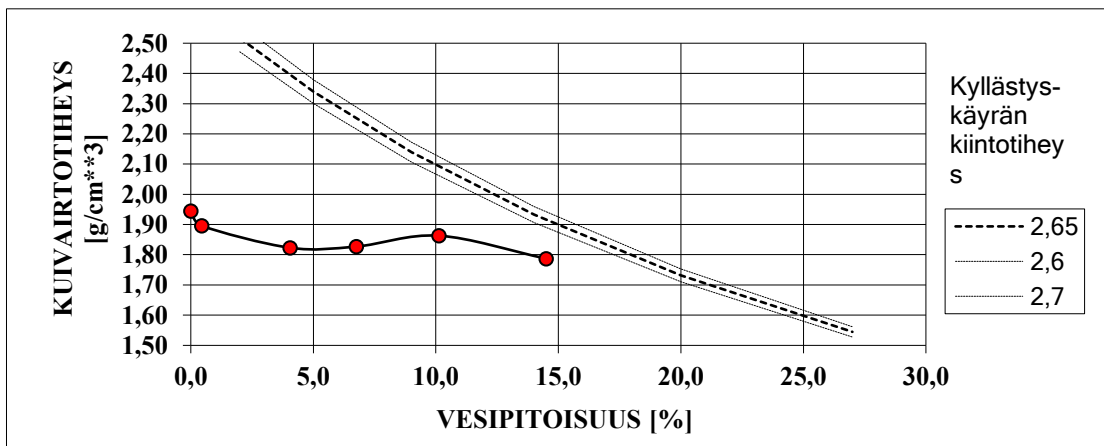
Rr 98



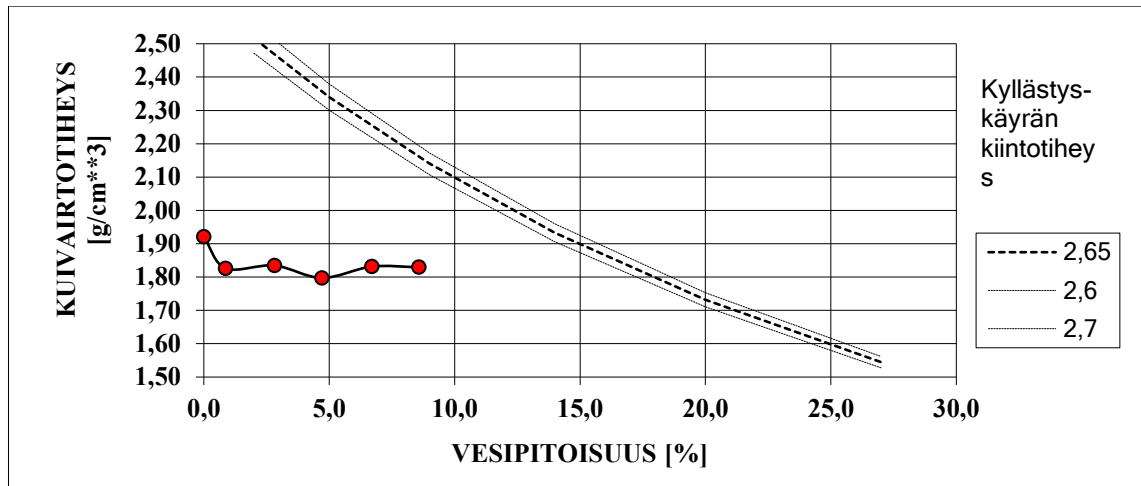
Rr 137



Referenssimateriaali

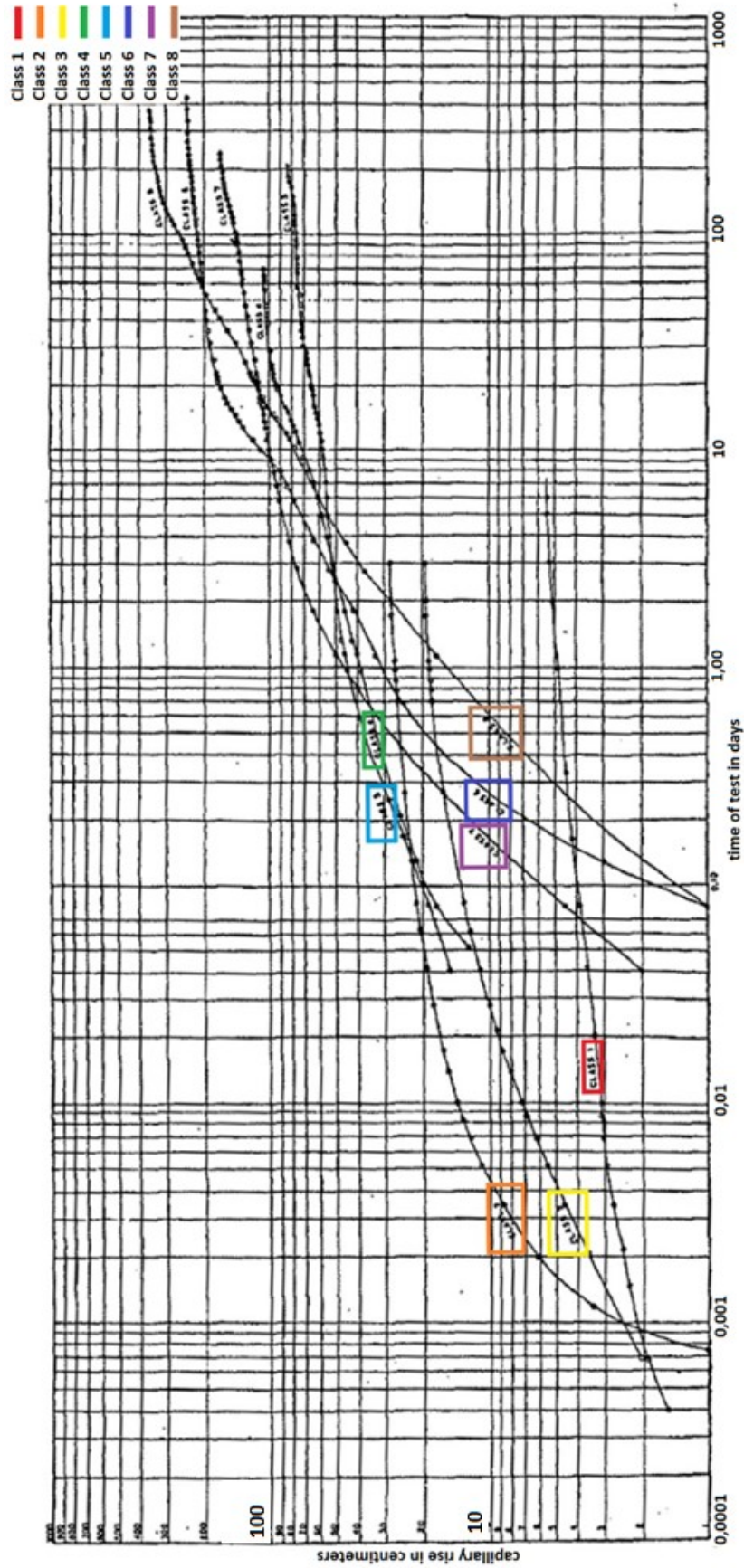


Kvl-Kot heikko yhdistemateriaali



Kv1-Kot hyvä yhdistemateriaali

Lanen ja Washburnin putkikokeissa saavutetut kapillaariset nousukorkeudet ajan suhteen [57].



