



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

NIISKUSE MÕJU LIIVADE KANDEVÕIMELE

EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON BEARING CAPACITY OF SANDS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Joonas Vuntus

Üliõpilaskood 110648EATI

Juhendaja: Ain Kendra

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“24” mai 2021.

Autor: Joonas Vuntus

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“24” mai 2021.

Juhendaja: Ain Kendra

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Joonas Vuntus (sünnikuupäev: 13.10.1991)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
NIISKUSE MÕJU LIIVADE KANDEVÕIMELE

mille juhendaja on Ain Kendra

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

24.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Joonas Vuntus, 110648EATI

Õppekava, peeriala: EATI02/09 – Teedehitus ja geodeesia

Juhendaja(d): Ain Kendra

Konsultant: Riho Eichfuss

Lõputöö teema:

NIISKUSE MÕJU LIIVADE KANDEVÕIMELE

Effect of moisture content on bearing capacity of sands

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida niiskuse mõju liiva kandevõimele labori katsestendil
2. Uurida niiskuse mõju erinevate liivade kandevõimele katsetatuna Proctor-vormis
3. Teha ettepanekud edasiste uuringute vajaduste kohta

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Välismaiste uurimustööde analüüs	01.02.2018
2.	Katsed TTK katsestendil	01.05.2018
3.	Katsed TTÜ laboratooriumis	20.05.2021
4.	Katsetulemuste analüüs	23.05.2021

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "24" mai 2021.a

Üliõpilane: Joonas Vuntus "24" mai 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Ain Kendra "24" mai 2021.a
/allkiri/

Konsultant: Riho Eichfuss "24" mai 2021.a
/allkiri/

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1 PINNASED JA VESI.....	8
1.1 Pinnase mõiste ja koostis.....	8
1.2 Struktuursidemed pinnases	8
1.3 Vee mõju teekonstruktsioonile.....	10
1.4 Niiskuse olulisus materjali tihendamisel	11
1.5 Probleemid seoses veega	13
2 NIISKUSE JA KANDEVÕIME MÕÕTMINE EBITUSPROTSESSIS.....	14
2.1 Tee ehitamise kvaliteedi nõuded	14
2.2 Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised	15
2.3 Killustikust katendikihtide ehitamise juhised	16
2.4 Muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised	17
2.5 Mõtteid seoses normide ja juhenditega	17
3 VÄLISMAISED UURIMUSTÖÖD	19
4 ERINEVAD NIISKUSE MÄÄRAMISE SEADMED	26
5 KATSETES KASUTATAVAD MATERJALID	31
6 KATSETES KASUTATAVAD SEADMED	33
7 NIISKUSE MÕJU LIIVADE KANDEVÕIMELE	41
7.1 Katsete eesmärgid	41
7.2 Katsed TTK laboratooriumis	41
7.2.1 Katsestendil liiva mõõtmine LWD seadmega	41
7.2.2 Katsestendil liiva mõõtmine plaatkoormus seadmega	46
7.2.3 Katsestendil killustikaluse mõõtmine LWD seadmega	48
7.2.4 TTK katsete kokkuvõte ja järeldus	51
7.3 Katsed TTÜ laboratooriumis	52
7.3.1 Elastsusmooduli mõõtmine ja niiskuse võrdluskatsed	52
7.3.2 LWD seadmega Proctor-vormis mõõtmine	53
7.3.3 Mõõtmistulemuste andmete töötlemine	57
7.3.4 Terastikulise koostise leidmine katsetatud materjalidele	59
7.3.5 Katsetatud materjalide kuivmahu massid	61
7.3.6 TTÜ laborikatsete kokkuvõte ja järeldused.....	63
8 IDEED EDASISTEKS UURIMUSTÖÖDEKS	66
KOKKUVÕTE	67
SUMMARY	68
KASUTATUD KIRJANDUS	70

Lühendite ja tähiste loetelu

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BS	Briti Standard
C _u	Lõimisetegur
DIN	Saksamaa Standardiseerimisinstituut
E	Elastsusmoodul, MPa
LWD	Kerge deflektomeeter (LightWeight Deflectometer)
NDG	Radioaktiivse isotoobi seade (Nuclear-Density Gauge)
MDOT	Marylandi Transpordiamet (Maryland department of transportation)
P _m	Peensusmoodul
TTK	Tallinna Tehnikakõrgkool
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool (TalTech)

SISSEJUHATUS

Senine Eesti katendite projekteerimise süsteem tugineb pinnaste ja materjalide liigitusele GOSTi järgi. VSN 46-83 järgi loetakse materjalide omadused konstantseks ehk mitte sõltuvaks niiskusest ja pinnaste omadused sõltuvaks niiskusest. Senine praktika ja mitmesugused välismaised teadustööd kinnitavad, et seosed on olemas.

Töö peamine eesmärk on analüüsida kättesaadavatel materjalidel elastsusmooduli sõltuvust niiskusest, viies kõik katsed läbi materjali tööolukorrale vastavas pingerežiimis. Eesmärgiks on tulevikus töötada välja meetodika erinevatele materjalidele niiskusest sõltuva paranduse sisseviimiseks välikatsel, katsetades materjali tegelikus niiskuses ja erinevates sellest suurema niiskusega režiimides mis peaksid andma suurema elastsusmooduli, saame teada kui palju maksimaalsest puudu on. Katsetele on aluseks dr S. Khosravifari teadustöö, kus toodi välja katsetamine Proctor-vormis erinevate materjalidega erinevate veesisalduste juures. Mida optimaalsema veesisalduse lähedasem olukord on, seda tihedamaks materjali tihendades saab. Optimaalset veesisaldust ületades tihenemisnäitajad langevad. On olnud uuringuid, mis ütlevad, et tihendusteguril ja kandevõimel erilist korrelatsiooni ei ole, on ka uurimustöid, mis ütlevad, et materjali veesisalduse tõusuga kandevõime langeb.

Käesoleva töö eesmärk on uurida liivast ja liivpinnastest teekonstruktsiooni kihtide kandevõime sõltuvust materjali niiskusest. Antakse ülevaade Eestis kehtestatud nõuetest konstruktsiooni niiskusesisaldusele ja kandevõimele. Tutvutakse lühidalt välismaiste uurimustöödega, mis olid inspiratsiooniks käesolevale tööle. Tutvustatakse erinevaid niiskuse määramise vahendeid ning käesoleva töö katsetes kasutatud materjale ja seadmeid. Lisaks antakse soovitusi edasisteks uurimisteks. Viimane peatükk kajastab autori teostatud katsetusi ja nende järeldusi.

1 PINNASED JA VESI

Käesolevas peatükis kirjeldatakse lühidalt pinnaste mõistet, nende koostist ja struktuuri. Lisaks käsitletakse vee mõju eelkõige liivpinnasele ning teekonstruktsiooni kihtidele, tutvustatakse nii ehitusaegset materjali veesisalduse mõju tihendamisele, kui ka teekonstruktsiooni sattuva vee mõju eksploatsiooni käigus.

1.1 Pinnase mõiste ja koostis

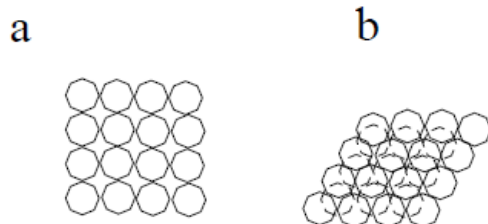
Olenevalt kasutus- ja erialast omab pinnas erinevat tõlgendamist. Üldine arusaam on, et pinnas on maakoore pindmise kihi moodustavad setted ja kivimid koos neil esineva mulla ja kultuurkihiga. [1] Pinnasemehaanikas mõistetakse pinnasena looduslikke materjale, mis koosnevad üksikutest omavahel sidumata või nõrgalt seotud osakestest-teradest. Loodusliku produktina on nende omadused muutlikumad, kui etteantud soovitud omadustega toodetud ehitusmaterjalidel. Rohkem, kui teiste ehitusmaterjalide puhul, mõjutab pinnase omadusi ja käitumist poorides olev vesi. [2]

Pinnased koosnevad mineraalsetest või orgaanilise päritoluga teradest ehk pinnase skeletist ja teradevahelistes poorides olevast veest ja õhust. Kuivas pinnases puudub poorides vesi ja veeküllastunud pinnases õhk. Kõige olulisem komponent on pinnase skelett – osakeste suurus, kuju ja mineroloogiline koostis. Vee mõju on pinnase omadustele seda suurem, mida peeneteralisem on materjal. Õhu osakaal võrreldes teiste osadega on väike. Jämedamad pinnaseosakesed – kruus ja kivid – on oma koostiselt samasugused, kui kivimid, mille lagunemisel nad on tekkinud ja nende mineroloogiline koostis on mitmekesine. Peenemad pinnaseosakesed on tavaliselt monomineraalsed. Liiva- ja tolmuterad koosnevad valdavalt kvartsist. [2]

1.2 Struktuursidemed pinnases

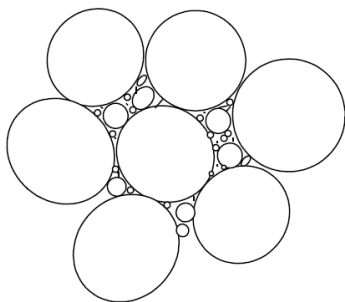
Pinnase struktuur – pinnaseosakeste omavaheline asetus, tegur, mis määrab pinnase omadusi. Struktuur kujuneb sõltuvalt osakeste kujust, suurusest, mineroloogilisest koostisest ja pinnasevee koostisest. Liivad on tekkelt enamajalt settepinnased. Suuremõõdulised liivaterad langevad settides veekogu põhja ja võtavad gravitatsioonijõu toimel tasakaaluasendi. Kokkupuutepunktides mõjub ainult hõõrdejõud. Sellisel viisil tekkinud struktuuri nimetatakse teraliseks. [2]

Alloleval joonisel 1.1 on välja toodud näide ühesuuruste terade kõige kohevamast paiknemisest ja kõige tihedamast paiknemisest – tetraedriline struktuur.



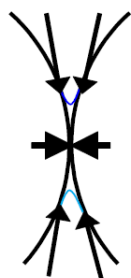
Joonis 1.1 a – ühesuuruste osakeste kohevaim paiknemine, b – ühesuuruste osakeste tihedaim paiknemine [2]

Võimalik on saavutada ka suuremat tihedust ilma „tetraeedrilise“ struktuurita. Seda juhul, kui pinnas koosneb erimõõdulistest teradest. Seda iseloomustab allolev joonis 1.2



Joonis 1.2 Erinevate suurustega pinnaseosakesed [2]

Jämedate pinnaseterade vahel võivad sidemed täielikult puududa ja pinnase tugevuse määrab sellisel juhul ainult hõõrdejõud kontaktpunktides, selliselt on see kuivades või veeküllastunud liivades. Niiske liiva puhul tekivad osakeste kokkupuute kohtade ümber kapillaarjõu toimel meniskid, mille poolt terale mõjuv jõud põhjustab teradevahelise survejõu suurenemise. Seega suureneb ka terade vaheline hõõrdejõud ja pinnase tugevus tervikuna. [2]



Joonis 1.3 Menisk terade kokkupuutepunkti ümber ja tekkivad kapillaarjõud [2]

1.3 Vee mõju teekonstruktsioonile

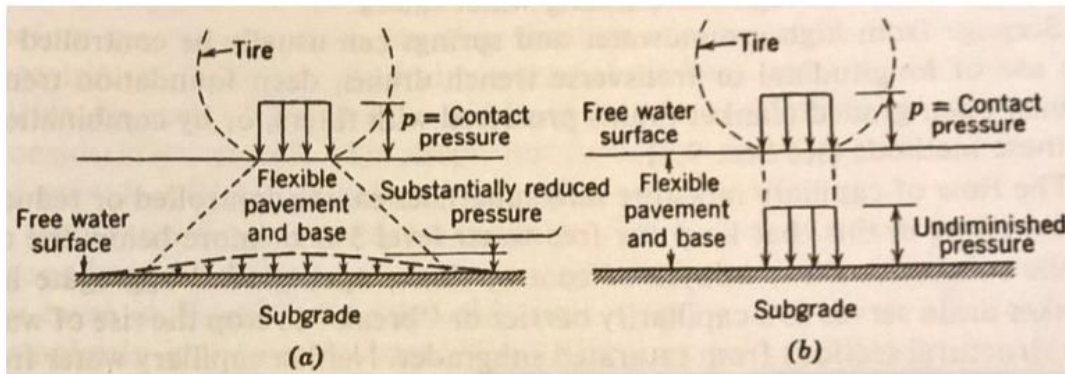
Tee konstruktsiooni saab liigitada ülevaatlilikult katendiks, muldeks ja aluspinnaseks. Katend jaguneb katteks, aluseks ja lisakihtideks (tavaliselt drenkiht ja külmakaitsekiht). Kate on enamjaolt ühe- või enamkihiline asfaltbetoonkate või ka pindamine. Alus on ühe- või mitmekihiline killustikalus, olenevalt tee klassist võib sisaldada ka stabiliseeritud kihti. Drenkiht on enamjaolt liivast kuigi varasemates juhendites on liiva hinnatud valikutest (killustik, kruus, liiv) viimaseks. Mulle ehitatakse enamjaolt liivast, kruusast või mõnest teisest piisavate drenivusomadustega pinnastest. Lisaks eelnevale saab teekonstruktsiooni liigitada ka seotud ja sidumata kihtideks. Seotud kihid on katte kihid ja aluse puhul stabiliseeritud kiht. Sidumata kihid on killustikalus, drenkiht ja mulle.

Tabel 1.1 Tee konstruktsioonikihid ja nende liigitus [3]

Katend	Kate	Katte pealiskiht (nt tihe asfaltbetoon)	Seotud kihid
		Katte alumine kiht (nt poorne asfaltbetoon)	
	Alus	Aluse ülemine kiht (nt kompleks stabi)	Sidumata kihid
		Aluse alumine kiht (nt killustik)	
		Drenkiht (nt killustik või drenliiv)	
	Mulle (nt kruus või liiv)		
Aluspinnas ehk looduslik maapind (mitte kasvupinnas)			

Käesoleva töö autor keskendub peamiselt drenkihi ja mulde materjalidele ning nende materjali käitumisele kokkupuutel veega.

Kui teekatend on veeküllastunud oludes, tõuseb materjali poorides oleva vee rõhk nii kõrgeks, et katend ei täida oma ülesannet jaotada sõidukite koormust muldkehale, mistõttu toimub teekatendi kiire lagunemine. Joonisel 1.4 a) kujutab ratta koormuse jagunemist kuivas konstruktsioonis ja b) kujutab koormuse jagunemist veega küllastunud olekus. [4]



Joonis 1.4 a- kuivas konstruktsioonis koormuse jagunemine, b- veeküllastunud konstruktsioonis koormuse jagunemine [4]

Vesi võib enamasti sattuda teekonstruktsiooni sadevee või lumesulamisveena katte praegudest ja vuukidest või teepeenardest läbi imbudes ning kapillaartõusust tingitud pinnaseveena. Kui vesi jääb katendisse, võivad toimuma hakata järgnevad protsessid: [4]

- sideainega sidumata kihtide tugevus väheneb;
- jäikade katendite alt „pumbatakse“ materjali välja põhjustades pragunemisi;
- liikluse poolt põhjustatud kõrge hüdrodünaamilise jõu tagajärjel „pumbatakse“ peenosiseid killustikalusesse, mis alandab kihi ja kogu tee kandevõimet;
- külmadel aladel tekitab külmakerkeid ja sulades kandevõime vähenemist;
- punduvate pinnaste puhul kerkib tee ebaühtlaselt;
- asfaltkatte pidev kokkupuude veega põhjustab kivimaterjali irdumist.

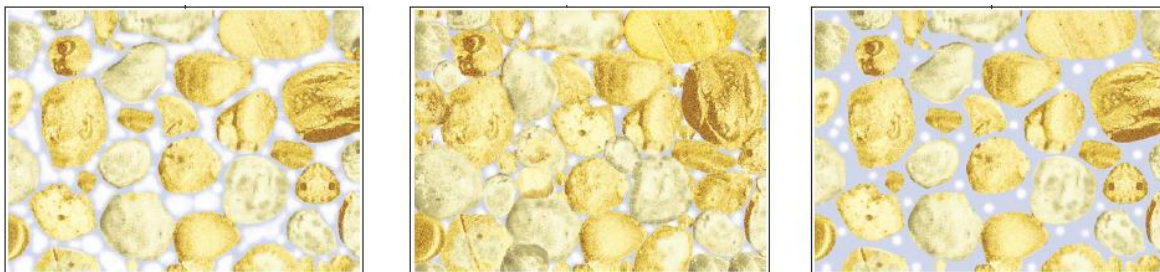
Peamine probleem, mida vesi konstruktsioonis tekitab, on külmakerge. Vee maht suureneb jäätudes ligikaudu 9%. Juhul kui teekonstruktsiooni mingis kihis on vesi, olgu see siis ülevalt poolt konstruktsiooni sisenenud vesi või pinnavesi, siis vee külmumisel selle võrra suureneb ka materjali maht ning kui pinnasel ei ole võimalik paisuda külgedele või alla poole, siis tekivadki külmakerked. Vee jäätumine pinnases sõltub pingeseisundist ja vee soolasisaldusest. Peamiseks külmakerke tekkimise mõjutajaks on peenosise sisaldus, mida suurem on peenosise sisaldus, seda vastuvõtlikum on pinnas külmakergetele. Lisaks külmaohtlikule materjalile, eeldab külmakerke teke ka konstruktsioonis olevat vett. [4]

1.4 Niiskuse olulisus materjali tihendamisel

Ühtlase terastikulise koostisega liival on raske saavutada suurt tihedust kihi pealispinna lähedal, kuna sellise materjali nihkekindlus on väike ja materjal tõuseb trumli taga üles. See ei ole probleem, kui ühtlase terastikulise koostisega materjalist kihi peale ehitatakse

järgmine kiht, mille tihendamisega tihendatakse ka ühtlaselt materjalist kihi pealmine kiht. Ühtlase terastikuga liiva saab efektiivselt tihendada ainult vibreerimisega. [5]

Uurimised on näidanud, et kõige tihedama pinnasestruktuuri saab, kui pinnase niiskus on selline, et pinnases olevate õhupooride maht on 4-6%. Sellisel juhul tekivad pinnaseosakeste vahel kõige püsivamad sidemed, mille juures pinnase filtratsioon ja võimalik mahumuutus on minimaalsed ning elastsusmoodul suurim. Kui niiskus on väiksem, st. õhupooride maht suurem kui 4-6% siis ei teki püsivat pinnasestruktuuri ja üleniiskumisel pinnas paisub ning mittepiisaval tihendamisel vastupidi, pinnas järeltiheneb ja vajub. Mõlemal juhul pinnase elastsusmoodul väheneb. Kui niiskus on suurem, st õhupooride maht väiksem kui 4-6%, muutub pinnasestruktuur jällegi ebapüsivaks ja pinnase elastsusmoodul väheneb. Teiste sõnadega- eksisteerib teatud pinnase optimaalne niiskusesisaldus, mille juures saavutatakse pinnase maksimaalne tihedus. Väikese niiskusesisalduse juures on pinnas jäik ja teda on raske tihendada, mistõttu peale tihendamist tema kuiv mahumass on väike ja jäävpoorsus suur. Niiskusesisalduse suurendamisel vesi toimib pinnase mineraalosakeste vahel määrdeainena, parandades pinnase töödeldavust, suurendades sellega pinnase kuiva mahumassi ehk tihedust ja vähendades jäävpoorsust. Optimaalsest niiskusesisaldusest suurema niiskusesisalduse juures hakkab suurenema vee poorirõhk ja vesi hakkab hoidma pinnase mineraalosakesi üksteisest eemal, mille tulemusena jällegi pinnase kuiv mahumass väheneb ja jäävpoorsus suureneb. [5] Seda illustreerib allolev joonis 1.5.



Joonis 1.5 Väike niiskusesisaldus, optimaalne niiskusesisaldus, suur niiskusesisaldus [5]

Niiskuse liigitus niiskussisalduse järgi on kujutatud järgnevates tabelites:

Tabel 1.2 Niiskuse liigitus [6]

Nimetus	Niiskus W
Väheniiske	$< 0,9W_0$
Normaalse niiskusega	$0,9W_0 - W_{lub}$
Kõrgenenud niiskusega	$W_{lub} - W_{max}$
Liigniiske	$> W_{max}$

- W_0 - optimaalne niiskus (veesisaldus) standardisel *Proctorteimil*.