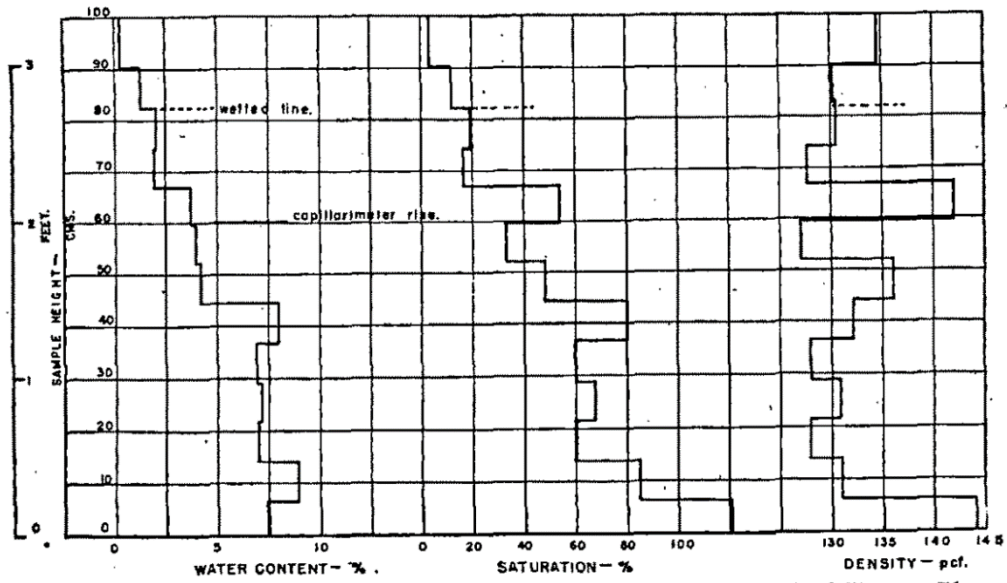
Lanen ja Washburnin kokeiden tulokset ja materiaalien ominaisuudet [57].

Sample Class No.	Specific Gravity	Effective Size— d_{10} mm	Capillarimeter Tests				Open Tube Tests			
			Void Ratio ^a e	Dry Density lb per cu ft	Capillary Rise cm	Permeability ^b $k \times 10^4$ cm per sec	Void Ratio ^a e	Dry Density lb per cu ft	Capillary Rise cm	Permeability ^b $k \times 10^4$ cm per sec
1	2.70	0.82	0.27	132.2	6.0	1100	0.27	132.2	5.4	1100
2	2.65	0.20	0.45	114.8	20.0	160	0.45	113.8	28.4	160
3	2.70	0.30	0.29	130.2	20.0	71	0.29	130.2	19.5	71
4	2.70	0.06	0.45	116.4	68.0	4.6	0.45	116.4	106.0	4.6
5	2.69	0.11	0.27	132.0	60.0	1.1	0.27	132.2	82.0	1.1
6	2.75	0.02	0.48	116.1	120.0	0.29	0.66	103.3	239.6	0.62
7	2.77	0.03	0.36	128.7	112.0	0.096	0.36	126.5	165.5	0.096
8	2.76	0.006	0.95	88.3	180.0	0.15	0.93	89.3	359.2	0.14