- W_{max} - maksimaalne niiskus (veesisaldus) standardse *Proctorteimi* kohase

tihendusteguri $K_t=0,9$ saavutamisel

- W_{lub} – lubatav niiskus (veesisaldus) standardse *Proctorteimi* kohase nõutava tihendusteguri $K_t=>0,9-1,0$ saavutamisel

Tabel 1.3 Niiskus nõutava pinnase tihendusteguri saavutamiseks [6]

Pinnased	Niiskus nõutava pinnase tihendusteguri K_t saavutamisel			
	W_{lub}			W_{max}
	$K_t > 1,0$	$K_t = 1,0-0,98$	$K_t = 0,95$	$K_t = 0,90$
Mölline peenliiv, möll	1,30 W_o	1,35 W_o	1,60 W_o	1,60 W_o
Savine liiv	1,20 W_o	1,25 W_o	1,35 W_o	1,60 W_o
Savimöll	1,10 W_o	1,15 W_o	1,30 W_o	1,50 W_o
Savi, möllsavi	1,00 W_o	1,05 W_o	1,20 W_o	1,30 W_o

1.5 Probleemid seoses veega

Eeltoodust võib järeldada, et oluline on tagada mulde ja drenkihi vajalik niiskus ehitusajal, et võimaldada maksimaalsed materjali tihedused. See omakorda tagab konstruktsioonikihtide edasised väiksemad järeltihenemised ning tee pikema eluea. Eksploatsiooni käigus aga tuleb teekonstruktsioon hoida võimalikult kuivana, et vältida kandevõime kadusid ja külmakerkeid. Seda saab teha hoidudes külmaohtlike pinnaste kasutamisest ning kasutades kuivendussüsteeme, kas siis kraavide või drenaaži näol.

2 NIISKUSE JA KANDEVÖIME MÕÕTMINE EHITUSPROTSESSIS

Käesolevas peatükis on välja toodud niiskust, veesisaldust, ja kandevõime mõõtmist puudutavad Eestis avalikel teede muldkehadel ja drenikihi ehitusel kasutatavad juhendid ja määrused.

2.1 Tee ehitamise kvaliteedi nõuded

„Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ on majandus- ja taristuministri määrus 101, millega reguleeritakse avalikult kasutatava tee ehitamise kvaliteedi nõudeid. Tee ehitustööde kvaliteet peab teetööde ja nende vaheetappide vastuvõtmisel vastama vähemalt käesoleva määrusega sätestatud nõuetele. [7]

Järgnevalt on välja toodud niiskust käsitlevad nõuded: [7]

- Liivpinnasest drenikihi tihendustegur, mis on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe, peab olema vähemalt 0,98. Liivpinnasest drenikihi elastsusmoodul, mõõdetuna teel LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega, peab olema vähemalt 65 MPa. Mõne teise analoogse elastsusmooduli mõõteseadme kasutamisel peavad selle lugemid olema eelnevalt võrreldud LOADMAN-tüüpi seadmega ja mõõtetulemused korrutatud üleminekuteguriga.
- Segu koostise määramiseks võetakse tööde käigus tihendamata stabiliseeritud segust vähemalt üks proov iga 5000 m² stabiliseeritud pinna kohta, kuid mitte vähem kui üks proov päevas. Segu koostises kontrollitakse täitematerjalide terastikulist koostist ning sideaine ja niiskuse sisaldust.
- Stabiliseeritud kihi niiskusesisaldus enne katte paigaldamist või pindamist ei või olla suurem kui 2,5% segu massist;
- Kruusatee ehitamisel võib täitematerjali niiskus olla kuni 0,5% võrra väiksem laboris PROCTOR-meetodil määratud optimaalsest niiskusest.

Järgnevalt on välja toodud kandevõimet käsitlevad nõuded: [7]

- Liivpinnasest muldkeha tihedustegur peab vastama käesoleva määruse lisas 6 toodud nõuetele. Muudest pinnastest ehitatud muldkeha kihil kontrollitakse tihedust elastsusmooduli mõõtmise teel LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega. Mõne teise analoogse elastsusmooduli mõõteseadme kasutamisel

- peavad selle lugemid olema eelnevalt võrreldud LOADMAN-tüüpi seadmega ja mõõtetulemused korrutatud üleminekuteguriga.
- Elastsusmoodul, mõõdetuna LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega või samaväärse seadmega muldkeha pinnal, ei tohi olla väiksem projektis ettenähtust. Mõne teise analoogse elastsusmooduli mõõteseadme kasutamisel peavad selle lugemid olema eelnevalt võrreldud LOADMAN-tüüpi seadmega ja mõõtetulemused korrutatud üleminekuteguriga.
 - Liivpinnasest dreenikihi tihendustegur, mis on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe, peab olema vähemalt 0,98. Liivpinnasest dreenikihi elastsusmoodul, mõõdetuna teel LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega, peab olema vähemalt 65 MPa. Mõne teise analoogse elastsusmooduli mõõteseadme kasutamisel peavad selle lugemid olema eelnevalt võrreldud LOADMAN-tüüpi seadmega ja mõõtetulemused korrutatud üleminekuteguriga.
 - Muudest täitematerjalidest ehitatud dreenihil kontrollitakse tihedust elastsusmooduli mõõtmise teel LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega. Elastsusmoodul dreenikihi pinnal ei tohi olla väiksem projektis ettenähtust. Mõne teise analoogse elastsusmooduli mõõteseadme kasutamisel peavad selle lugemid olema eelnevalt võrreldud LOADMAN-tüüpi seadmega ja mõõtetulemused korrutatud üleminekuteguriga.

2.2 Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised

„Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised“ on Transpordiameti juhised, mida rakendatakse kõigil Transpordiamet teeprojektide projekteerimisel ja tööde teostamisel.

Järgnevalt on välja toodud niiskust käsitlevad nõuded: [6]

- Pinnaste tihendamine maksimaalse tiheduse saavutamiseks toimub pinnase optimaalse niiskuse (w_o) juures ($\pm 2\%$). Vähema niiskuse juures pinnast niisutatakse. Pinnaste puhul, mille niiskus on alla 0,9 standardse *Proctorteimi* kohast optimaalset niiskust ($W < 0,9W_o$), tuleb projektis ette näha erimeetmed nende tihendamiseks (niisutamine, tihendamine tavalisest õhemate kihtidena jms). Üleniiskunud pinnas ($> 3\%$) kuivatatakse või asendatakse teise pinnasega.
- Põhiliseks tihendamise kvaliteeti mõjutavaks teguriks tuleb lugeda pinnase niiskust. Korruga tihendatava pinnasekihi paksus sõltub pinnase niiskusest ja

tihendamiseks kasutatavatest masinatest. Väheniisket pinnast tuleb tihendada õhemate kihtide kaupa võrreldes optimaalse niiskusega pinnasega

- Tihendatav pinnas on liiga märg
Liiga niisked tihendatud pinnased on aldid nihkele ja tugevuse kaotusele. Tihendamiseks liiga märg pinnas tuleb:
 - kobestada;
 - kuivatada (õhutada);
 - määrata uuesti niiskusesisaldus;
 - uuesti tihendada, kui niiskusesisaldus on nõutud vahemikus;
 - määrata uuesti niiskusesisaldus ja tihedus.
- Tihendatav pinnas on liiga kuiv
Liiga kuivad pinnased ei saavuta tihendamisel nõutud tihendustegurit. Tihendamiseks liiga kuiv pinnas tuleb:
 - kobestada;
 - lisada vett;
 - segada korralikult;
 - määrata uuesti niiskusesisaldus;
 - uuesti tihendada, kui niiskusesisaldus on nõutud vahemikus;
 - määrata uuesti niiskusesisaldus ja tihedus.
- Kruus ja liiv, mis sisaldavad vähem kui 10% peenosist (st on hästi drenivad), on lihtsalt tihendatavad, eriti siis, kui on veega küllastunud. Kui trassi läheduses on veekogusid, siis on mittesidusaid pinnaseid kasulik niisutada üle optimaalse (kuni $1,2w_0$). Sellega võib tihendatava pinnasekihi paksust, võrreldes optimaalse niiskusega, suurendada 20-30% ja saavutada tiheduse, mis ületab maksimaalse standardse tiheduse.

2.3 Killustikust katendikihtide ehitamise juhised

„Killustikust katendikihtide ehitamise juhised“ on Transpordiameti juhised, mida rakendatakse kõigil Transpordiameti teeprojektide projekteerimisel ja tööde teostamisel.

Järgnevalt on välja toodud niiskust käsitlevad nõuded: [8]

- Aluste ehitamine on keelatud, kui alloleva konstruktsioonikihi materjali niiskusesisaldus on suurem EVS-EN 13286-2 modifitseeritud Proctorteimiga määratud optimaalsest niiskusesisaldusest enam kui +0,5% võrra.

2.4 Muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised

„Muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised“ on Transpordiameti juhised, mida rakendatakse kõigil Transpordiamet teeprojektide projekteerimisel ja tööde teostamisel.

Järgnevalt on välja toodud kandevõimet sisaldavad nõuded/juhised: [9]

- Muldkeha ja drenkihi tihedust kontrollitakse LOADMAN-või INSPECTOR-tüüpi seadmega elastsusmoodulite suhte mõõtmise teel. Katendiarvutustes kasutatud elastsusmoodulite määramiseks ei sobi LOADMAN-või INSPECTOR-tüüpi seade ja sellega ei mõõdetata ei aluspinnase, mulde ega drenkihi pinnal vastavat elastsusmoodulit. Katendiarvutuses ettenähtud vastava kihi kandevõimet saab kontrollida plaatkoormuskatsega DIN 18134 ja see ei tohi olla väiksem katendiarvutuse projektis ettenähtud vastava kihi kandevõime nõutavast väärtusest.

2.5 Mõtteid seoses normide ja juhenditega

Käesoleva magistr töö autori kogemused on sellised, et objektidel materjali niiskusele ülemäärane palju rõhku ei pöörata. Autori kogemuses ei ole kordagi objektile niiskuse määramist toimunud. Liivakihte tihendatakse esmalt loodusliku niiskuse juures, kui tiheduskontroll ei anna nõutud tulemusi, tehakse kontroll tavaliselt sellisel juhul uuesti pärast killustikaluse ehitust. Üheks probleemiks on ka see, et liiva täiendav kastmine on raskendatud, kuna drenkihi peal mehhanismid, millel on veega kastmise võimekus, ei pruugi liikuda. Seepärast ka kasutatakse meetodit, et ehitatakse drenkihile killustikaluse peale ning pärast killustikaluse tihendamist tehakse prooviaugud killustikalusesse ja mõõdetakse seejärel drenkihi tihedus.

Erinevate juhendite vahel on lahkkelid. Kui Tee ehitamise kvaliteedi nõuded § 11 lõige 3 ütleb, et liivast drenkihi elastsusmoodul, mõõdetuna teel LOADMAN- tüüpi või INSPECTOR- tüüpi seadmega peab olema vähemalt 65 MPa [7], siis Muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised ütleb, et katendiarvutustes kasutatud elastsusmoodulite määramiseks ei sobi LOADMAN-või INSPECTOR-tüüpi

seade ja sellega ei mõõdeta ei aluspinnase, mulde ega drenkihi pinnal vastavat elastusmoodulit ning kasutada tuleks plaatkoormusseadet. [9] Eestis on käesolevaks hetkeks tehtud juba piisavalt võrdluskatseid LWD seadme ja plaatkoormuskatse vahel ning tulemustest saab järeldada, et ajamahuka plaatkoormuskatse saab asendada oluliselt kiirema LWD kergseadmega mõõtmisega kasutades üleminekutegureid. Sellise muudatuse on Tallinna linn „Sillutiskivi, asfalt- ja tsementbetooniga teede ja tänavate tüüpkonstruktsioonide projekteerimisele, rajamisele ja remondile esitatavad nõuded“ dokumenti sisse kirjutanud ning Tallinna linna teedehitusobjektidel aktsepteeritakse plaatkoormuskatsele alternatiivina mõõtmist LWD seadmega. [10] Käesoleva töö autori hinnangul võiks samasugust alternatiivi kasutada ka teiste juhendite puhul.

3 VÄLISMAISED UURIMUSTÖÖD

Käesolev peatükk tutvustab lühidalt mitmeid Ameerika Ühendriikides läbi viidud teadustöid, mis on andnud ka käesoleva töö ideed.

2015. aastal kaitses Ameerika Ühendriikides doktorikraadi Sadaf Khosravifar oma tööga „Large-Scale Controlled-Condition Experiment to Evaluate Light Weight Deflectometers for Modulus Determination and Compaction Quality Assurance of Unbound Pavement Materials.“ Lisaks osales ta koos Zahra Afsharikiaga 2017 Maryland DoT tellimusel uurimustöös „Standardizing LightWeight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance“, mis on tugevalt seotud tema varasema doktoritööga, mille peamine eesmärk oli välja töötada ja katsetada Proctor vormi, erinevate LWD seadmete ja Ohaus niiskusemõõtja kasutamisega välitingimustes materjali elastsusmooduli nõuete korrigeerimiseks vastavalt materjali tegelikule niiskusele. [11]

2019. aastal koostas Zahra Afsharikia analoogse töö 2017. aasta uuringule (jätku-uuring), milles teostati täiendavaid katseid ning koostati spetsifikatsioon antud katsete lisamiseks AASTHO formaati. Uuriti kandevõime ja tihendustegurite vahelist seost, eesmärgiks võtta kasutusele LWD seade ka tihenduskontrolli seadmena. [12]

Katsed viidi läbi nii välitingimustes objektidel, kui sisetingimustes laboris. Katsete teostamisel kasutati veesisalduse mõõtmiseks erinevaid vahendeid. Põhiliseks seadmeiks oli Ohaus MB45, mida võrreldi Troxler NDG, Decagon GS1 sensori ja standardse ahjukatsega. Omavahel võrreldi ka erinevate niiskuse mõõtmise seadmete vahelisi korrelatsioone. [13] Lähemalt on nendest seadmetest kirjutatud käesoleva töö peatükis 4. „Erinevad niiskuse määramise vahendid“.

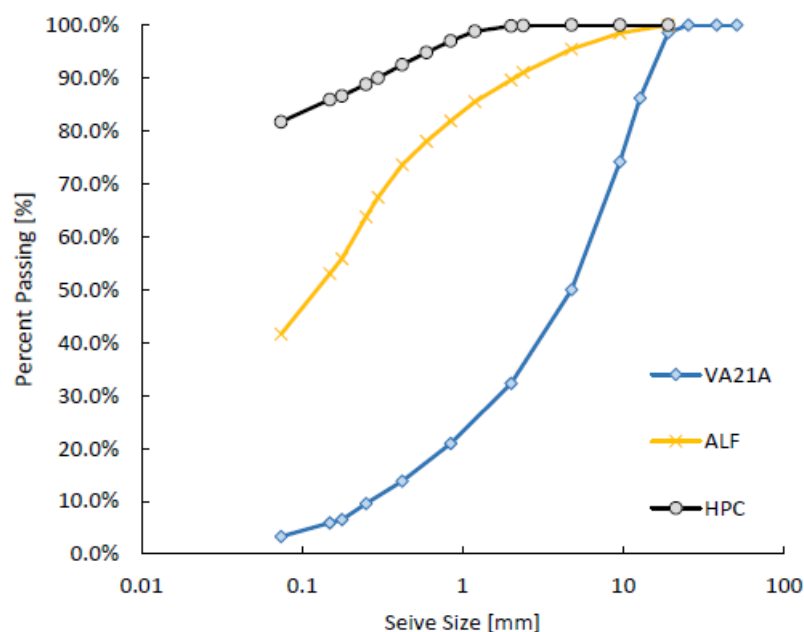
Katsetused viidi läbi paralleelselt kolme erineva LWD seadmega. Taanlaste Dynatest 3031 LWD, mis on ka käesoleva töö mõõteseadmeks, kui ka sakslaste Zorn ZGF 3.0 ning ameeriklaste Olson 01 seadmetega. [13]

S. Khosravifari 2015. a töös kasutati kolme erinevat materjali.

- VA21a pinnas – killustikune täitematerjal
- ALF pinnas – mittekoheesiivne liivpinnas
- HPC pinnas – koheesiivne kõrge plastsusega savipinnas

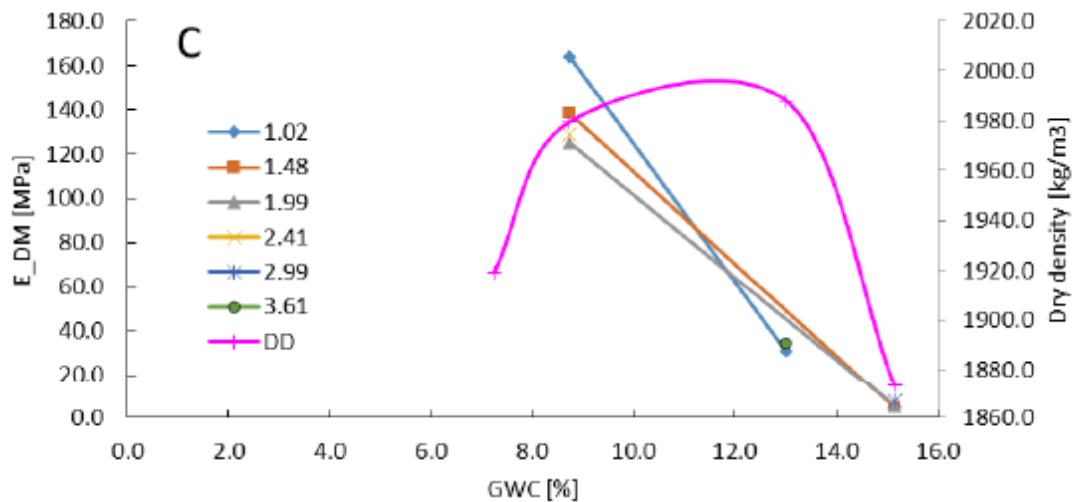
Tabel 3.1 S.Khosravifari töös kasutatud materjalid [13]

Soil Type	AASHTO Procedure	Method	Compaction energy	MDD	OMC	Specific Gravity ⁽¹⁾
[-]	[-]	[-]	[-]	kg/m ³ (pcf)	[%]	[-]
VA21a	T-99	D	Standard	2307.7 (144.0)	5.0	2.77
VA21a	T-180	D	Modified	2435.9 (152.0)	4.5	
ALF	T-99	C	Standard	1923.1 (120.0)	11.5	2.71
ALF	-	C	Semi Modified ⁽²⁾	2003.2 (125.0)	10.5	
ALF	T-180	C	Modified	2083.3 (130.0)	9.5	
HPC	T-99	A	Standard	1522.4 (95.0)	24.0	2.66



Joonis 3.1 S.Khosravifari töös kasutatud materjalide sõelkõverad [13]

Nii materjali liigituse, kui ka sõelkõvera järgi on käesoleva töö katsematerjalide kõige lähedasem ALF liivpinna. Laboris mõõdeti LWD'ga standard Proctor-seadmega tihendatud materjalid otse proctorvormis erinevate veesisalduste juures. Üldine tähelepanek oli, et LWD mõõdetav moodul väheneb tõstes veesisaldust. Moodul väheneb märgatavalt kui ületada optimaalne veesisaldus.



Joonis 3.2 ALF liivpinnase katsetamine Proctor-vormis, erinevate pingete ja niiskustega [13]

LWD seadmega samas programmis üks-ühele looduses ja vormis mõõdetud elastsusmooduleid võrrelda ei saa. Välikatsetel mõõdetud elastsusmooduli arvutusmetoodika baseerub Boussinesq valemil (3.1): [13]

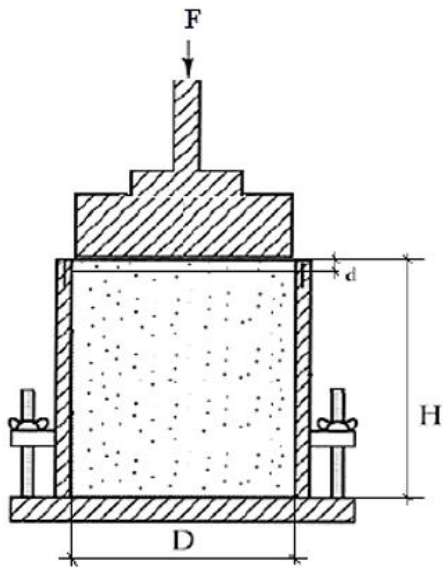
$$E_0 = \frac{f * (1 - v^2) * \sigma_0 * a}{d_0} \quad (3.1)$$

- kus: E_0 -mõõdetav elastsusmoodul, MPa;
 f -pingejaotus konstant (2 või $n/2$);
 v -Poisson'i tegur (vaikimis 0.35);
 a -talla raadius, mm;
 d_0 -pinnase deformatsioon, μm .

Elastusmooduli mõõtmisel Proctor-vormis tuleb arvestada ka vormi ja selle seintega. Seetõttu leidis S. Khosravifar oma 2015. a töös valemi (3.2), mida kasutada sellisel puhul: [13]

$$E = \left(1 - \frac{2v^2}{1-v}\right) \frac{4H}{\pi D^2} k \quad (3.2)$$

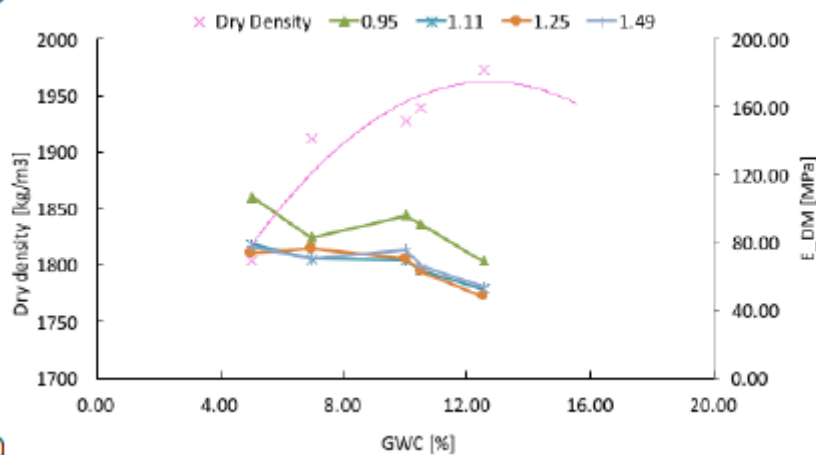
- kus: E -elastsusmoodul, MPa;
 v -Poisson'i tegur (vaikimis 0.35);
 H -proctor vormi kõrgus, mm;
 D -vormi läbimõõt, mm;
 k -pinnase jäikus= F/δ mille arvutab LWD.



Joonis 3.3 Proctor-vorm LWD katsetusel [13]

Dynatest LWD seadme puhul annab seadistada aparaat selliselt, et sätetes määratakse ära, et mõõtmine toimub Proctor-vormil ja LWD arvutab kohe eeltoodud valemiga elastusmooduli. Need täiendused lisati Dynatesti poolt viidatud teadustöö baasil.

S. Khosravifari töös teostati esmakordselt mõõtmisi Proctor-vormis, seega on ka katsematerjalide ja erinevate veesisalduste hulk väiksem võrreldes hilisemate Z. Afsharikia 2017. ja 2019. a töödega. Üheks materjaliks, mida Z. Afsharikia töös kasutati, oli New York'i lähedalt ehitusobjekti muldkehast pärit liivpinna. Antud materjali laboris Proctor-vormis mõõdetud kandevõimeid erinevate niiskuse juures kajastab allolev joonis 3.4.



3)

Joonis 3.4 Proctor-vormis mõõtmised erinevate niiskusisalduste ja pingetega [12]

Proctor vormis mõõdetud elastsusmooduli, veesisalduste ja rakendatud surve kaudu on leitavad kahe muutujaga ruutregressioonanalüüsi kaudu regressiooni koefitsendid allolevast valemist (3.3): [11]

$$E = a_0 + a_1 * w_{vorm} + a_2 * w_{vorm}^2 + a_3 * P_{vorm} + a_4 * P_{vorm}^2 \quad (3.3)$$

kus: E -mõõdetud elastsusmoodul;
 w_{vorm} -veesisaldus proctorvormis;
 P_{vorm} -rakendatud pinge, leitav valemiga $P_{vorm} = \frac{F}{\pi(\frac{D}{2})^2}$;
 $a_0...a_4$ -regressiooni koefitsendid.

Seejärel leitakse elastsusmooduli sihtväärtus, vastavalt välikatsetel mõõdetud materjali veesisaldusele, rakendatavale survele ja valemi 3.3 kaudu leitud regressioonikoefitsentidele, alloleva valemiga(3.4): [11]

$$E_{siht} = a_0 + a_1 * w_{väli} + a_2 * w_{väli}^2 + a_3 * P_{väli} + a_4 * P_{väli}^2 \quad (3.4)$$

kus: E_{siht} -arvutuslik elastsusmooduli sihtväärtus;
 $w_{väli}$ -veesisaldus välikatsetel;
 $P_{väli}$ -rakendatud pinge, leitav valemiga $P_{väli} = \frac{F}{\pi(\frac{D}{2})^2}$;
 $a_0...a_4$ -regressiooni koefitsendid, leitud valemiga 3.3.

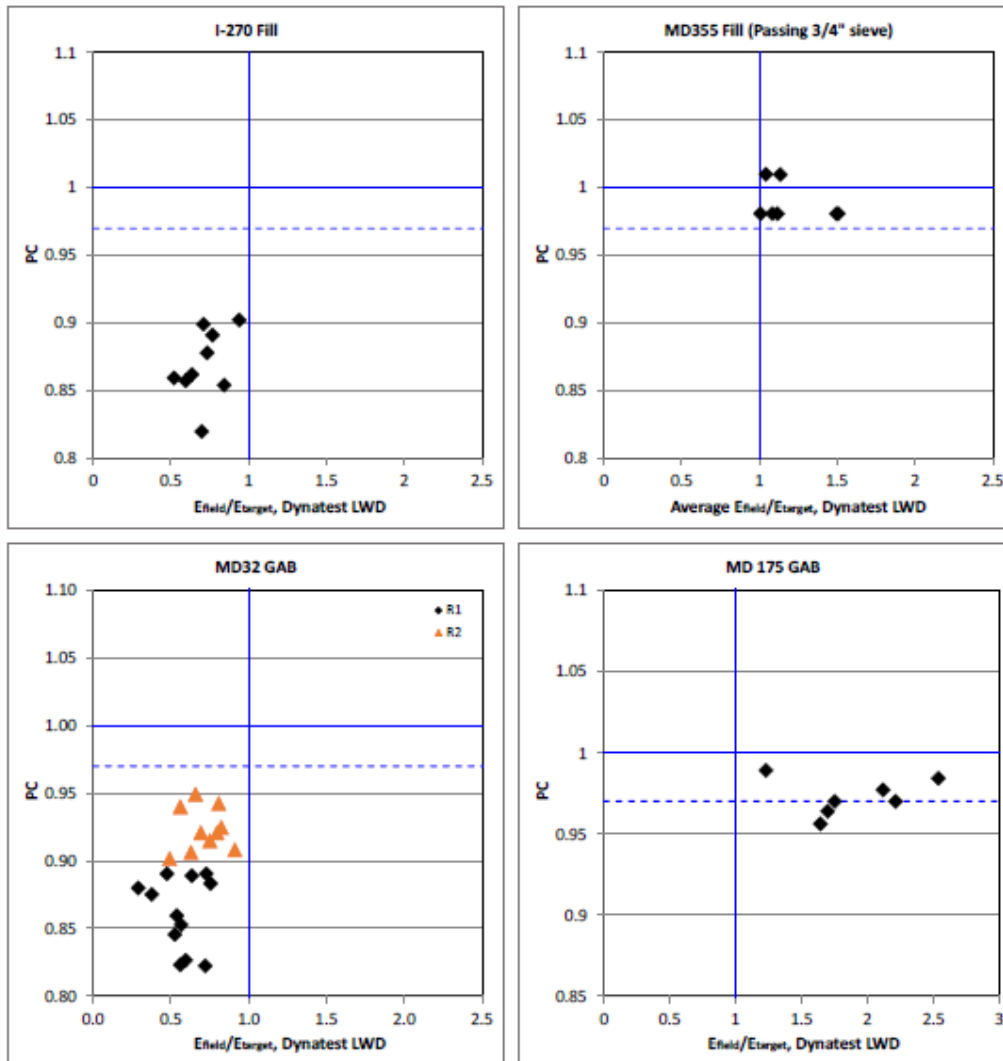
Kui LWD pinge on vormis ja väljas mõõtes sama, siis ei ole vaja kasutada valemeid 3.3 ja 3.4 ning LWD sihtväärtus leitakse vastavalt väljas mõõdetud veesisaldusele.

Objektile mõõdetud E_{field} ja valemiga 3.4 leitud E_{target} kaudu on leitav objektile materjali tihendustegur alloleva valemiga 3.5: [12]

$$PC = E_{field}/E_{target} \quad (3.5)$$

kus PC -tihendustegur
 E_{field} -objektile mõõdetud elastsusmoodul
 E_{target} -labori tingimustes leitud elastsusmooduli sihtväärtus, valem 3.4

Alljärgnevalt mõningad tehtud võrdluskatsed objektile NDG seadmega mõõdetud tihendustegurite ja LWD seadmega valemite 3.5 kasutatud meetodikaga



Joonis 3.5 Keskmise tihendustegur mõõdetuna NDG seadmega võrrelduna LWD seadmega tihenduskontroll [12]

USA uurimustööde puhul võeti kriteeriumiks tihendustegur 0,97, mida nõuab ka MDOT. Joonisel 3.4 tähistab tihendustegurit 0,97 sinine katkendjoon. Nagu ka joonisel 3.4 näha, siis tihendustegur ja $E_{\text{field}}/E_{\text{target}}$ ei ole numbriliselt päris samad. Kuid oluliseks peeti seda, et kui NDG seadmega tihendustegur ei olnud normide kohane, siis seda ei olnud ka LWD meetodikaga leitud tihendustegur. Ning kui NDG seadmega mõõdetuna oli tihendustegur üle 0,97, oli seda enamjaolt ka LWD põhine tihendustegur. Kuna AASHTO juhendid näevad ette, et materjali veesisaldus peab olema +/- 2% optimaalsest, siis ka allolevas tabelis 3.2 on välja toodud näiteid materjalide elastsusmoodulite sihtväärtustest +/- 2% optimaalsest veesisaldusest võrrelduna optimaalse niiskusega.

Tabel 3.2 Näited elastusmoodulite sihtväärtustest, võrreldes optimaalse veesisadusega [11]

#	Aggregate Source	Tested projects	OMC	Target E @OMC	Target E @OMC-2%	Target E @OMC+2%
	[-]	[-]	[%]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
1	Martin Marietta Materials, Pinesburg	I-81	4.4	125	115	70
2	Martin Marietta Materials, Texas	I-695	4.6	75	95	-
3	Aggregate Industries, Bladensburg	MD5 ramp	4.3	100	175	75
4	Aggregate Industries, Rockville	N/A	4.9	60	90	25
5	Savage Stone, Laurel	MD175	4.4	110	65	25
6	Vulcan Materials Company, Fredrick	MD32	4.5	120	100	50

4 ERINEVAD NIISKUSE MÄÄRAMISE SEADMED

Järgnevates alapunktides on välja toodud ja kirjeldatud erinevad seadmed, millega on võimalik teedeehituslike materjalide niiskussisaldust määrata nii laborites kui ka välitingimustes objektil.

24h ahjukatse

Laboratooriumites peamiselt kasutatav standardiseeritud 24h ahjukatse. Ahjukatse puhul kuivatatakse 105 kraadi juures materjal/pinnas püsiva kaaluni, reeglina kestab protseduur 24 tundi. Veesisaldus väljendub pinnasest eraldunud vee massi ja kuiva pinnase massi suhtarvuna. [14]

Vajalikud vahendid: kuivatuskapp, kaal, kuumakindel nõu

- Anum kaalutakse tühjalt;
- Anumasse asetatakse uuritav materjal/pinnas ning kaalutakse;
- Anum asetatakse kuivatuskappi temperatuuri 105 +/- 5 juurde 24 tunniks;
- Anum koos kuiva materjaliga kaalutakse.

Materjali veesisalduse $w\%$ leiab järgneva valemiga:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \quad (4.1)$$

kus m - anuma mass, g,

m_1 - anuma ja märja materjali mass, g,

m_2 - anuma ja kuiva materjali mass, g.

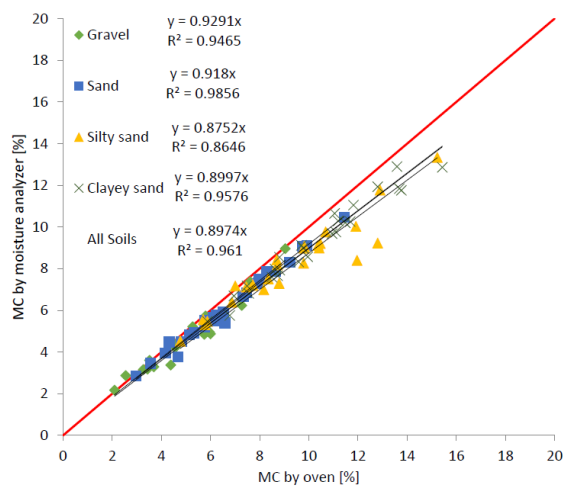
Ohaus MB45

Veesisalduse mõõtja Ohaus MB45 võimaldab määrata peaaegu kõikide materjalide veesisalduse. Seade töötab termogravimeetrilisel meetodil. Uuritav materjal asetatakse seadmesse, seejärel seade leiab proovimaterjali algkaalu. Seejärel toimub materjali kiire kuumutamine halogeenlambiga, mis kuivatab proovimaterjali, katse kestel toimub pidevalt materjali kaalumine. Kuni materjali kaalukaotus on minimaalne, siis katse lõpeb ja seade kuvab kaalukaost tuletatud materjali veesisalduse. Katse kestus sõltub proovimaterjali kaalust ja veesisaldusest. Tegu on sisuliselt ahjukatsega, põhimõte on vee ära aurustamisel ja sellest tulenevalt veesisalduse arvutamises. Katse toimub oluliselt kiiremini ja väiksemate materjalikoguste juures. Ohaus MB45 seadmega on maksimaalne proovi suurus 45 grammi ning olenevalt materjalis on katse aeg 10 kuni 45 minutit. [15] Analoogse seadmega PCE-MA202 teostatakse ka käesolevas töös veesisalduse mõõtmisi – PCE seadmega saab katsetada kuni 200 g proovi.



Joonis 4.1 Ohaus MB45 [13]

S. Khosravifar teostas enda uurimustöös võrdluskatsed Ohaus MB45 ja ahjukatse vahel. Allolev graafik iseloomustab leitud seoseid. Korrelatsioon ($R=0,8646$ kuni $0,9856$) näitab tugevat seost kahe erineva meetodi vahel. [13]



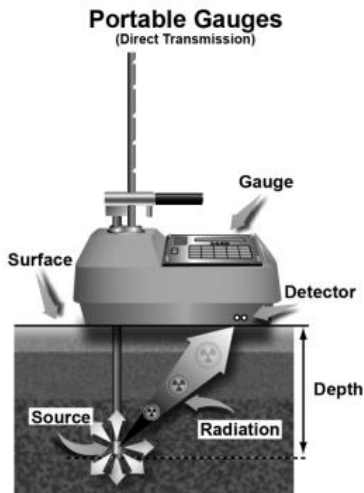
Joonis 4.2 Ohaus MB45 ja 24h ahjukatse võrdlus [13]

Radioaktiivse isotoobi seade, Troxler 3440

Radioaktiivse isotoobi seade on multifunktsionaalne seade, mis väikeses koguses radioaktiivseid elemente sisaldades, on võimeline mõõtma nii materjali veesisaldust, kui ka materjali tihedust.

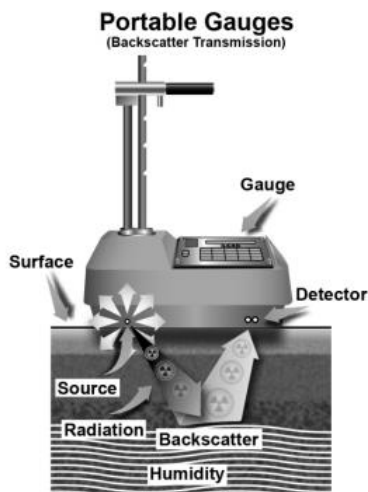
Tiheduse mõõtmise puhul on seadme varras surutud ca 15 cm sügavusele uuritava materjali sisse. Seadme varda otsas on väike kogus radioaktiivset tseesium-137 elementi, mis kiirgab gammakiiri. Seadme all on detektor, mis mõõdab radioaktiivsust

ning seeläbi leiab materjali tiheduse. Mida vähem gammakiiri jõuab detektorini, seda tihedam on materjal. [16]



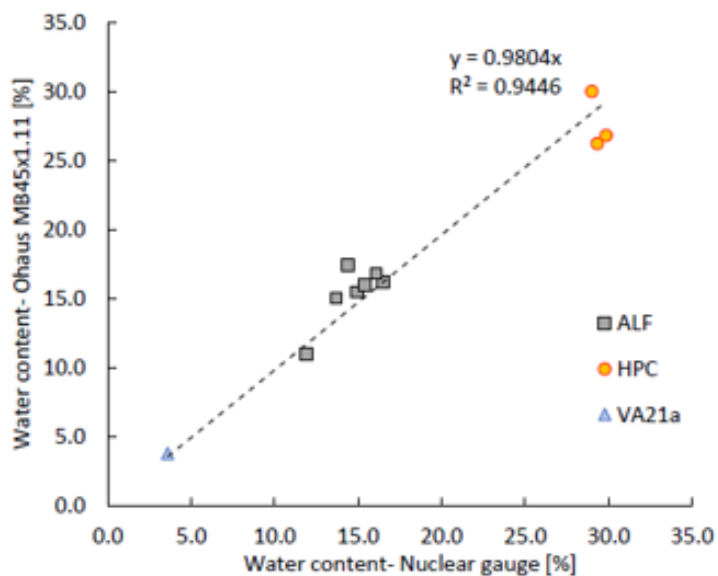
Joonis 4.3 Troxler 3440 tiheduse mõõtmine [17]

Veesisalduse määramiseks ei ole tarvis varrast materjali sisse suruda. Seadme varras on lukustatud esimesse asendisse allpool SAFE asendit. Seadme sees on ameriitsium 241: berülliumi allikas, mis kiirgab neutroneid, mis mõõdavad vesinikusisaldust materjalis, järelikult veesisaldust. Kokkupõrkel vesinikuga neutronid aeglustuvad. Teised materjalid ei aeglusta neutroneid. Seade sisaldab heelium-3 neutrondetektorit, mis on võimeline eristama termiliseeritud (aeglasemaid) neutroneid ja „kiireid“ neutroneid, seeläbi leitakse vesinikusisaldus ja üldine materjali veesisaldus. [16]



Joonis 4.4 Troxler 3440 niiskuse mõõtmine [17]

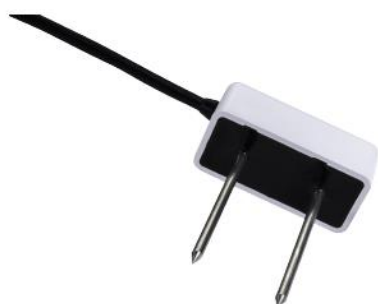
S. Khosravifar teostas enda uurimustöös võrdluskatsed Troxler 3440 ja Ohaus MB45 seadmete vahel. Allolev graafik iseloomustab leitud seoseid. Korrelatsioon ($R=0,9446$) näitab tugevat seost kahe erineva seadme vahel. [13]



Joonis 4.5 Troxler 3440 ja Ohaus MB45 võrdlus [13]

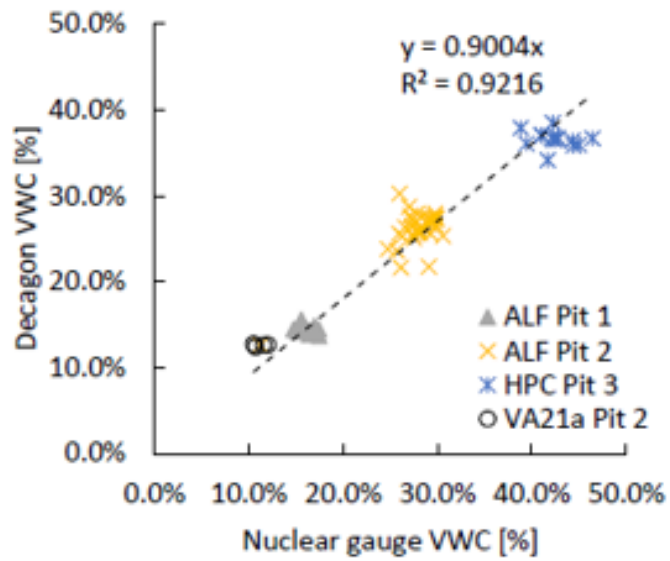
Decagon GS1 koos ProCheck andmekogujaga

Decagon GS1 puhul on tegu veesisalduse määramiseks mõeldud sensoriga. Antud seadmega on võimalik mõõta materjali veesisaldust vahemikus 0 kuni 57%. Seade kasutab elektromagnetilist välja, mõõtmaks dielektrilist läbilaskvust ümbritsevas keskkonnas. Sensor kasutab 70 MHz võnkelaoneid. Seadmele on vaja juurde lisaseadet andmete lugemiseks. Milleks võib olla näiteks ProCheck seade. [18]



Joonis 4.6 Decagon GS1 sensor [18]

S. Khosravifar teostas enda uurimustöös võrdluskatsed Decagon GS1 ja NDG Troxler 3440 seadmete vahel. Allolev graafik iseloomustab leitud seoseid. Korrelatsioon ($R=0,9216$) näitab tugevat seost kahe erineva seadme vahel. [13]



Joonis 4.7 Decagon GS1 ja Troxler 3440 võrdlus [13]

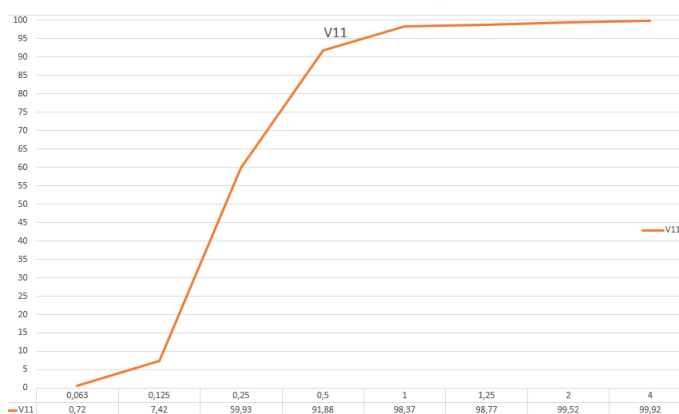
Dielektrilisel läbitavusel tuginevate seadmete puhul tuleb seadmed kalibreerida igale erinevale pinnaseliigile. See piirab seadme kasutust universaalses niiskuse mõõtmise funktsioonis.