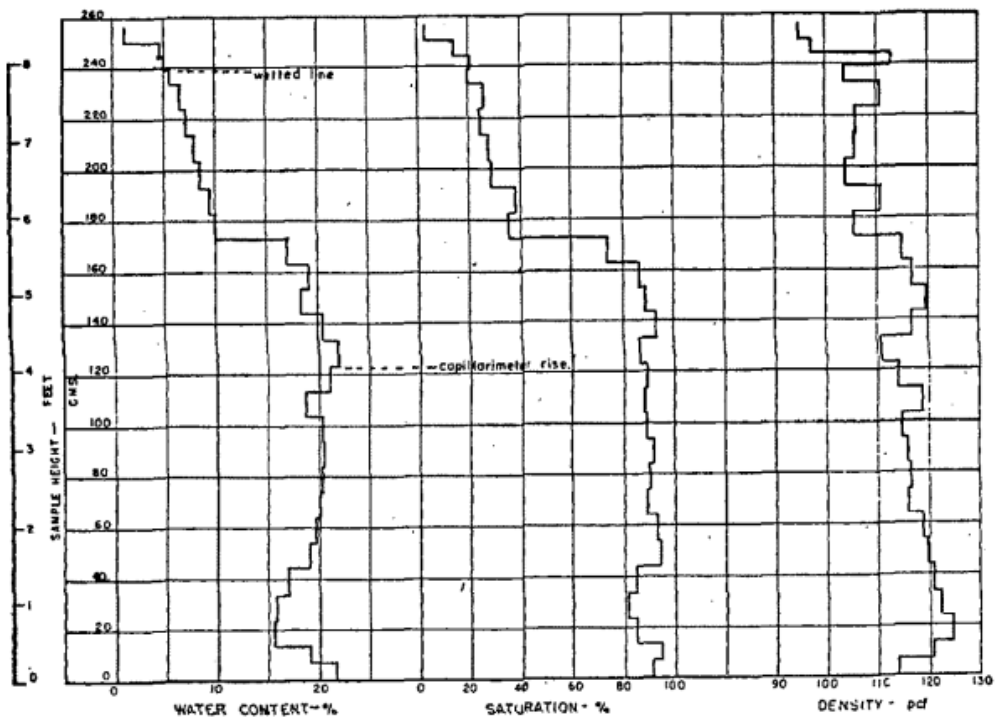
^a Void ratio shown is overall value for entire sample.

^b Permeability coefficient taken from k - e curves at overall void ratio shown.

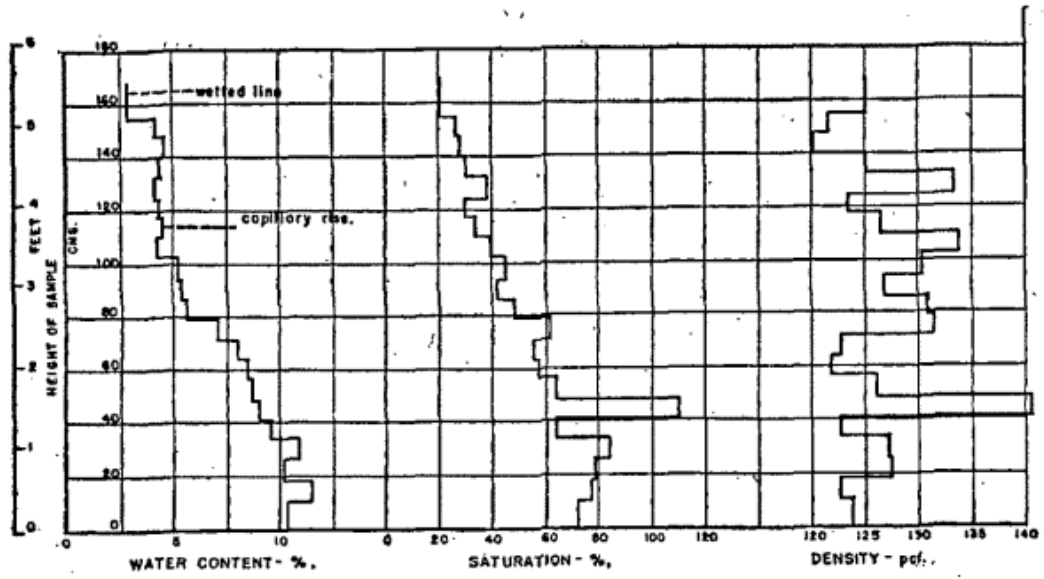
Lanen ja Washburnin putkikokeiden näytteiden purkuvaiheessa määritetyt vesipitoisuus-, saturaatiaste- ja tiheysjakaumat [57].