5 KATSETES KASUTATAVAD MATERJALID

Käesolevas peatükis tutvustatakse lühidalt antud töös kasutatud teedeehituslikke materjale.

Peenliiv V11

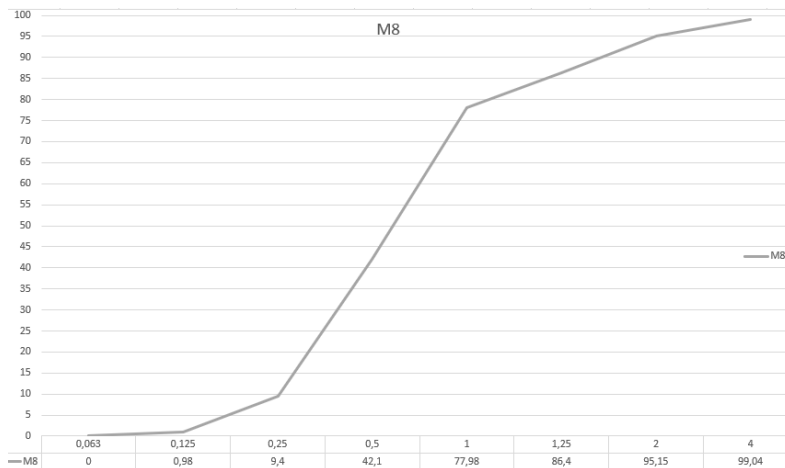
Peenliiv V11 on pärit AS Silikaadile kuuluvast Männiku liivakarjäärist. V11 tähise kasutamine tuleneb tootjapoolsest tähistamisest, seega käesoleva töö autor jätab tootjapoolse tähistamise ka antud töösse sisse. Järgnevalt on välja toodud tootja esitatud materjali sõelkõver. Autori leitud liiva terastikuline koostis ja muud arvutuslikud omadused tuuakse välja peatükis 7.



Joonis 5.1 V11 liiva sõelkõver

Täiteliiv M8

Täiteliiv M8 on pärit AS Silikaadile kuuluvast Männiku liivakarjäärist. M8 tähise kasutamine tuleneb tootjapoolsest tähistamisest, seega käesoleva töö autor jätab tootjapoolse tähistamise ka antud töösse sisse. Järgnevalt on välja toodud tootja esitatud materjali sõelkõver. Autori leitud liiva terastikuline koostis ja muud arvutuslikud omadused tuuakse välja peatükis 7.



Joonis 5.2 M8 liiva sõelkõver

Kristiine linnaosast pärit looduslik liivpinnas

Lisaks karjäärimaterjalidele, otsustati kasutada ka Kristiine linnaosast Vuti tänavalt umbes meetri sügavuselt kaevatud looduslikku liivpinnast, mis jääb antud piirkonnas allapoole pinnavee taset. Esmasel hinnangul pidas töö autor antud pinnast pigem suure peenosise sisaldusega materjaliks, kuid tegelikult seda see ei olnud. Antud pinnase terastikuline koostis ja muud arvutuslikud omadused tuuakse välja peatükis 7.

Paekivikillustik fr 4/32

Tallinna Tehnikakõrgkooli katsestendil kasutati Paekivitoodete Tehas OÜ'st pärit paekivikillustikku fraktsiooniga 4/32.

6 KATSETES KASUTATAVAD SEADMED

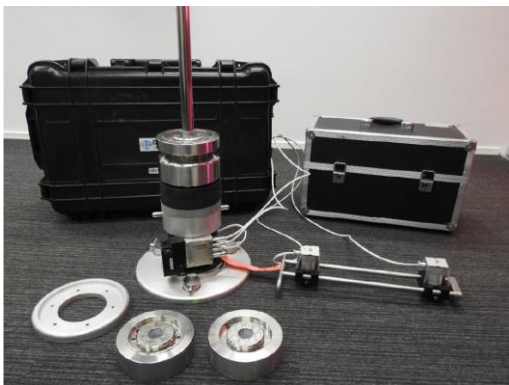
Järgnevates alapunktides on välja toodud käesoleva töö katsete läbiviimisel ja mõõtmisel kasutatavate seadmete kirjeldused ja põhilised näitajad.

Dynatest LWD 3031/3032

Dynatest on 1976. aastal asutatud Taani ettevõtte, mis toodab erinevaid katendi parameetrite ja omaduste mõõtmise seadmeid. Järgnevalt nimekiri põhilistest Dynatesti katendi struktuurilise analüüsi seadmetest:

- Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD)
- Falling Weight Deflectometer (FWD)
- Heavy Weight Deflectometer (HWD)
- Light Weight Deflectometer (LWD)

Käesolevas töös käsitletakse ja kasutatakse LWD'd, täpsemalt Dynatest LWD seadet. Eestis on hetkel teadaolevalt 3 Dynatest LWD seadet, kaks neist kuuluvad T-Konsult OÜ'le ning neid kasutatakse ka objektidel kandevõimete mõõtmiseks. Kolmanda seadmega objektidel ametlikke mõõtmisi ei tehta, seda kasutatakse teadustööde puhul. Dynatest LWD on ilma korpuseta kergekaaluline deflektomeeter, mis võimaldab mõõta erinevate pinnaste, konstruktsioonide ja materjalide deformatsioonimoodulit. Seade koosneb põhiseadmest ja lisavarustusest. Komplekti kuuluvad LWD seade koos erinevate puhvritega ja raskustega, raskused on üks 10-kilone ja kaks 5-kilost. Seadme juurde kuulub ka kummipadi, mis käib talle alla, kuid selle kasutamine pehmel alusmaterjalil nagu pinnas ja liivad pole vajalik, kasutatakse üldjuhul kõvema materjali puhul nagu näiteks asfalt ja killustik. Lisaks on olemas ka väike käru, mille peal saab seadet objektil transportida. Komplekti kuuluvad ka lisaandurid, mis võimaldavad mõõta vajumilehtrit 300 mm ja 600 mm kaugusel tsentrist. [19]



Joonis 6.1 Dynatest LWD 3032 seadmete komplekt [20]

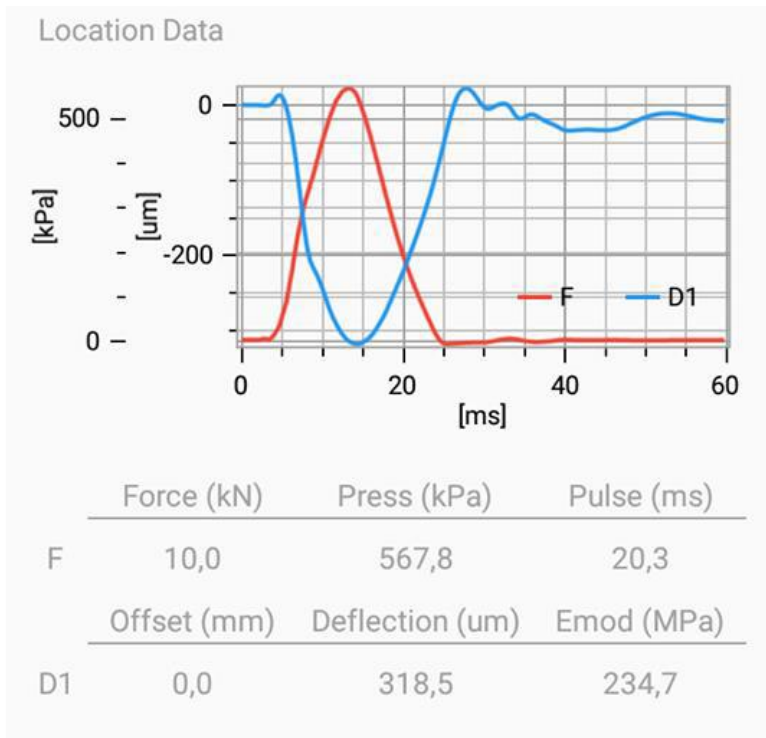
Dynatest LWD teeb omapäraseks see, et kui teistel LWD'del on üldjuhul fikseeritud raskus ja selle langemise kõrgus, siis antud aparaadil on võimalus muuta raskuse suurust 10 kilost kuni 20 kiloni ja raskuse langemise kõrgust. Lisaks on talle diameetri valik 100 mm, 150 mm, 200 mm ja 300 mm. Kõik eelpool toodu annab võimaluse selleks, et mõõtmiseks kasutatavat pinget saab vabalt muuta vahemikus 0 kuni 1500 kPa. Kui teiste Eestis laialt levinud seadmetega nagu näiteks Inspector on seni olnud võimalik mõõta ainult 2 erineva pingega juures, 600 kPa ja 1300 kPa, mis ei ole kumbki tegelik katendikonstruktsioonile mõjuv pinget töörežiimis, siis Dynatest LWD võimaldab hinnata materjalide elastsusmoodulit ka reaalse töörežiimi pingete juures. Inspectorile on lisatud ka 300 mm tald, kuid ka sellega jääb pinget seadme all liiga kõrgeks. Tootja (Dynatest) poolt on ette antud soovitatavad pingevahemikud olenevalt materjali paiknemisest konstruktsioonis. [19]

- Aluspinnased 10 – 100 kPa
- Muldkeha ülakiht, liivast drenikiht 100 – 200 kPa
- Sidumata alus 200 – 300 kPa

Katse alustamiseks tõstetakse käsitsi raskus käepideme külge, mille alumises otsas paiknev magnet hoiab raskuse enda küljes, lisaks on veel täiendav lukusti. Katse alustades lastakse ühe sõrmega lukusti vabaks ja teise sõrmega vajutatakse päästikut, mis vabastab raskuse magneti küljest ning raskus kukub puhvrite peale, seejärel tõstetakse raskus uuesti käepideme külge ning korratakse katset. Kokku ühe punkti elastsusmooduli mõõtmisel tehakse üks seeria, mis sisaldab 6 katset. 3 esimest on materjali eeltihendamiseks ning kolme viimase katse elastsusmooduli tulemuste põhjal leitakse keskmine, mis ongi antud punkti elastsusmoodul. On erandeid, kus tuleb teha rohkem kui 6 katset kokku, seda juhul, kui viimase katse deformatsioon erineb eelmise katse deformatsioonist rohkem kui 10 %. Katset tuleb jätkata, kuni deformatsiooni erinevus on väiksem kui 10 %.

Seadmel küljes ühtegi ekraani ei ole, mõõtmistulemuste saamiseks on vaja omada nutitelefoni, milles peab olema Dynatest LWD rakendus, mis on vabalt alla laetav. Seade ühendub telefoniga bluetooth'i kaudu. Pärast igat raskuse kukkumist ehk katset kuvatakse Dynatest LWD rakenduses antud katse järgmised parameetrid [20]:

- Koormus, kN
- Pinget, kPa
- Impulsi kestus, ms
- Deformatsioon, μm
- Nihe, μm
- Elastsusmoodul, MPa
- Koormuse mõjumise graafik



Joonis 6.2 Väljavõte Dynatest LWD mobiilirakendusest [20]

Andmete töötlemiseks on vaja arvutis programmi LWDMod, mis väljastab edasiseks andmetöötlemiseks eelpool välja toodud andmed ja graafikud. Tarkvara arvutusmetoodika põhineb Boussinesq valemil: [13]

$$E_0 = \frac{f * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{d_0} \quad (6.1)$$

Kus: E_0 -möödetav elastsusmoodul, MPa,
 f -pinge jaotus konstant (2 või $\pi/2$),
 ν -Poisson'i tegur (arvestatakse 0,35),
 σ_0 -pinge seadme talla all, kPa,
 a -talla raadius, mm,
 d_0 -Pinnase deformatsioon, μm .

Antud seade on käesolevas töös peamine kandevõime mõõtmise vahend. Dynatest LWD'ga on Eestis varasemalt teostatud mitmeid magistritöid. Riho Eichfussi magistritöös on tõestatud killustikaluse näitel, et möödetav kandevõime väärtus sõltub suuresti mõõtmisel rakendatud pingest. Kui eesmärgiks on võrrelda projekteerija arvutustulemusi ehitusprotsessi käigus, et veenduda konstruktsiooni projektikohases toimivuses, tuleb erinevatel kihtidel kandevõime mõõtmisel kasutada pingerežiimi, mis on lähedane samas kihis tööolukorras esinevale. Eestis laialt kasutataval Inspector

seadmel on pingerežiim valitav vaid erineva koormustalla diameetri kaudu. Inspector on konstrueeritud Loadman-seadme eeskujul, mõlemal seadmel on koormuseks fikseeritud kõrguselt langev raskus 10 kg ning seega võimalik režiimi valik väga piiratud. Saksa seadmetel (Zorn, HMP) kasutatakse reeglina 100 kPa pingerežiimi, Taani seadmetel (Dynatest, Prima, nende aluseks olnud Keros, aga ka Saksa seadmel Terratest 9000 ja Tšiili seadmel 3ipe) on valikuvõimalused oluliselt suuremad – lisaks erinevate koormustaldade valikule (100, 150, 200, 300 mm) ka langeva raskuse valik (5...20 kg) ja langemiskõrguse valikule on võimalik kasutada ka kahte täiendavat andurit mis võimaldavad analoogselt FWD seadmega hinnata vajumiskausi parameetreid. [20]

Rait Kopti magistritöös selgus, et kergseadme mõjusügavus on ca 60 cm, kui mõõdetav konstruktsioon on paksem, ei muutu selle peal kergseadmega mõõdetav kandevõime enam olulisel määral. Samas tuleneb siit, et kui mitmekihilises konstruktsioonis kandevõimet mõõta, tuleb arvestada neid kihte, mis jäävad mõõteseadme tööulatusse. [21] Rasmus Renteri magistritöö raames uuriti killustiku ja liiva segude elastsusmoodulit erineva segusuhte korral. Katsed teostati analoogselt käesolevale tööle Dynatest LWD seadmega otse Proctor-vormis. [22]

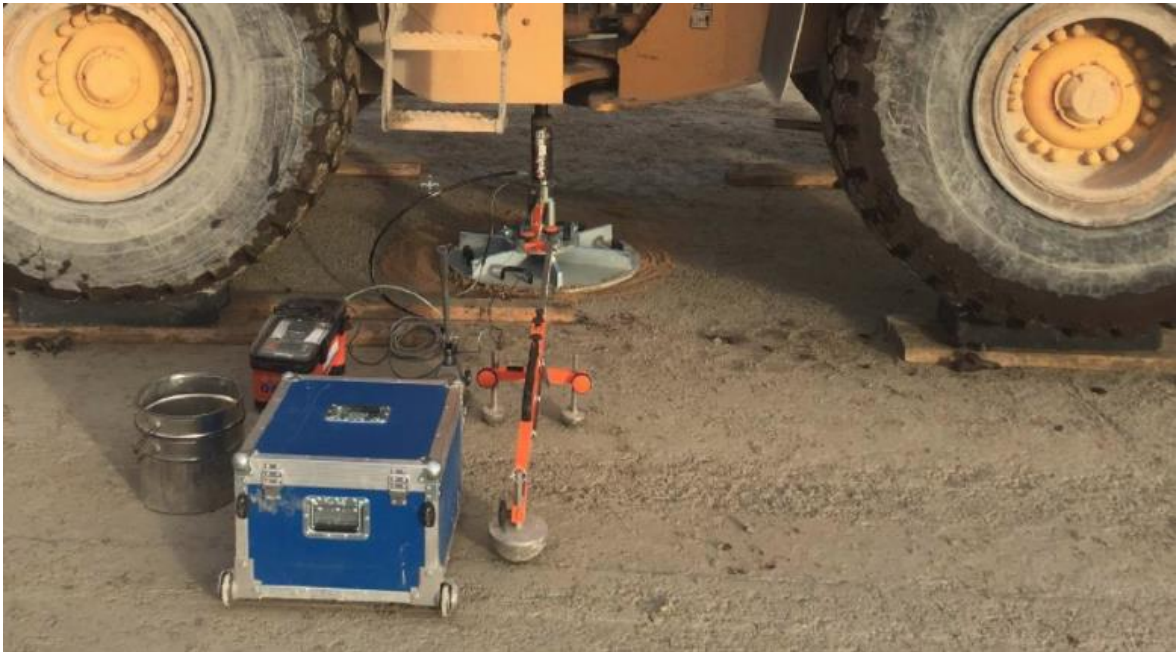
Käesoleva töö TTK katsed teostati Dynatest LWD 3031 seadmega ning TTÜ katsete ajaks oli olemas ka seade Dynatest LWD 3032, mis on viimane mudel ning võrreldes 3031 mudeliga on elektroonika uus.

Plaatkoormus seade

Plaatkoormuskatse käigus koormatakse ümmargust plaati katsetataval konstruktsioonikihil staatilise koormusega. Koormust suurendatakse ja vähendatakse astmeliselt kahes järjestikuses tsüklis. Vajaliku koormuse saavutamiseks on vaja vasturaskust, millega peab saama tekitada vähemalt 10 kN suuremat jõudu kui katse käigus vaja. Koormuse suuruse hindamiseks peab kasutama vastavat mõõteseadet. Plaat tekitab pinnasele deformatsioone. Deformatsioon mõõdetakse talla keskosast suhtelise vertikaalse siirdena. Mõõtmiste tulemusel on teada pinge seadme talla all ning pinnase deformatsioon ja nende suhtena arvutatakse elastsusmoodul E_v . [23]

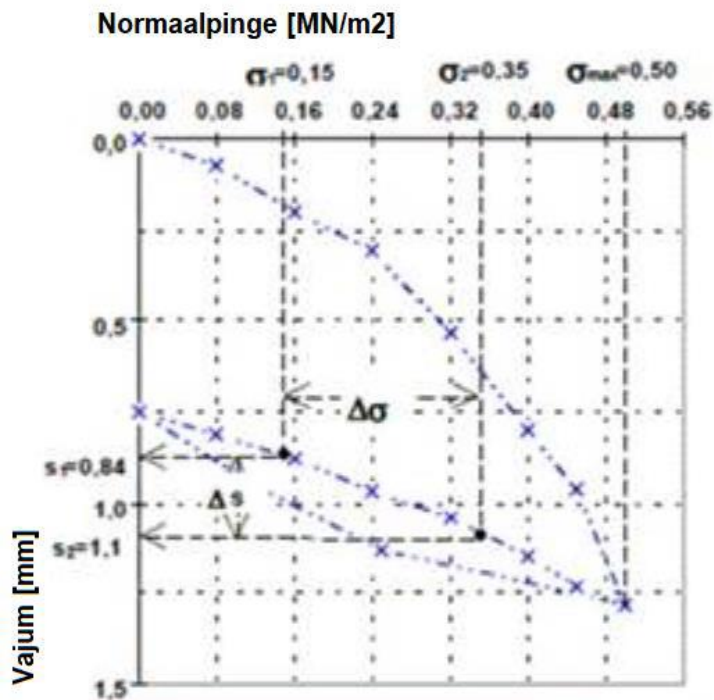
Plaatkoormuskatse läbiviimiseks on vaja järgnevaid seadmeid:

- hüdrotungraud;
- koormusplaat raamiga;
- vasturaskus,
- anduritega mõõteseade, mis mõõdavad rakendatavat jõudu ja vajumit.



Joonis 6.3 Plaatkoormusseade koos vasturaskusega [24]

Elastsusmooduli E_v arvutamine baseerub pinge - deformatsiooni graafikutel. Vaadeldakse ala, mis jääb vahemikku $0,3 \cdot \sigma_0 \text{ max}$ ja $0,7 \cdot \sigma_0 \text{ max}$ ($\Delta\sigma$).



Joonis 6.4 Pinge-deformatsiooni graafik koosarvutuses vaadeldava vahemikuga $\Delta\sigma$ [20]

Kõveraid iseloomustatakse teise astme polünoomidega: [23]

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \quad (6.2)$$

- kus: σ_0 -keskmise normaalpinge plaadi all, MN/m²,
 s -koormusplaadi vajum, mm,
 a_0 -ruutfunktsiooni konstant, mm,
 a_1 -ruutfunktsiooni konstant, mm/(MN/m²),
 a_2 -ruutfunktsiooni konstant, mm/(MN²/m⁴).

Konstantide a_0 , a_1 ja a_2 leidmiseks koostatakse võrrandisüsteem ja arvutatakse katse andmetega läbi. Lõplik elastsusmoodul E_v arvutatakse järgneva valemiga: [23]

$$E_v = 1,5 \cdot r \frac{1}{a_1 \cdot a_2 \cdot \sigma_{0max}} \quad (6.3)$$

- kus: E_v -deformatsioonimoodul, MN/N³,
 r -koormusplaadi raadius, mm,
 σ_{0max} -maksimaalne keskmine normaalpinge plaadi all esimese koormustsükli ajal, MN/m².

Saksa standardis on kirjeldatud kolme erinevat koormustalda millele vastavad erinevad koormused ja vastavalt ka pingerežiim. Teedehituses kasutatakse üldjuhul ainult 300 mm talda, kuid juhul, kui deformatsioon 300 mm tallaga on liiga suur, tuleb kasutada suuremat talda.

Vene ja Itaalia juhistes on kirjeldatud erinevad pingerežiimid sõltuvalt mõõdetavast kihist. Seega, fikseeritud koormusrežiim on omane pigem Saksa süsteemile.

PCE-MA202 niiskusemõõtja

Absoluutse niiskuse mõõtja PCE-MA 202 võimaldab erinevaid materjale kaaluda ja selleläbi leida veesisaldused. Kuumutuskambris kaalub niiskusemõõtja esialgse materjali, seejärel kuumutab halogeenlamp kuni 199 kraadini (temperatuurirežiim on vastavalt vajadusele programmeeritav) ja kuivatab materjali ning arvutab kaalukaotusest tulenevalt materjali veesisalduse. PCE-MA 202 kaalu täpsus on 0,01 grammi. Tulemused kuvatakse LCD ekraanile. PCE Instruments on Suurbritannia ettevõtte.



Joonis 6.5 PCE-MA202 niiskusemõõtja [25]

Antud katsetes kasutatakse automaatset (standard) seadistust, kus kuumutuskambris asuv halogeenlamp kuumutab kuni +120°C ja seda seni, kuni enam 45 sekundi jooksul ei vähene materjali kaal rohkem, kui 20mg. Olenevalt materjali kogusest ja niiskusest võtab see aega 10-45 minutit. Antud niiskusemõõtjat on võimalik seadistada ka selliselt, et määratakse ette aeg, kui kaua kuumutustsükkel kestab ja samas saab ka määrata temperatuuri, millega halogeenlamp kuumutab. Temperatuurivahemik, millega materjali kuivatada, on +40°C kuni +199°C. Ning ajavahemik 1 – 99 minuti. Ekraanile kuvatakse katse lõppedes materjali niiskus protsentides, materjali algmass, materjali lõppmass, temperatuur, milleni kuumutati ning katseks kulunud aeg. Alati pärast seadme transportimist või pikemat seismist tuleks kaalu täpsust kontrollida, selleks kuulub komplekti ka kaks 100 grammist kaaluvihki. Kui kuvatav kaal ei vasta kaaluvihkide kaalule, tuleb seade kalibreerida. Juhend kalibreerimiseks on seadme kasutusjuhendis ning see on igale kasutajale jõukohane. [25]

Seade sobib kasutamiseks ka objektidel välitingimustes, näiteks objektikontoris või autodel, millel on lisavarustuses inverter, mis muundab voolu 220 V (vähemalt 400W). Kuna kaal on täpsusega 0,01 grammi, siis peab arvestama, et vibratsioon mõjutab tulemust ning katse võib koguni ebaõnnestuda. Seega on soovitatav teostada niiskusemõõtjaga katset kindla pinna peal ning eemal ehitusmasinate vibratsioonist.

Matest vibrotihendusseade

Matest vibrotihendusseade on sisuliselt mobiilne Proctor-tihendus seade. Seade võimaldab välitingimustes tihendada materjali standardsele Proctor-tihedusele nii 100 mm kui 150 mm standardses vormis. Tihendusseadmena kasutatakse antud katsetes vormi külge kinnitatud Hikoki vibrohaamrit. Antud seade võimaldab laiendada katsetatavate materjalide loetelu ka nõrgemast kivimaterjalist toodetud killustikele ja

liivadele, mis standardse Proctor-katse haamri all purunevad (materjali terastikuline koostis muutub katse käigus). Vibrotihendusmeetodit katsetati esmalt Rasmus Renteri magistritöös, mille raames uuriti killustiku ja liiva segude elastsusmoodulit erineva segusuhte korral. Vibroseade konstrueeriti Briti Standardi BS 1337-4:1990 eeskujul, kuid Rasmus Renteri töös kasutatud meetod osutus veidi ebatäpseks (raske tagada standardijärgset konstantset staatilist survet). [22] Seetõttu oli järgnevaks tööks hangitud Matest vibropink, mis tagab lisaks vibrokoormusele ka konstantse staatilise koormamise ja Hardo Pajuse magistritöö raames võrreldi meetodit standardse Proctor-tihendamisega. Töö kinnitas standardites esinevat väidet, mille kohaselt 10 cm diameetriga vormis on Proctor-tihendusega ekvivalentne liivpinnastele vajalik tihendusaeg 720 W vibrotihendusseadmega staatilisel koormusel ca 40 kg – 30 sekundit, 15 cm diameetri korral 60 sekundit kihile. [26]



Joonis 6.6 Matest vibrotihendusseade [27]

Muud seadmed

Lisaks eespool välja toodud seadmetele kasutati TTK laboris katsestendil aluste ehituseks JCB teleskooplaadurit ja Amman 320 kg vibroplaati, TTÜ laboris kuivatuskappi ahjukatsel, digitaalkaalu maksimaalse kaaluga 20 kg ja sõelkõvera koostamisel materjali sõelumise hõlbustamiseks Matest Electromagnetic sieve-shaker seadet ning TTÜ labori katsesõelasid.

7 NIISKUSE MÕJU LIIVADE KANDEVÕIMELE

7.1 Katsete eesmärgid

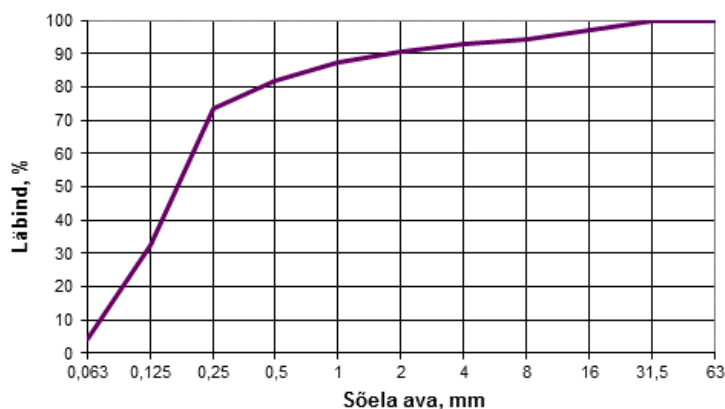
Tallinna Tehnikakõrgkooli teedelabori stendi katsete peamine eesmärk oli saavutada võimalikult reaalsele objekti olukorrale vastav olukord ja seeläbi leida veesisalduse mõju liivade kandevõimele mõõdetuna erinevate seadmetega. Varasemate uuringute taustal püstitati hüpotees, et 3% muutust optimaalsest niiskusest ühele või teisele poole muudab elastusmoodulit 30% [28]

Tallinna Tehnikaülikooli teede- ja liikluse teadus- ja katselaboris teostatud katsete peamine eesmärk oli leida erinevate liivade veesisalduse mõju kandevõimele kasutades Proctor-tihendamist ja mõõtmist LWD seadmega otse Proctor-vormis. Varasemate uurimustööde taustal püstitati hüpotees, et veesisalduse kasvuga toimub kandevõime kahanemine. [11] Lisaks on eesmärgiks uurida kogu katseteks kasutatava katseseadmete komplekti võimalusi ja kasutusmugavust. Anda ideid ja tähelepanekuid edasisteks uurimistöödeks.

7.2 Katsed TTK laboratooriumis

7.2.1 Katsestendil liiva mõõtmine LWD seadmega

Esmased katsed viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli teedelaboris, kus asub 3,5m x 3,5m suuruse pinnaga katsestend. Kastis oli eelnevalt 1,8 meetrit täitepinnast. Olemasolevale materjalile koostati sõelkõver.



Joonis 7.1 TTK stendi olemasoleva täitepinnase sõelkõver [20]

Täitepinnasele ehitati Männiku karjäärast pärit ühtlaseteralisest liivast 20 sentimeetri paksune liivalus, mis tihendati 263 kilogrammise vibroplaadiga Ammann 3520.



Joonis 7.2 TTK katsestendi ja aluse ehituseks kasutatud JCB teleskooplaadur

Seejärel kasutati PCE-MA 202 niiskusemõõtjat, et määrata olemasolev liiva veesisaldus. Võeti kolm erinevat proovi, et leida keskmine niiskus. Liivalusele moodustati 6 ala, millel teostati elastsusmooduli mõõtmisi Dynatest LWD 3031 seadmega.



Joonis 7.3 PCE-MA 202 töös

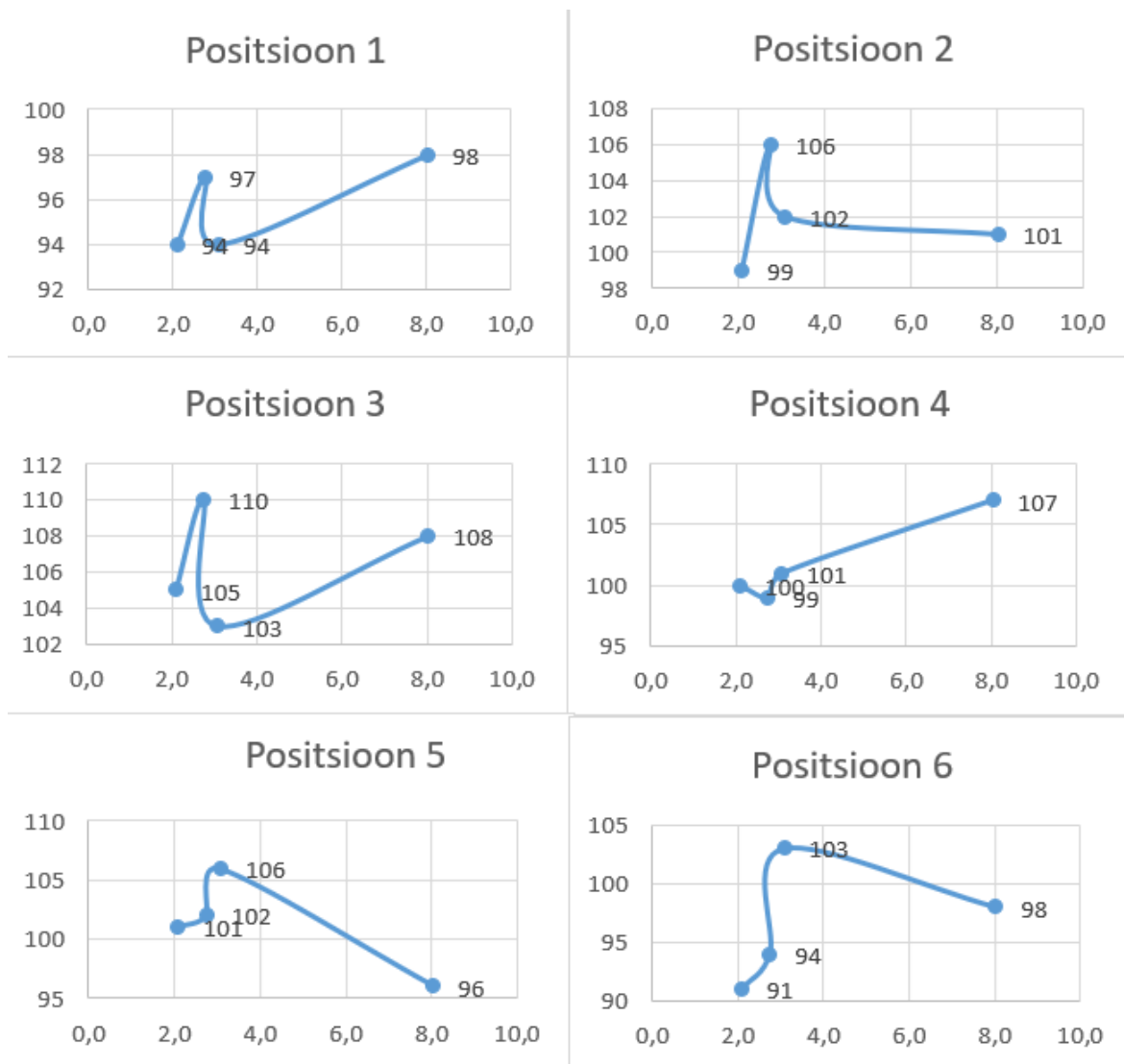


Joonis 7.4 Liiva elastsusmooduli mõõtmine TTK stendil

Kui kuuel erineval positsioonil oli elastsusmooduli mõõtmised tehtud, tasandati pind rehaga ning seejärel kasteti veega, oodati 10-15 minuti, millele järgnes tihendamine vibroplaadiga. Edasi järgnes uute niiskuseproovide võtmine kolmest erinevast kohast ning LWD'ga elastsusmoodulite mõõtmine. Kokku tehti katseid nelja erineva niiskuse juures: 1,9%; 2,5%; 2,8% ja 7,3%. Tabelis 7.1 on kajastatud tulemused 6 erineva mõõtmispositsiooni kohta eraldi.

Tabel 7.1 Elastsusmooduli mõõtmistulemused TTK stendil

PCE-MA 202 niiskus; %	Tegelik niiskus, %	P1, E;Mpa	P2, E;Mpa	P3, E;Mpa	P4, E;Mpa	P5, E;Mpa	P6, E;Mpa
1,9	2,1	94	99	105	100	101	91
2,5	2,8	97	106	110	99	102	94
2,8	3,1	94	102	103	101	106	103
7,3	8,0	98	101	108	107	96	98

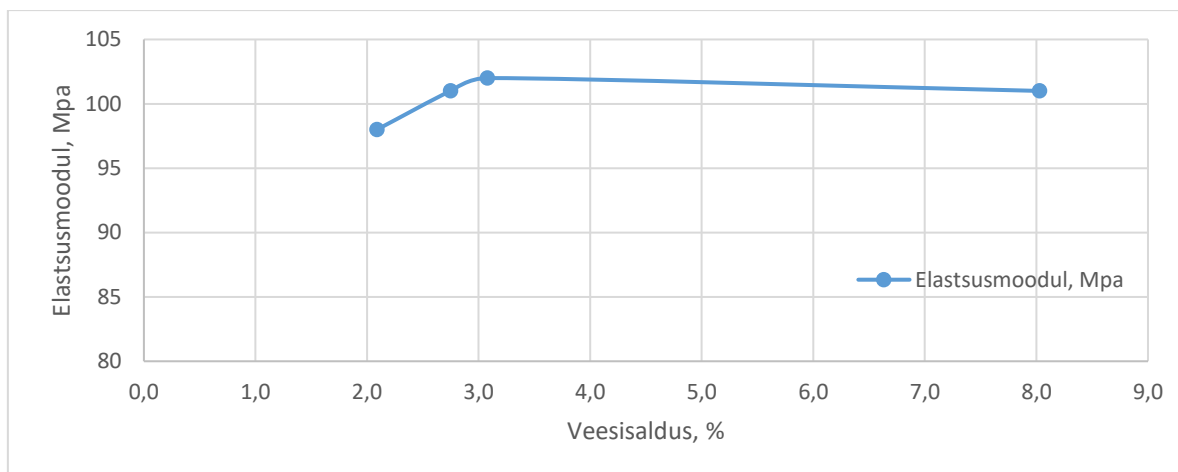


Joonis 7.5 Kuue erineva positsiooni elastsusmooduli ja niiskuse vahelise seose graafikud

Tabelis 7.2 on kajastatud tulemused niiskuste lõikes 6 positsiooni keskmised elastsusmoodulite tulemused:

Tabel 7.2 Liiva elastsusmooduli ja niiskuse keskmised mõõtetulemused

Katse nr	Kuupäev	Asukoht	Materjal	PCE-MA 202 niiskus, %	Tegelik niiskus, %	Elastsusmoodul, Mpa
1	04.jaan	TTK	Liiv	1,9	2,1	98
2	04.jaan	TTK	Liiv	2,5	2,8	101
3	04.jaan	TTK	Liiv	2,8	3,1	102
4	04.jaan	TTK	Liiv	7,3	8,0	101



Joonis 7.6 Liiva elastsusmooduli ja veesisalduse keskmised

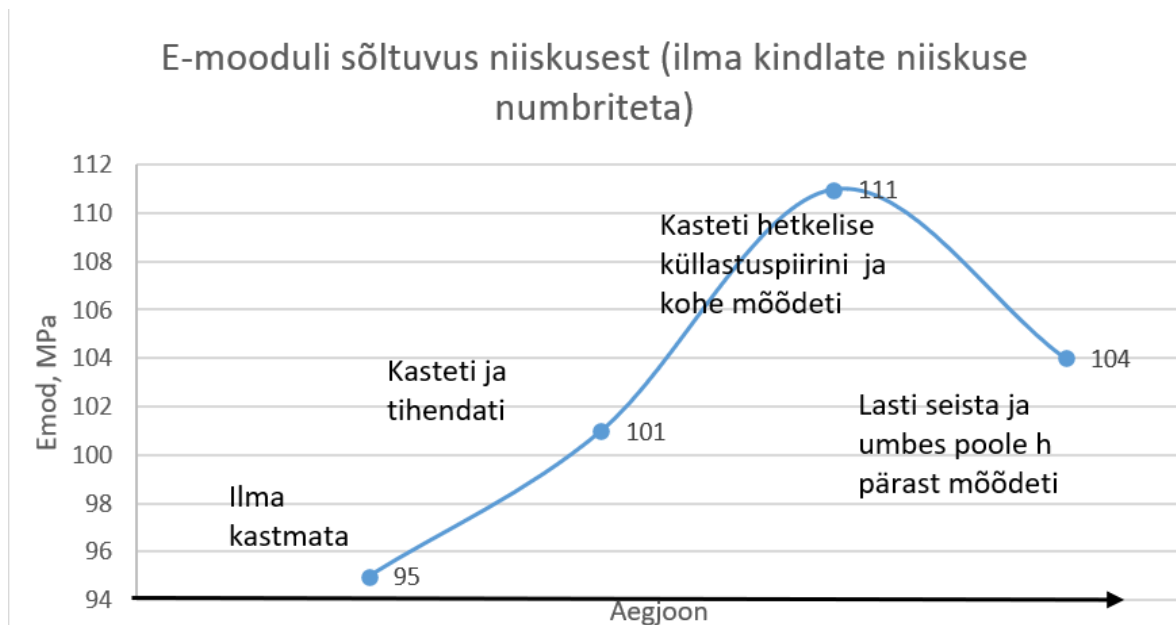
Antud katsete järeldus

Katsetulemustest nähtub, et ühtegi kindlat seost ei tule välja. Positsioonide 1. – 3. mõõtetulemuste graafikute kujud on omavahel sarnased ning positsioonide 5. ja 6. mõõtetulemuste graafikute kujud on omavahel sarnased. Kui leida niiskussisalduse järgi kuue erineva positsiooni keskmised, siis on näha, et tegelikult keskmised kandevõime numbrid on erinevate niiskusesisalduste juures põhimõtteliselt samad – vahemikus 98-101. Sellest katsest võib kaudselt järeldada, et veesisalduse mõju vahemikus 2,0% - 8,0% on kandevõimele minimaalne.