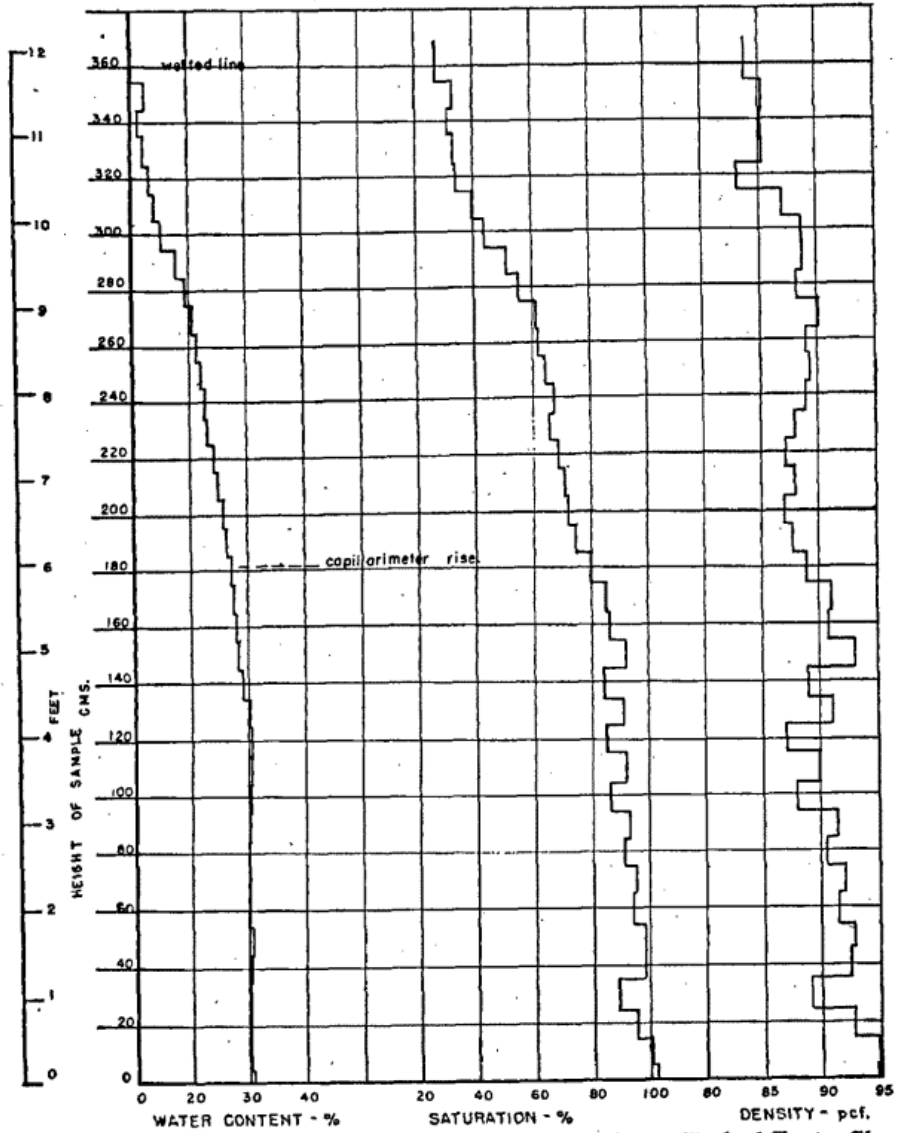
Water Content, Saturation, and Dry Density at End of Test—Class 5