Ühtlaseteralistel liivadel on hea filtratsioon, mistõttu ei hoia nad vett endas vaid lasevad selle kiirelt läbi, ei ole võimalik saavutada kogu kihis ühtlast veesisaldust. Pärast kastmist tihendamine võib muuta ka suuresti materjali veesisaldust. Seetõttu on keeruline reaalses oludes saada optimaalse niiskuse lähedast olukorda piisavaks ajaks. Antud katsetes teostati materjali niiskuse mõõtmine tihendamise järgselt, seega ei ole teada materjali täpne veesisaldus tihendamisele eelnevalt ning kuidas tihendamine veesisaldusele mõjub, kui liivakihi all on ka dreniv materjal. Kuna veesisalduse katsetamine PCE-MA202 seadmega toimub suhteliselt kiiresti, oleks võinud teostada veesisalduse määramise nii tihendamisele eelnevalt kui ka järgnevalt.

Kuna katsetatud materjalil oli silmnähtavalt hea filtratsioon ja keeruline määrata konkreetset niiskuse numbrit, jäeti järgmisest katsest kõrvale niiskusemõõtja PCE-MA 202. Mõõdeti vaid materjali algne niiskus, mis oli 6,2%. Seejärel valiti üks positsioon, kus mõõdeti LWD'ga elastsusmoodulit, milleks saadi 95 MPa. Järgmiseks sammuks oli kastmine, tihendamine ja kandevõime mõõtmine samast punktist, kust eelminegi. Tulemuseks saadi 101 MPa. Seejärel jäeti LWD samasse kohta, kasteti veega ümbrust niipalju, et korraks saavutati küllastuspiir, vesi jäi hetkeks peale. Sellises situatsioonis saadi kandevõime 111 MPa. Viimaseks mõõtmiseks lasti materjalil taheneda umbes pool

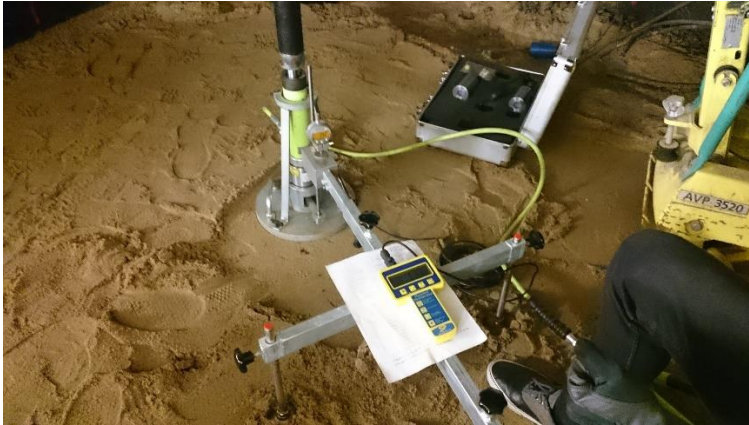
tundi, mille käigus materjali veesisaldus silmnähtavalt vähenes. Poole tunni möödudes oli kandevõime langenud 104 MPa peale. Seda katset ei saa käsitleda millegi alusena, sest puuduvad konkreetsed niiskuse numbrid, kuid illustratsiooniks on hea, sest selle katse graafikult on selgelt näha, kuidas materjali veesisaldus mõjutab kandevõimenumbrit.



Joonis 7.7 Elastsusmooduli sõltuvus niiskusest

7.2.2 Katsestendil liiva mõõtmine plaatkoormus seadmega

Järgmiseks viidi liiva peal läbi kaks plaatkoormuskatset kahe erineva niiskuse juures. Plaatkoormuskatse läbiviimiseks on vaja koormusplaat diameetriga 300 mm koos raamiga, hüdrotungraud, mõõteseadet koos anduritega, mis mõõdavad rakendatavat jõudu ja vajumi suurust, ning vähemalt 5 tonni suurust vasturaskust. Plaatkoormuskatset kasutatakse pinnaste, aga ka sidumata tarindikihtide deformeeritavuse, kandevõime ning tihendatuse määramiseks. Väga üksikasjalikult kirjeldatud standardite tõttu on see kõige täpsem pinnasetööde katse, millel on kõrgeim korratavus. Plaatkoormuskatsega määratakse vajumi sõltuvus koormusest.



Joonis 7.8 Plaatkoormusseade

Antud katsetes kasutati Tallinna Tehnikakõrgkoolile kuuluvat plaatkoormusseadet, mille komplekti kuulusid järgnevad seadmed:

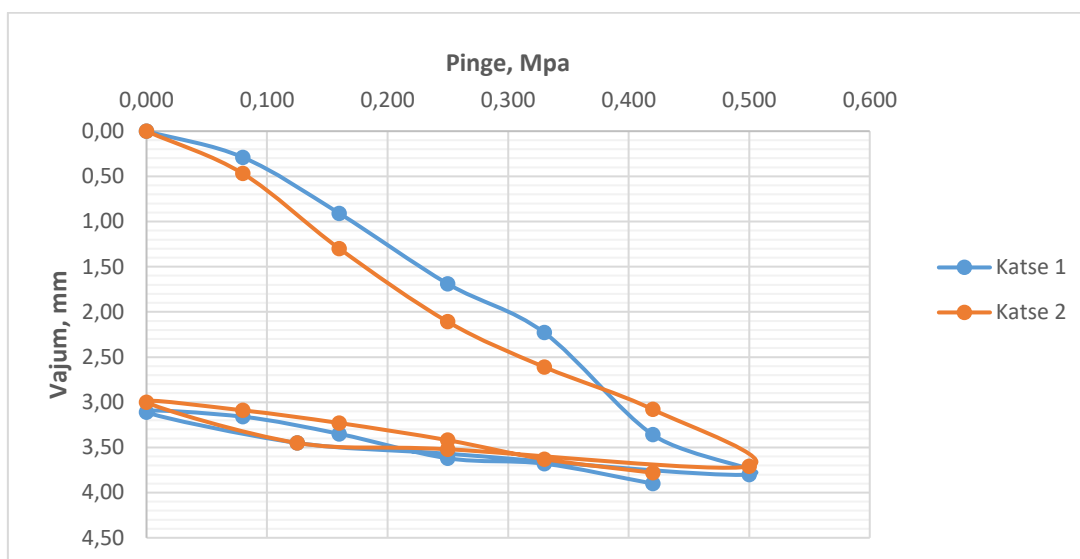
- Mõõtekell
- Hüdrotungraud
- Koormuse mõõtja

Vasturaskusena kasutati laboratooriumi katsekasti kohal olevat rattakatse relssi. Kuna tala asus katsepinnast umbes 2 meetri kõrgusel, oli vaja valmistada ka umbes meetri pikkune terassilinder, mis ühendas seadet vasturaskuseks kasutatava talaga ning terasplaat, mis paiknes tala ja silindri vahel.



Joonis 7.9 Plaatkoormusseadme ja vasturaskuse vaheline terassilinder

Joonis 7.10 kajastab katsetulemused:



Joonis 7.10 Plaatkoormuskatse tulemus

Tabel 7.3 Plaatkoormuskatse tulemus

	Niiskus; %	E; Mpa
PLT1	2,3	111
PLT2	6,5	110

Nagu tabelist näha, ei ole niiskuse erinevus plaatkoormuskatse tulemustele mingit mõju avaldanud. Et saada täpsemat ülevaadet, on vaja rohkem katseid teha erinevate niiskuste juures, kuid kuna üks plaatkoormuskatse võtab aega 45 – 75 minutit, siis jäi katsete arv antud töö puhul piiratuks.

7.2.3 Katsestendil killustikaluse mõõtmine LWD seadmega

Katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli teedelaboris, kus asub 3,5m x 3,5m suuruse pinnaga katsestend. Kui liiva peal olid katsed lõppenud, kaeti pind pooles mahus (3,5m x 1,75m) geotekstiiliga ning alustati killustikaluse ehitusega. Poole kasti ulatuses kasutati paekillustikku fr 4/32 ja teises pooles paekillustikku fr 32/64, mida kiiluti fr 4/32. Killustikaluse paksuseks oli 25 +/- 2 cm. Killustikalus tihendati vibroplaadiga Ammann 3520



Joonis 7.11 TTK stendil killustikaluse ehitus



Joonis 7.12 TTK stendil tihendatud killustikalus

Niiskusemõõtja PCE-MA 202 maksimaalne materjalikogus, mida ühe korraga mõõta saab, on 200 grammi, ka materjali suurus on piiratud seadme kuumutuskambri mõõtude tõttu. Seetõttu ei ole võimalik paekillustik fr 32/64 materjali niiskust määrata antud töös kasutatud niiskusemäärajaga ja niiskuse sõltuvuse katsed tehti ainult paekillustikuga fr 4/32. Vahetult pärast tihendamist võeti hajutatult kolm 85 grammist proovi killustikalusest, et määrata niiskus. Seejärel alustati seadmega Dynatest LWD 3032 elastsusmoodulite mõõtmist. Tekstiiliga alalt mõõdeti 3 erinevast punktist ja ilma tekstiilita alalt 4 erinevast punktist. Järgnevalt kasteti killustikalust, tihendati ja tehti uued niiskuse mõõtmised. Seejärel korrati tegevust veel ühe korra.

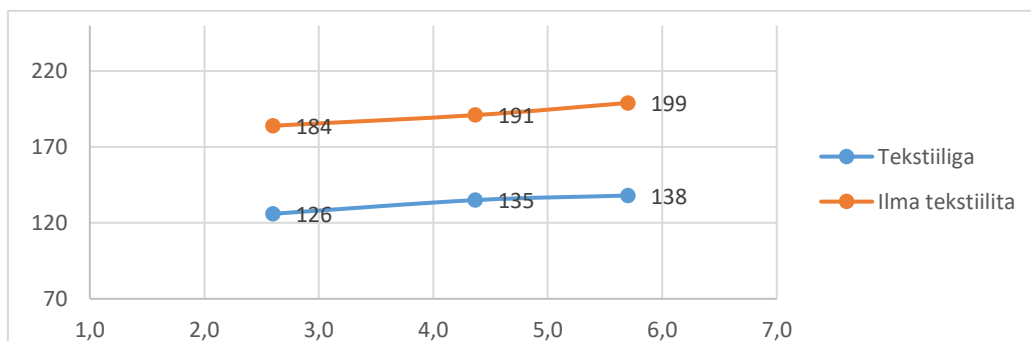


Joonis 7.13 TTK stendil killustikaluse elastusmooduli mõõtmise

Katsete keskmised tulemused allolevas tabelis 7.5.

Tabel 7.5 TTK stendil killustikaluse elastusmooduli mõõtmistulemused

Kastmine nr	Keskmine niiskus, %	Tekstiiliga, MPa	Ilma tekstiilita, MPa
1	2,6	126	184
2	4,4	135	191
3	5,7	138	199

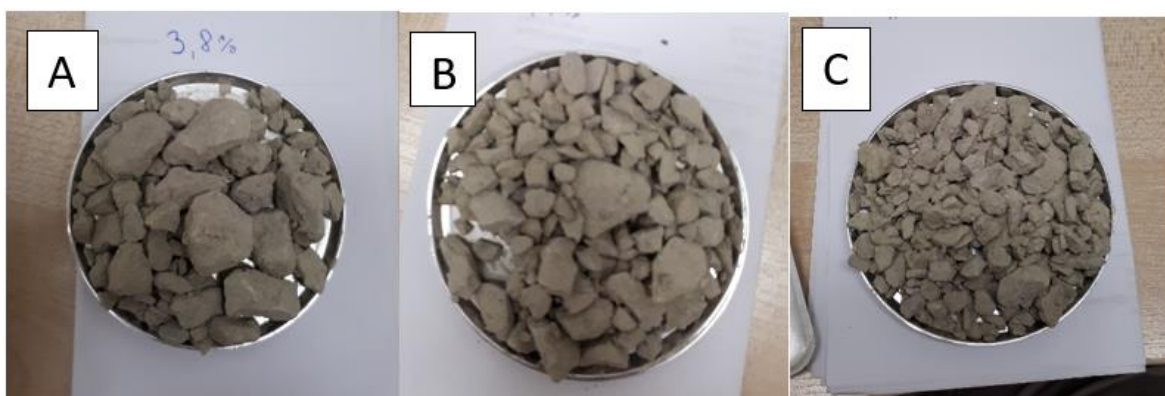


Joonis 7.14 TTK stendil killustikaluse elastusmooduli mõõtmistulemused

Nii tulemustes kui ka graafikult on näha, et niiskuse kasvades kasvab ka kandevõime. Kandevõime tõusu võib siiski põhjustada antud katsetes ka see, et iga kastmise järel tihendati pind uuesti vibroplaadiga üle ning kandevõime tõusu põhjustas hoopis täiendav tihendamine ja tiheduse kasv, mitte niivõrd niiskuse kasv. Kui leitakse teema oluline olevat, siis vajab täiendavat uurimist. Keeruline on katses kasutatud niiskusemõõtjaga määrata killustiku veesisaldust. Võttes arvesse autori töökogemuse reaalsel teedehituse objektil, kus killustikaluse vajaliku kandevõime saavutamiseks kastetakse killustikalust, võib kinnitada, et kastmine aitab kaasa kandevõime paranemisele. Kuna aga teatavasti killustik drenib hetkega suurem osa vett läbi, vaid osa vett jääb killustiku teradele pidama. Siis tasub mõelda, kas realselt toimub siiski

dreenkihi niisutamine ja hoopis drenkihi niiskuse muutusest tuleneb killustikaluse kandevõime tõus.

Killustikaluse niiskuse määramine PCE-MA202 niiskusemõõtjaga on problemaatiline. Kuna kogused, mida seade võimaldab mõõta, on väga väikesed, siis on keeruline määrata, millise terastikulise koostisega saab kõige reaalsema veesisalduse protsendi. Pärast kastmist võeti kolm umbes 85 grammist proovi. Üks proovidest sisaldas rohkem suurema fraktsiooniga killustikku, teine proov sisaldas rohkem peenema fraktsiooniga killustikku ja kolmas oli vahepealne. Mõõdetud niiskusest järeldus, et mida peenem on katsetatud materjal, seda suurem on veesisaldus ja mida suurem on materjali tera läbimõõt, seda väiksem on niiskus, sest väiksema teralisel materjalil on summana rohkem pindasid, mis peaksid niiskuse enda küljes kinni, suurel vastupidi.



Joonis 7.15 A - niiskus 3,8%, B - niiskus 4,4%, C - niiskus 4,9%

7.2.4 TTK katsete kokkuvõte ja järeldus

Katsetatud liiva optimaalne veesisaldus on kogemuslikult ligikaudu 14-15%, katseid teostati oluliselt väiksemate veesisalduste juures. Seetõttu ei anna need katsed terviklikku pilti. Katsetest lähtuvalt ei ole enamikel juhtudel veesisalduse ja kandevõime vahel seost, võib-olla antud niiskuse vahemikku (1,9-6,8%) tulebki käsitleda vaid mingi segmendina terviklikust pildist ja niiskuse ning kandevõime vaheline seos tuleb rohkem välja kui liikuda veesisaldusega optimaalsele lähemale. Plaatkoormuse katse teostati kõigest kahe erineva niiskusega, et näha täpsemat seost niiskuse ja plaatkoormuskatse mõõtetulemuste vahel, tuleks teostada rohkem katseid.

7.3 Katsed TTÜ laboratooriumis

7.3.1 Elastsusmooduli mõõtmine ja niiskuse võrdluskatsed

Saavutamaks Proctor-vormi LWD katseks täielikku mobiilsust ja võimalikult väikest katseseadmete arvu, prooviti Proctor vormis materjali tihendamist Dynatest LWD 3031 seadmega, et saavutada standardne Proctor-tihedus.

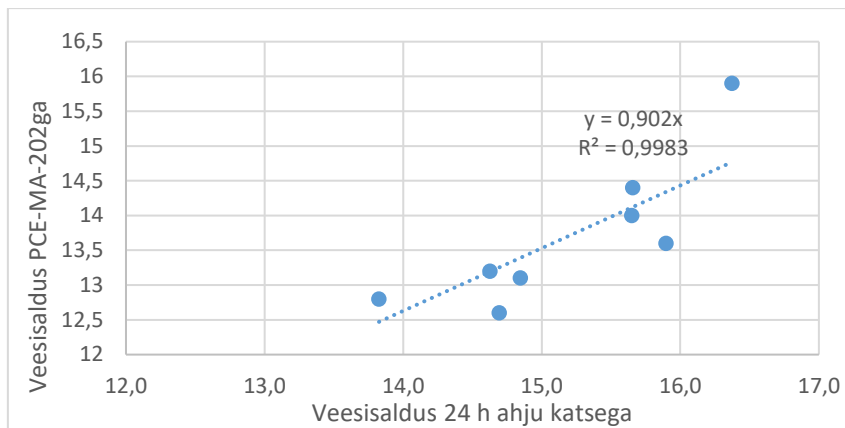
TTÜ teedelaboris viidi läbi katsetused paralleelselt standard Proctor-tihendamisega ja LWD seadmega tihendamisega ühe kindla veesisalduse juures, et leida LWD seadmega tihendamise vajalikud parameetrid – löökide arv, kukkumiskõrgus ja raskus. Mitmete erinevate LWD kukkumiskõrguste ja raskuste valikul õnnestus leida materjali märgmahumass, mis vastas ka proctortihendamise märgmahumassiga. Seejärel teostati täielik Proctorkatse erinevate veesisaldustega. 24 h ahjukatsete järel selgus, et kuivmahumassid on ikkagi ca 4% erinevad. Seega ka arvatavad kontrollmõõtmisel leitud LWD tihendamise parameetrid ei olnud õiged. Seejärel loobuti edasisest katsetamisest.

Järeldusena võiks välja tuua, et teoreetiliselt võimalik, vajab suurel hulgal testkatseid enne, et leida sobiv löökide arv ja raskuse kukkumise kõrgus. Tõenäoliselt erinevatel materjalidel erinev löökide arv ja kõrgus. Koormab oluliselt puhvrit, tekib vajadus tihedalt puhvrit vahetada ja vajab tihedalt kalibreerimist, kuna aga kalibreerimine toimub Taanis, siis ebaotstarbekas kulutada LWD resurssi tihendamise peale, kui peamine funktsioon on ikkagi elastsusmooduli mõõtmine.

Proctor-katse järgse materjali niiskus määrati paralleelselt ahjukatsega ka PCE-MA 202 seadmega. PCE-MA 202 katsetulemuste keskmine saadi ligi 10 % madalam, kui 24 tunni ahjukatsega. Mida kinnitasid ka Dr. Sadaf Khosravifari oma doktoritöös tehtud katsed PCE'le analoogse aparaadiga Ohaus MB45 – olenevalt materjalist, on niiskusemõõtja katsetulemused 8-13% madalamad ahjukatsetest. [13]

Tabel 7.6 PCE-MA202 ja ahjukatse võrdlus

PCE-MA202, %	24h ahju, %	Erinevus; %	Erinevus, keskm; %
12,6	14,7	14,3	9,9
13,1	14,8	11,8	
13,2	14,6	9,8	
12,8	13,8	7,4	
14,4	15,7	8,0	
15,9	16,4	2,9	
13,6	15,9	14,4	
14	15,7	10,5	



Joonis 7.16 PCE-MA202 ja ahjukatse võrdlus

Jooniselt 7.18 selgub tugev korrelatsioon ahjukatse ja mobiilse PCE seadme vahel. Seega, kui kasutada PCE-MA 202 poolt mõõdetud niiskuse andmeid, tuleb neile lisada 10%, mis on keskmine erinevus 24 h ahjukatsega.

Näide:

- PCE-MA 202 seadmega mõõdeti niiskusesisaldus 6 %
- Materjal tegelik niiskus on $6\% \times 1,1 = 6,6\%$

7.3.2 LWD seadmega Proctor-vormis mõõtmine

Edasised katsed toimusid uues Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Tehtavad katsed lähtuvad S. Khosravifari 2015. a töös katsetatud meetodikast. LWD seadmega mõõdetakse materjali elastsusmoodulit Proctortihendamise järgselt otse vormis. Erinevalt S. Khosravifarist, kes tihendas materjali standardses laboriseadmes ja mõõtis seejärel elastsusmoodulit, katsetatakse käesolevas töös Matest vibrotihendusseadet, mis vastab Briti Standardile BS 1377-4:1990 ning mis annab võimaluse katset teostada ka välitingimustes.

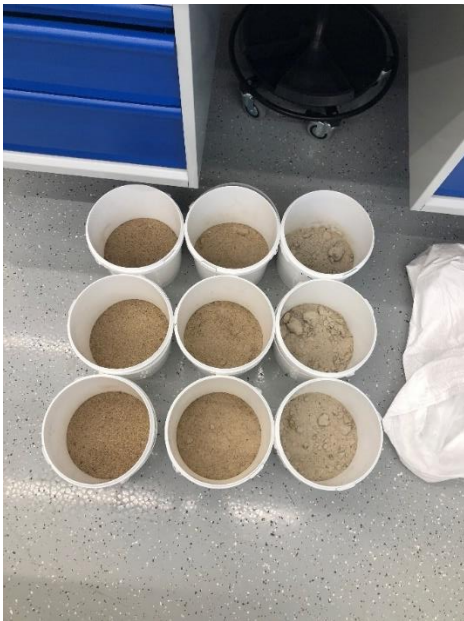
Katsematerjalina kasutati erinevaid liivasid – peenliiv, keskliiv ja Kristiine linnaosast pärit looduslik liivpinna, millelt oodati pigem suuremat peenosise sisaldust. Lisaks toimusid katsed erinevate veesisalduste juures.

Esmalt kuivatati katsematerjalid labori kuivatuskapis. Kogus valiti piisav, et jätkuks Proctor-vormi katseteks, kui ka materjalide sõelkõverate koostamiseks. Kuiva materjali osaga, mis läks sõelkõvera katseks, teostati esmalt peenosise ja tolmu väljapesemine ning see seejärel läks uuesti kuivatuskappi kuivama.

Proctor-vormis mõõtmise katseteks kasutati vormi läbimõõduga 100 mm ja kõrgusega 120 mm, sellise vormimõõdu puhul on optimaalne materjalikogus üheks katseks ligikaudu 2000 g. Veesisaldused, mille juures katseid teostati valiti järgnevad:

- absoluutselt kuiv, kuivatuskapist tulnud materjal, ilma vett lisamata;
- optimaalse veesisalduse lähedane niiskus, kogemuslikult antud materjalidel vahemikus 13-15%;
- kahe eelneva veesisalduse vahele jääv niiskus, umbes 7%.

Igale materjalile lisati arvutuslikult leitud vee hulk, mida oli vaja lisada, et saavutada soovitud veesisaldus, segati korralikult ning jäeti umbes tunniks ajaks kaanega anumasse seisma, et vesi saaks ühtlaselt jaguneda.



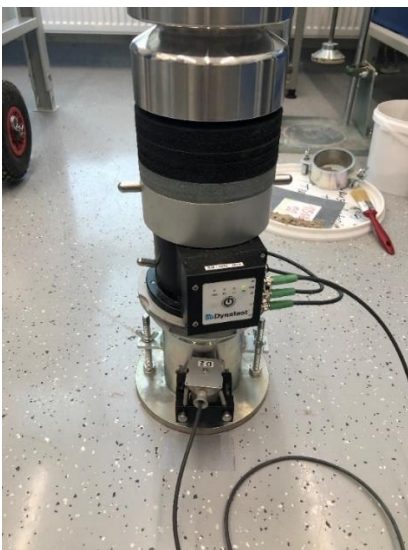
Joonis 7.17 erinevad katsematerjalid

Materjali tihendamiseks Proctor-vormis kasutati Matest vibrotihendusseadet. Vormis tihendamine toimus kolmes kihis ja iga kihti tuli seadmega tihendada 30 sekundit.



Joonis 7.18 Matest vibrotihendusseadmega Proctor-vormis tihendamine

Seejärel eemaldati vormilt ülemine rõngas ja materjal tõmmati vormi äärega tasa, mille järel kaaluti tihendatud materjal koos vormiga. Edasi teostati Dynatest LWD seadmega elastusmoduli mõõtmine otse vormi pealt. S.Khosravifari töödes mõõdeti samuti LWD seadmetega Proctor-vormi pealt, kuid vahepeal on tekkinud lisateadmised, et vormis mõõtes toimuvad mõõtmishetkel deformatsioonid lisaks vormis oleva materjalil ka vormi all oleval pinnal, ehk piltlikult katse käigus deformeerub ka pind millele vorm on asetatud ja seade loeb aluspinna deformatsiooni mõõdetava katsematerjali deformatsiooniks, mis võib kaasa tuua selle, et mõõtmistulemus ei ole adekvaatne. Selle vältimiseks on T-Konsult OÜ, kellele käesolevas töös kasutatav seade kuulub, paigaldanud vormi külge täiendava anduri, see andur mõõdab ainult vormi enda liikumist, ehk käesolevates katsetes labori põranda deformatsiooni.



Joonis 7.19 Vormi külge kinnitatud lisaandur D2, mis mõõdab aluspinna deformatsiooni

Käesolevateks katseteks valiti mõõdetavaks pingerežiimiks ligikaudu 100 kPa, mis peaks vastama teekonstruktsioonis antud materjali reaalseks töörežiimi pingega. Antud katsetes kasutati sellise pinge saavutamiseks 10 kilogrammist raskust ja langemiskõrgus oli 6,5 cm. Seejärel teostati vormis mõõtmised LWD seadmega. Iga katse käigus sooritati vähemalt 6 lööki, kui viimase kolme löögi deformatsiooniulatus erines üle 10 protsendi, siis sooritati lisalöögid kuni saavutati stabiilsed tulemused.



Joonis 7.20 LWD seadmega mõõtmine Proctor-vormil

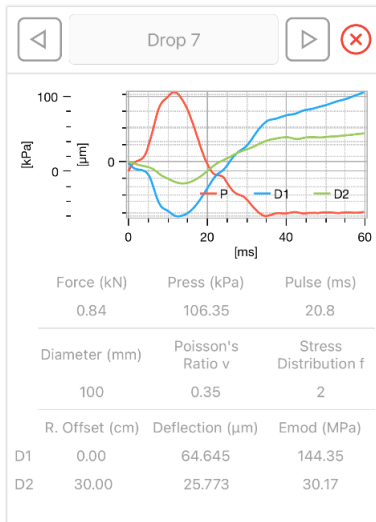
Selliselt korraldati katseid kolme erineva materjaliga ja igal materjalil kolme erineva veesisalduse juures. Iga katse järel teostati materjalidele veesisalduse mõõtmine PCE-MA202 seadmega.



Joonis 7.21 Materjali veesisalduse mõõtmine PCE-MA202 seadmega

7.3.3 Mõõtmistulemuste andmete töötlemine

LWD seadmega mõõtmisel edastab seade kõik vajaliku info mobiilirakendusse Dynatest LWD, sealt on näha kõik vajaminev.



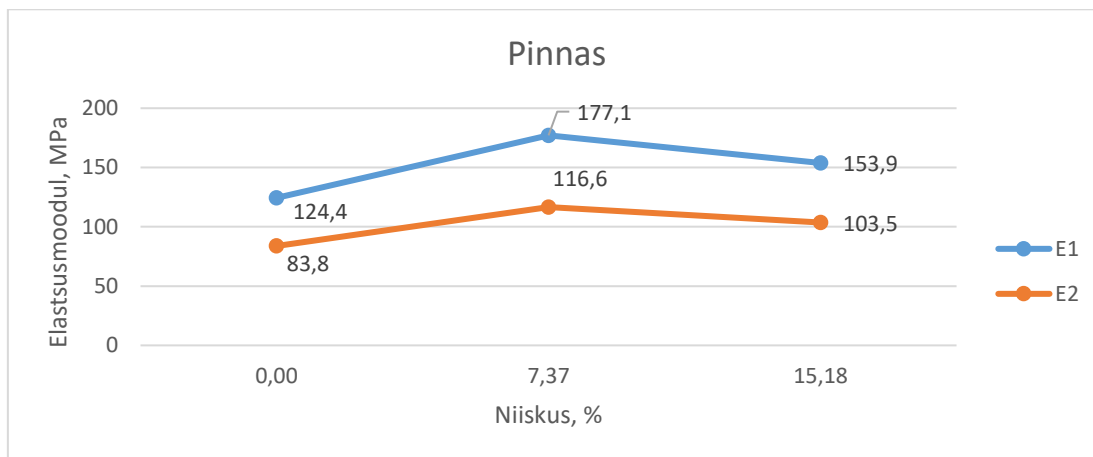
Joonis 7.22 Näide käesolevas töös tehtud mõõtmistulemustest mobiilirakenduses LWD 3032

Seejärel edastatakse rakendusest info LWDMod arvutiprogrammi, mis koostab mõõtmistulemuste kohta Microsoft Exceli tabelid edasiseks andmete töötlemiseks. Nagu käesoleva töö teooria osas oli kirjutatud, siis LWD seade arvutab kandevõime vastavalt Boussinesq valemile (valem 4.1) ning Procor-vormis mõõtes tuleb arvutamiseks kasutada S. Khosravifari poolt tuletatud valemit (valem 4.2). Dynatest LWD seadme tarkvara puhul on võimalik mobiilirakenduses valida kohe vormis mõõtmine ja seeläbi arvutab seade ise valemit 4.2 kasutades elastsusmooduli. Sellel on aga üks puudus, nimelt LWD seade arvutab vormis mõõdetud kandevõime vaid juhul, kui ei kasutata ühtegi täiendavat lisaandurit. Kuna aga käesolevas töös kasutati ka vormi küljes vormi aluspinna deformatsiooni mõõtmiseks andurit, siis tuli kõik elastsusmooduli arvutused ise läbi teha.

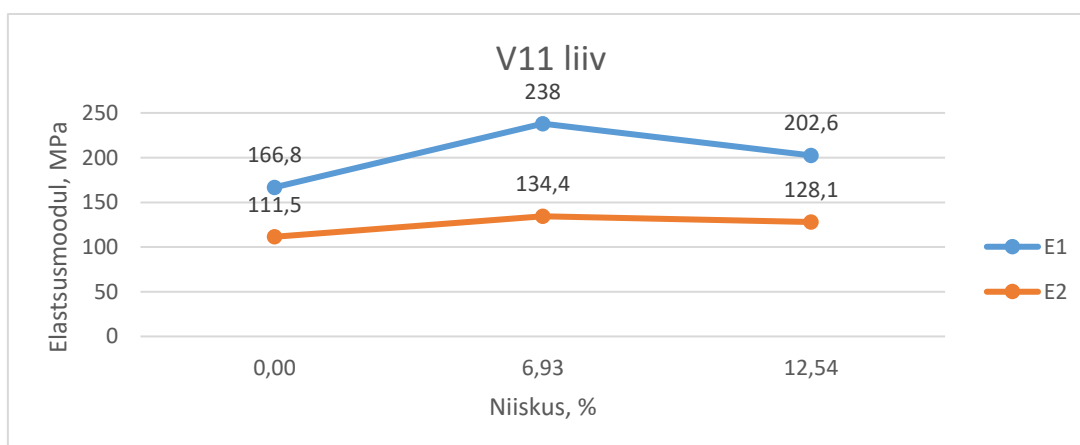
Arvutused viidi läbi kahes variandis. Esimesel juhul arvestati kogudeformatsioonist maha aluspinna deformatsioon, mistõttu on leitav ainult katsetatava materjali deformatsioon ja sellejärgi materjali kandevõime. Teises variandis jäeti arvestamata aluspinna deformatsioon ning arvutused olid analoogsed nagu ka S. Khosravifari töödes. Kuna kandevõime arvutuste aluseks on deformatsiooni suurus, siis on ka näha, et ainult materjali kandevõime on selgelt suurem, kui kandevõime, mis arvestab lisaks materjali deformatsioonile ka põranda deformatsiooni.

Keskmine labori põranda deformatsioon oli 24,7 µm, maksimaalne 33 µm ja minimaalne 22 µm. Kandevõime üheks peamiseks mõjutajaks on deformatsioon. Joonistel 7.23, 7.24 ja 7.25 E1 mooduli leidmisel on põranda deformatsioon kogu deformatsioonist

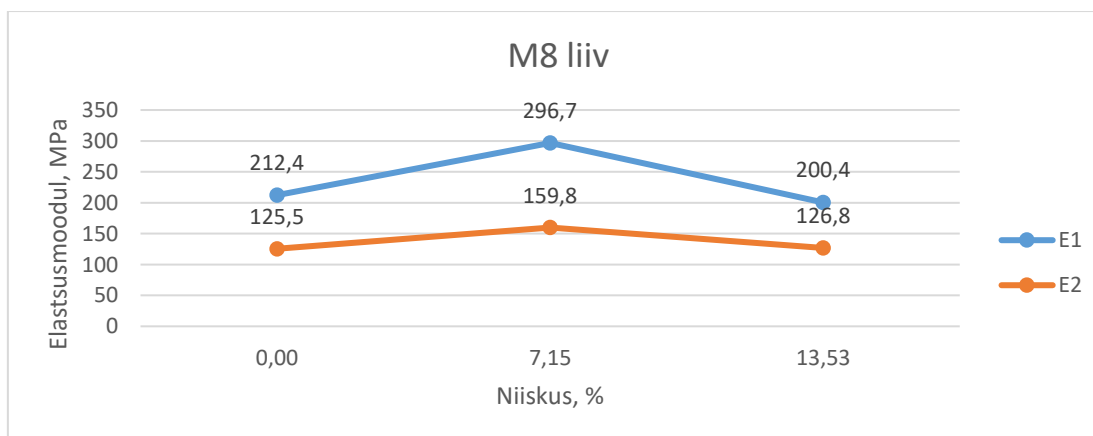
maha võetud, seetõttu on ka arvutuslik elastsusmoodul suurem, sest arvestab ainult materjali enda deformatsiooniga. E2 moodul arvutati kogudeformatsioonist võtmata maha aluspinna deformatsiooni, kuna sellisel lähenemisel on deformatsioon suurem, siis on ka kandevõime madalam.



Joonis 7.23 Liivpinnase kandevõime erinevate niiskuste juures mõõdetuna Proctor-vormis



Joonis 7.24 V11 liiva kandevõime erinevate niiskuste juures mõõdetuna Proctor-vormis

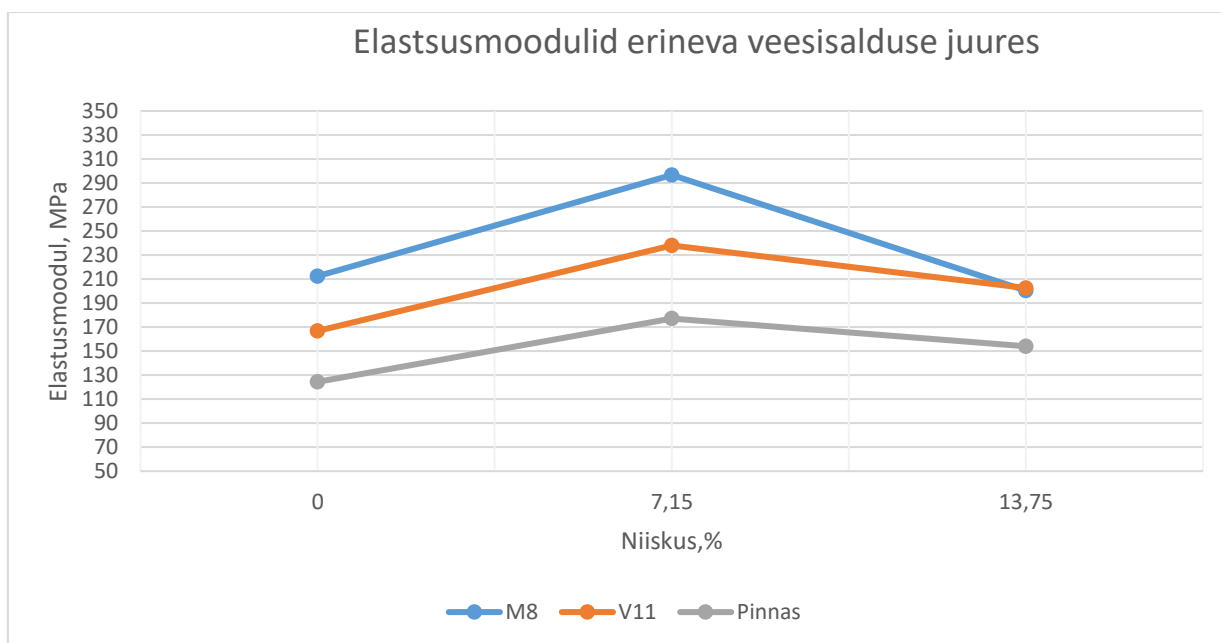


Joonis 7.25 M8 liiva kandevõime erinevate niiskuste juures mõõdetuna Proctor-vormis

Tabelis 7.7 ja joonisel 7.26 on kajastatud koondandmeid, kust on näha erinevate materjalide kandevõime võrdlus analoogsete veesisalduste juures.

Tabel 7.7 Erinevate materjalide elastsusmoodulid erinevate veesisalduste juures

Keskmine niiskus, %	M8	V11	Pinnas
	E, MPa	E, MPa	E, MPa
0	212,4	166,8	124,4
7,15	296,7	238	177,1
13,75	200,4	202,6	153,9



Joonis 7.26 Erinevate materjalide kandevõimed erinevate veesisalduste juures

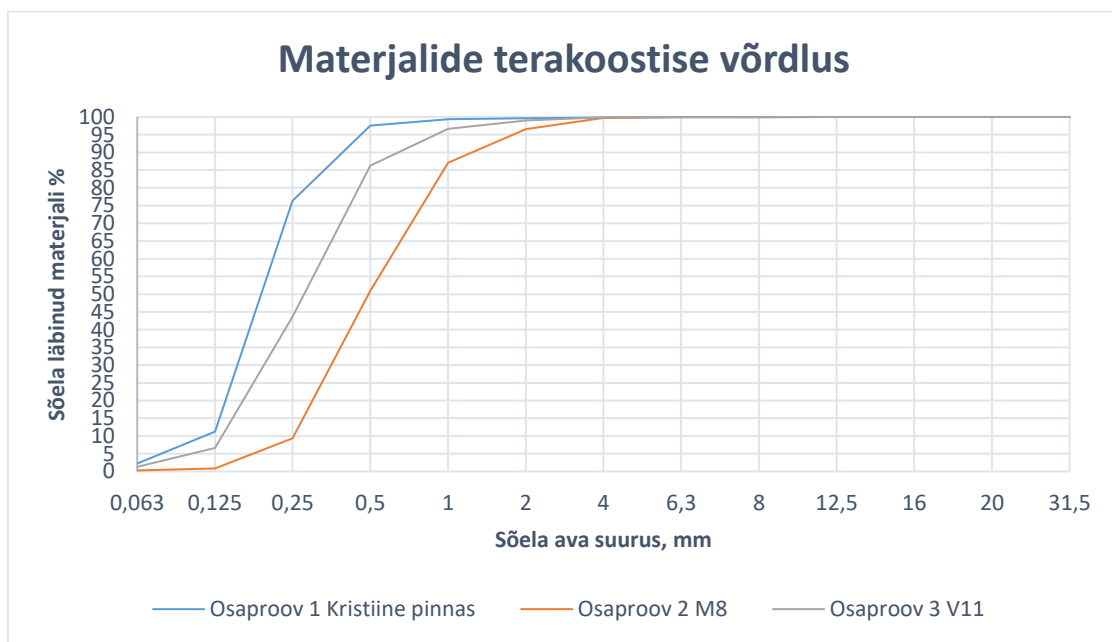
7.3.4 Terastikulise koostise leidmine katsetatud materjalidele

Katsematerjalidele leiti terastikulised koostised. Selle tarbeks esmalt pesti 0,063 mm sõelal materjalist peenosid välja ning leiti seeläbi tolmu ja peenosise hulk. Pärast materjali kuivamist teostati sõelumine, selleks kasutati esmalt TTÜ teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi õppelaboris olevat Matest Electromagnetic Sieve Shaker seadet, millega vibreeriti esmalt sõelasid umbes kümme minutit. Seejärel sõeluti täiendavalt füüsilist jõudu kasutades, et saada kätte võimalikult täpselt sõelajääk.



Joonis 7.27 Matest Electromatic Sieve Shaker

Edasi kaaluti kõik sõelajäägid ning saadud tulemustete põhjal, koostati sõelkõverad, mis on nähtavad alloleval graafikul 7.28, lisaks leiti igale materjalile ka lõimistegur Cu ja peensusmoodul Pm.