Water Content, Saturation, and Dry Density at End of Test—Class 6

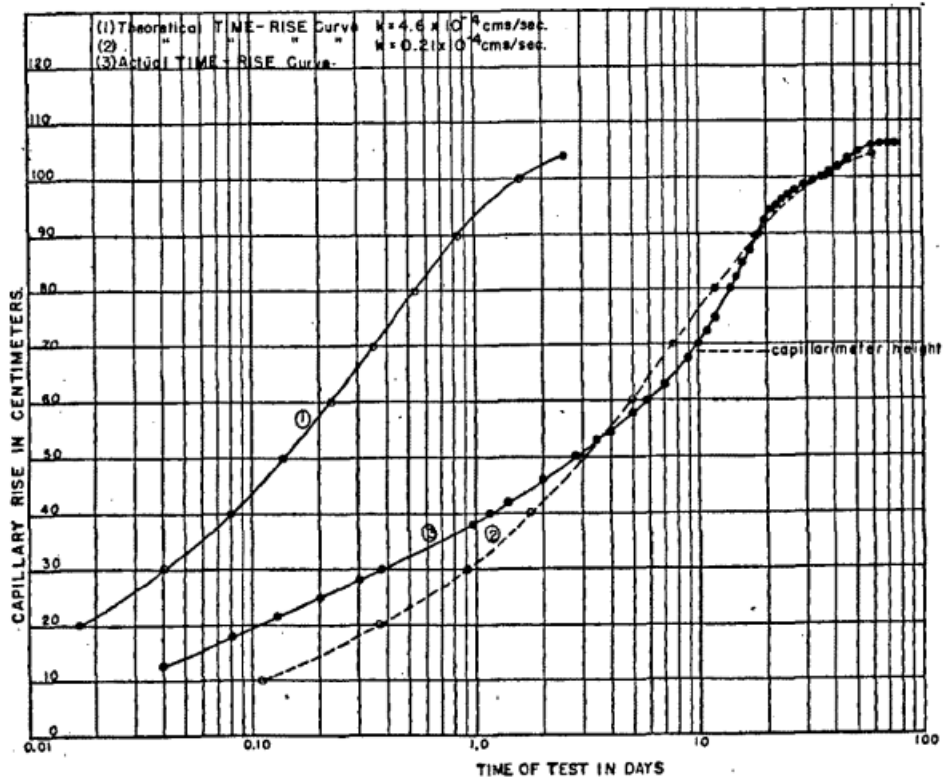


Water Content, Saturation, and Dry Density at End of Test—Class 7

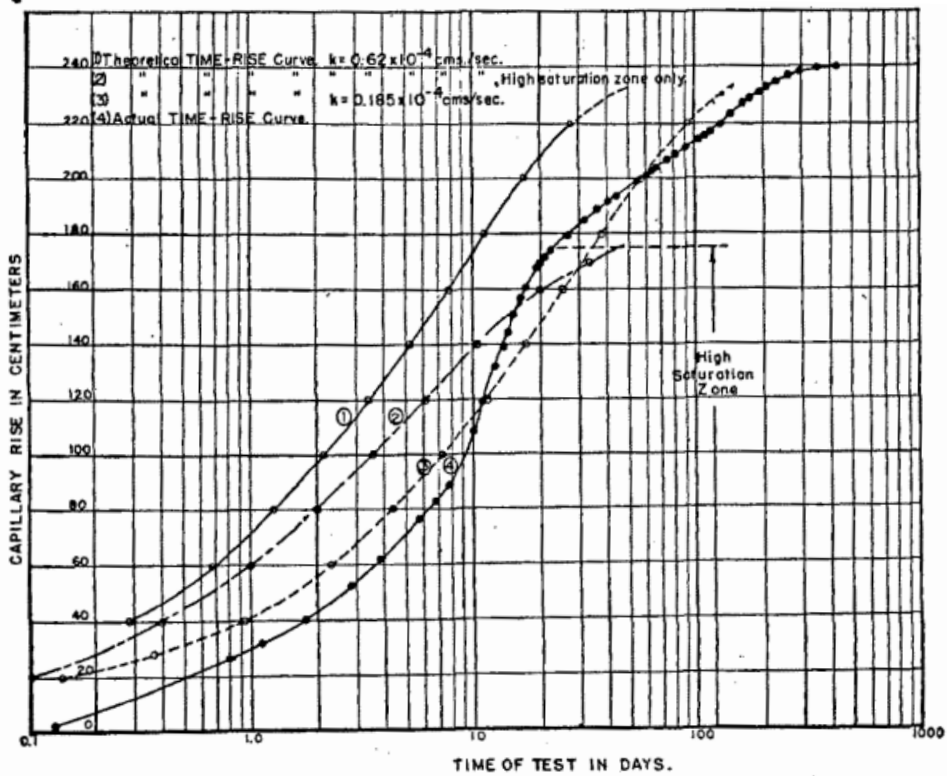


Water Content, Saturation, and Dry Density at End of Test—Class 8

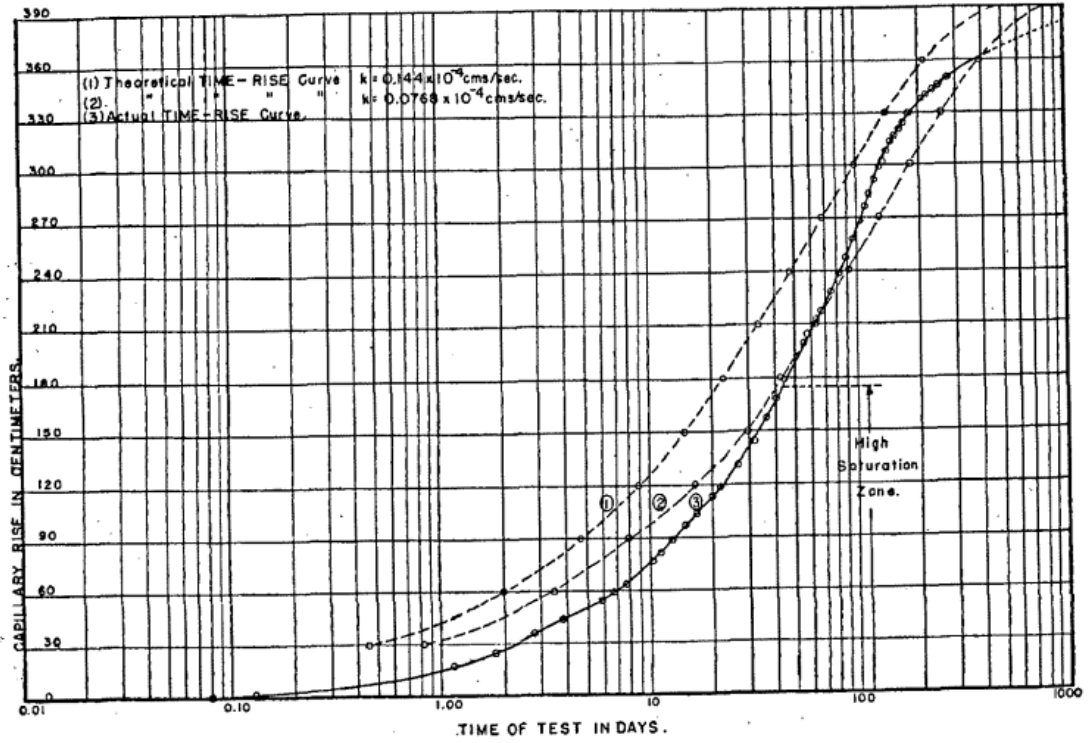
Lanen ja Washburnin putkessa tehtyjen kapillaarisen nousun kokeiden nousunopeudet suhteessa laskennallisiin nousunopeuksiin [57].



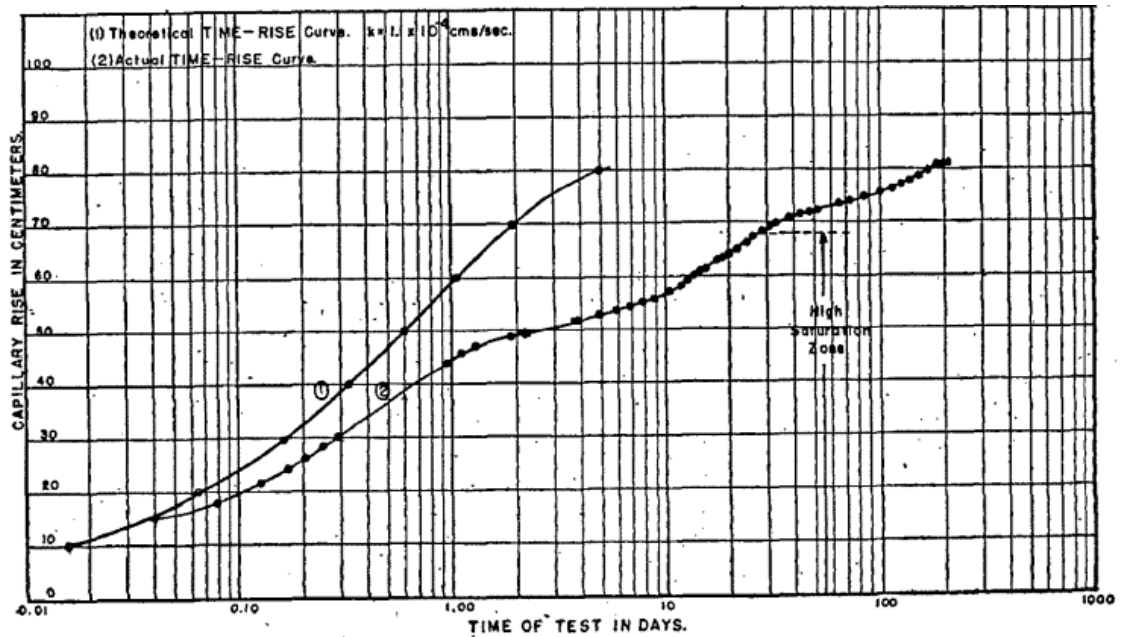
Capillary Rise-Time Curves—Class 4—Actual and Theoretical Rise



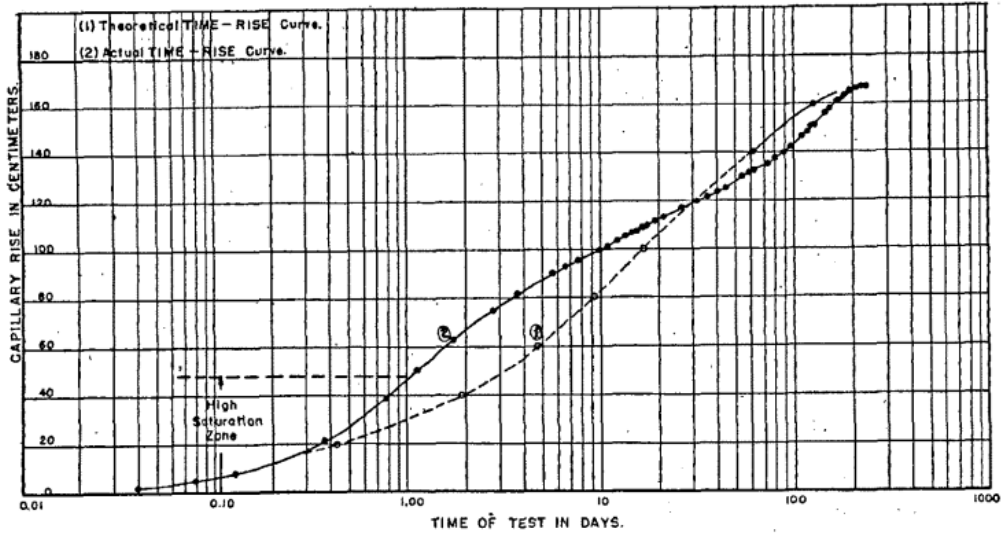
Capillary Rise-Time Curves—Class 6—Actual and Theoretical Rise



Capillary Rise-Time Curves—Class 8—Actual and Theoretical Rise



Capillary Rise-Time Curves—Class 5—Actual and Theoretical Rise



Capillary Rise-Time Curves—Class 7—Actual and Theoretical Rise

LIITE E: RANTARADAN MATERIAALIN, KVL-KOT YHDISTEMATERIAALIN JA REFERENSSIMATERIAALIN RAKEISUUSKÄYRÄT