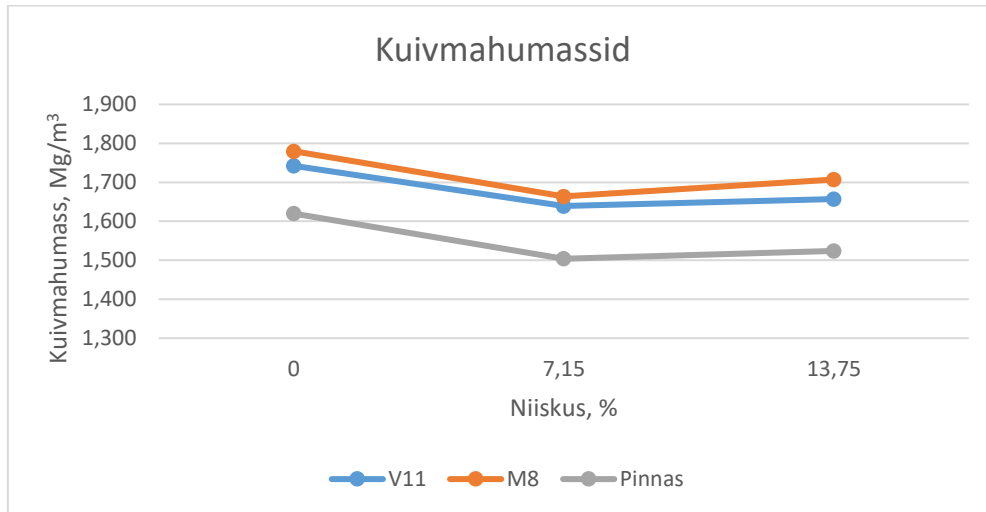
Joonis 7.28 Materjalide terastikuline koostis

Tabel 7.8 Katsetatud materjalide lõimistegurid ja peensusmoodulid

	Pinnas	V11	M8
Cu	1,84	2,45	2,36
Pm	1,13	1,56	2,29

7.3.5 Katsetatud materjalide kuivmahumassid

Proctor-vormis LWD seadmega mõõtmise järgselt kaaluti kõik materjalid vormis ning ka vormi enda tühikaal. Teades vormi kaalu koos materjaliga, vormi enda kaalu ja materjali veesisaldust on võimalik leida iga veesisalduse korral materjali kuivmahumassid. Mida suurem on kuivmahumass, seda tihedam on materjal. Graafikul 7.29 ja tabelis 7.9 on välja toodud katsematerjalide erinevate veesisalduse Proctorvormis vibroseadmega tihendamise järgsed kuivmahumassid.

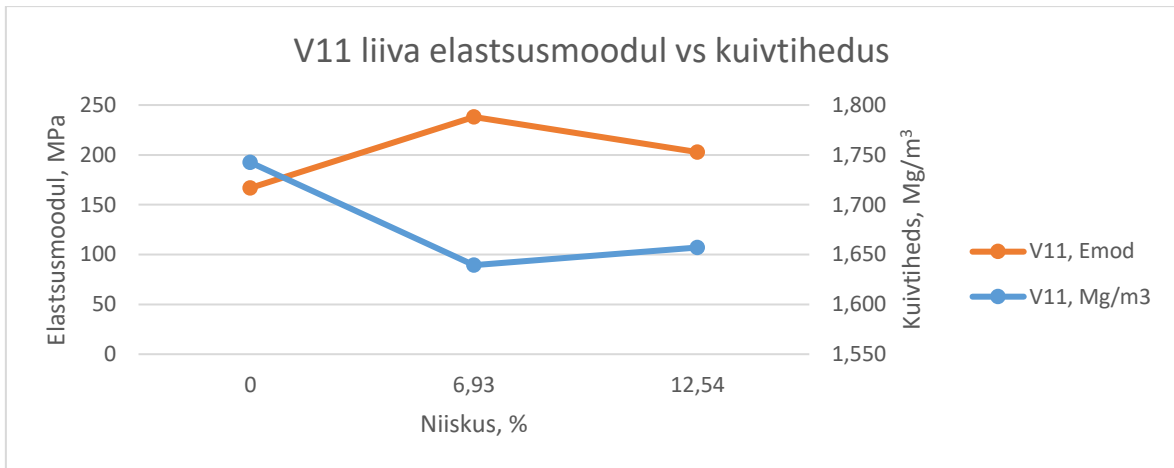


Joonis 7.29 Erinevate materjalide kuivmahumassid

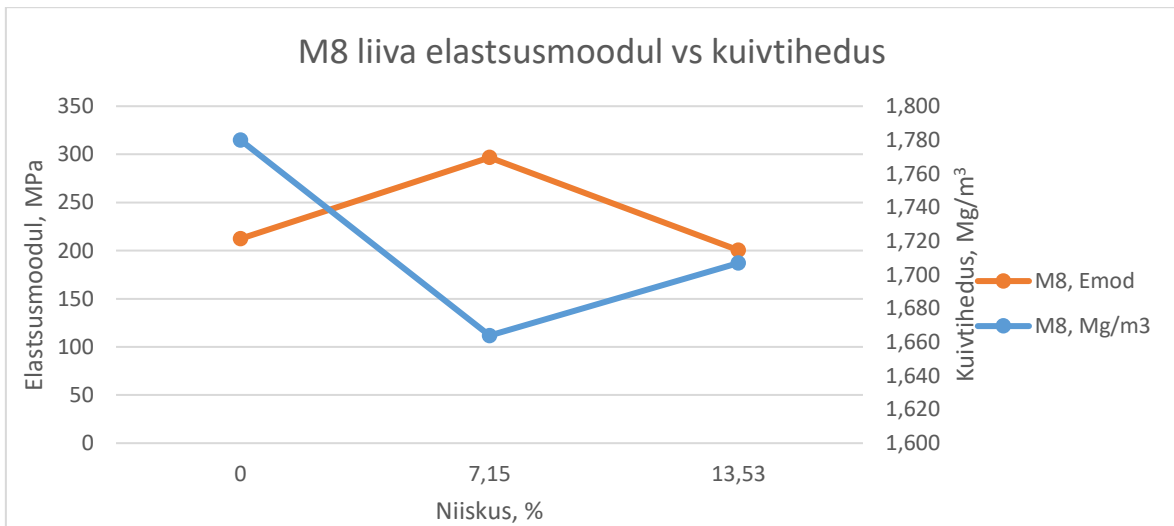
Tabel 7.9 Materjalide kuivmahumassid Proctor-vormis tihendamise järgselt

Niiskus, %	V11, Mg/m ³	Niiskus, %	M8, Mg/m ³	Niiskus, %	Pinnas, Mg/m ³
0	1,742	0	1,780	0	1,620
6,93	1,631	7,15	1,655	7,37	1,496
12,54	1,631	13,53	1,676	15,18	1,488

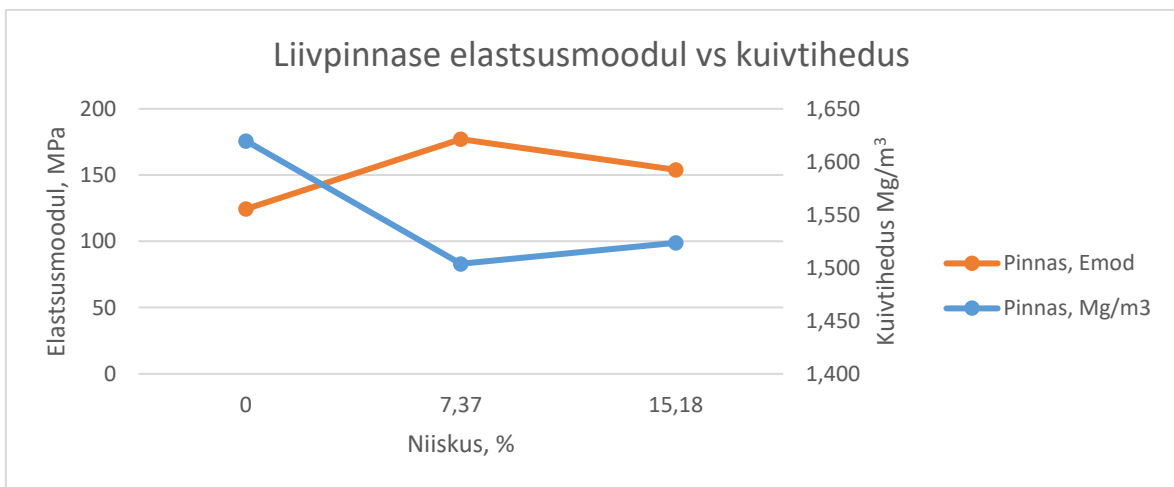
Üllatuslikult on kõige suurem kuivmahumass kõikide materjalide puhul kuivalt tihendamise korral. Joonised 7.30, 7.31 ja 7.32 illustreerivad erinevate materjalide puhul elastsusmooduli ja kuivmahumassi sõltuvust.



Joonis 7.30 V11 liiva elastsusmooduli ja kuivtiheduse suhe



Joonis 7.31 M8 liiva elastsusmooduli ja kuivtiheduse suhe



Joonis 7.32 Pinnase elastsusmooduli ja kuivtiheduse suhe

7.3.6 TTÜ laborikatsete kokkuvõte ja järeldused

Ameerika töödes leitud järeldus, et niiskuse tõustes kandevõime kahaneb, vastab käesoleva töö katsete põhjal osaliselt tõele. Ameerika töödes ei katsetatud täiesti kuiva materjaliga, mida aga käesolevas töös tehti. Tulemusi analüüsid on näha, et kui võrrelda niiskuvahemikku 7% kuni optimaalse veesisalduse lähedane niiskus, siis kaasneb kandevõime langus veesisalduse tõusu suurenemisega. Loodusliku liivpinnase ja V11 karjääriliiva puhul on 0% niiskusega kandevõime kõige madalam, vahepealse niiskusega kõige kõrgem ja optimaalsele lähenedes jälle langeb. M8 karjääriliiva puhul samuti kõige kõrgem elastsusmoodul vahepealse niiskussisalduse juures, küll aga 0% niiskusega on kandevõime suurem, kui 13,5% niiskuse juures. Piiratud aja ja ressursi tõttu ei teostatud katseid rohkemate veesisalduste juures, seega 100% tõest pilti need katsed ei anna. Et näha, millisel niiskusel on kõige kõrgem kandevõime ja millise puhul kõige madalam, tuleks teha tunduvalt rohkem katseid.

Leitud lõimiseteguri järgi on kõik katsetatud materjalid ühtlaseteralised ($Cu < 3$). Omakorda jagunevad M8 ja V11 materjal mõõdukalt ühtlaseteralisteks ($Cu 2...3$) ja looduslik liivpinnas väga ühtlaseteraliseks ($Cu < 2$) materjaliks. Graafikult 7.29 on näha, et M8 ja V11 materjalide kuivtihedused on ligilähedaselt samad ning loodusliku liivpinnase kuivtihedus oluliselt madalam. Seega võib järeldada, et mida eriteralisem on materjal, seda suurem on materjali kuivmahumass, mida rohkem on erineva mõõduga terasid, seda kompaktsem on materjali struktuur, peenikesed täidavad suuremamõõduliste terade vahel tekkivaid tühimikke ning seetõttu on tagatud ka suurem tihedus.

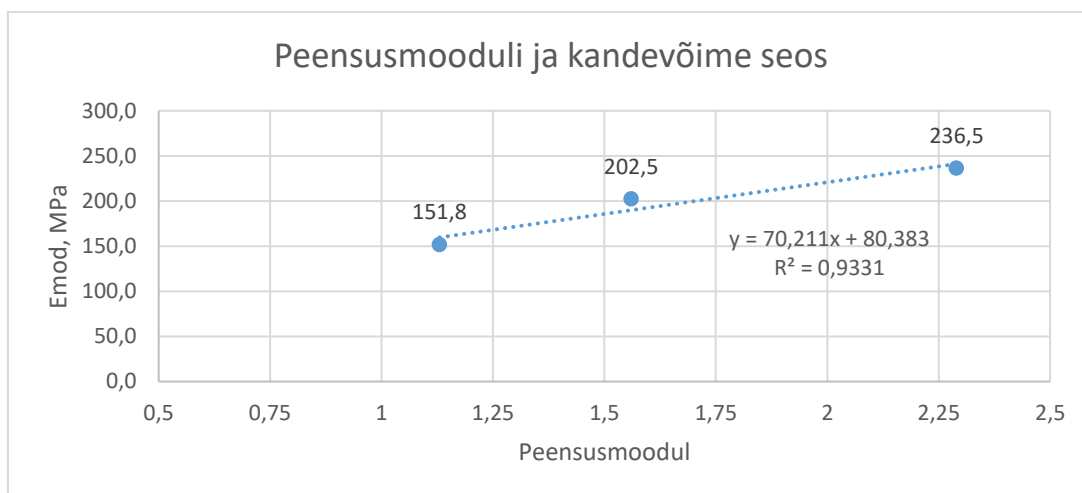
Lisaks lootus, et Kristiine linnaosast võetud looduslik liivapinnase peenosiste hulk on suur, ei realiseerunud. Kuna tegu on ilmselt vana merepõhjaga ja selle materjaliga, siis seal on peenosid ja tolm ära uhitud. Seega antud katsete käigus ei õnnestunud leida kandevõime sõltuvust peenosise sisaldusest. Küll aga võib vaadelda peensusmooduli mõju kandevõimele. Keskkonnaministeeriumi määruse nr 44 lisa 1 järgi liigituksid katsematerjalid peensusmooduli järgi vastavalt [29]:

- Pinnas Pm 1,13 – väga peen liiv
- V11 liiv Pm 1,56 – peen liiv
- M8 liiv Pm 2,29 – keskmine liiv

Nagu ka allolevast tabelist (7.10) näha, siis peensusmooduli ja kandevõime vahel on oluline seos, mida peenem on liiv, seda madalam on ka materjali kandevõime, ning peensusmooduli suurenemisega suureneb ka kandevõime.

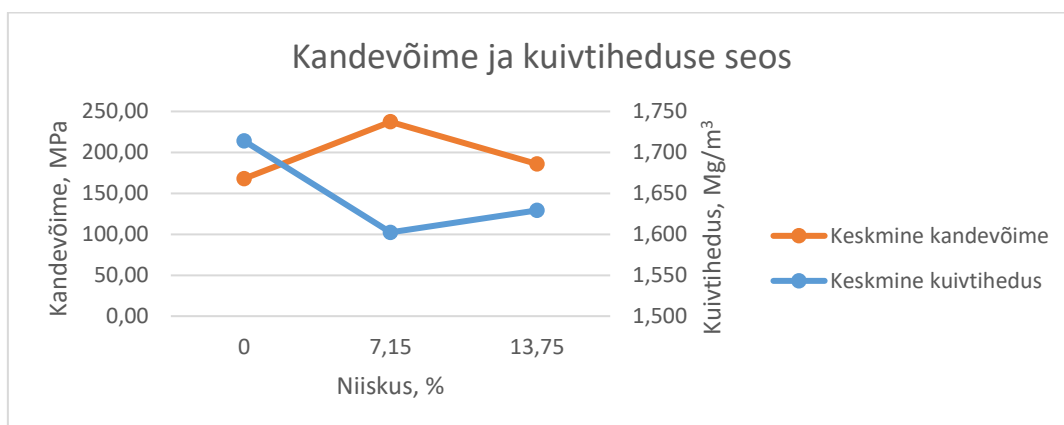
Tabel 7.10 Peensusmooduli ja kandevõime sõltuvus

Materjal	Pm	E, keskm, Mpa
Pinnas	1,13	151,8
V11	1,56	202,5
M8	2,29	236,5



Joonis 7.33 Peensusmooduli ja kandevõime sõltuvus

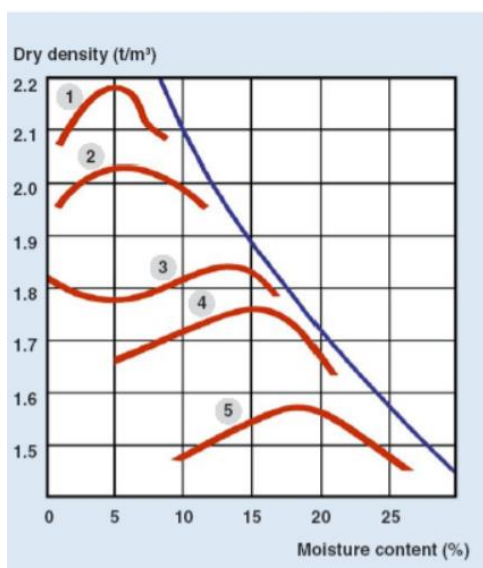
Huvipakkuvaks osutus tiheduse ja kandevõime vaheline seos. Eeldatavalt peaks olema kandevõime seda suurem, mida tihedam on materjal. Käesolevas töös katsetatud materjalide ja meetodikaga ilmnes seos, et kõige kõrgema keskmise kuivtiheduse puhul on keskmine kandevõime kõige madalam. Ja kõige kõrgem kandevõime on kõige madalama kuivtiheduse puhul.



Joonis 7.34 Keskmise elastusmooduli ja keskmise kuivtiheduse vaheline seos

Kuivtiheduse puhul antud katsete maksimaalne tihedus saadi kuiva materjali puhul. Osalt võib seda seost põhjendada ka kapillaarjõuga, V. Jaaniso on kirjutanud, et

kuivades või veeküllastunud liivades võivad pinnaseterade vahel sidemed täielikult puududa ja pinnase tugevuse määrab sellisel juhul ainult hõõrdejõud kontaktpunktides. Niiske liiva puhul tekivad osakeste kokkupuute kohtade ümber kapillaarjõu toimel meniskid, see põhjustab teradevahelise survejõu suurenemise, mis omakorda suurendab teradevahelist hõõrdejõudu ja ühtlasi ka pinnase tugevust tervikuna. Seetõttu võiks arvata, et kapillaarjõu tõttu on niiske liiv halvasti tihenev võrreldes kuiva liivaga. [2] Antud materjalide puhul ei saa küll väita et kuiva liiva tihendades saavutatakse materjali maksimaalne kuivtihedus. Kuiva liiva tihendades saadi suurem kuivtihedus, kui keskmiselt niiske ja optimaalse veesisalduse lähedase niiskusega, kuid kuna täpset optimaalse veesisalduse numbrit ei otsitud, siis ei ole ka teada ka absoluutne maksimaalne kuivtihedus. Käesolevas töös kasutatud liivade kuivmahumasside võrdlus erinevate niiskuste korral kattub „Pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhises“ välja toodud graafikuga, kus on erinevate pinnaste Proctor-kõverad kajastatud, alloleval graafikul 7.34 kajastab Proctor-kõver nr 3 ühtlase liiva kõverat. Ka sellest graafikust nähtub, et kaks kõige suuremat kuivtihedust on kuiva materjali puhul ja optimaalse veesisalduse puhul ning antud graafik kattub käesolevas töös leitud osalise kõveraga.



Joonis 7.35 Erinevate liivade kuivtihedused [6]

Väidet, et niiske liiva puhul kapillaarjõududest tekkinud meniskid, mis suurendavad teradevahelisi hõõrdejõudu ja seeläbi ka materjali tugevust [2], iseloomustab käesoleva töö katsetes see, et materjalide mõõdetud elastusmoodulid on kuiva materjali puhul kõige madalamad ja keskmise niiskuse juures kõige suuremad.

8 IDEED EDASISTEKS UURIMUSTÖÖDEKS

Kuna käesoleva magistritöö kirjutamisega ja katsetega alustati juba 2018. aastal ning töö lõpetamine toimus 2021. aastal, siis töö fookus muutus algsest hüpoteesist „3% muutust optimaalsest niiskusest ühele või teisele poole muudab elastusmoodulit 30% „ pigem katsetele Proctor-vormis kandevõime mõõtmisele ning selle meetodika põhjalikumale uurimisele. Seoses magistritöö tegemiseks piiratud ressursiga ei saavutatud kogu püstitatud eesmärki. Täpsemat uurimist vajaks peenosise mõju kandevõimele erinevate niiskuste juures. Lisaks peaks teostama suuremal hulgal katseid objektidel, mõõta objektidel tegelikku materjali niiskust ning proovivõtukohas kandevõimet ja seeläbi püüda leida seost veesisalduse ja kandevõime vahel reaalses oludes. Laboris kontrollitavates oludes võivad tulemused erineda objektidel mõõdetavatest, sest välikatsetel on rohkem muutujaid, mis mõjutavad ning millega peab arvestama. Ameerika töödest pärit meetodika, kasutamaks LWD seadet vastuvõtukatsetes tihenduskontrolliks, tundub käesoleva töö autori sõnul liialt ressursi- ja ajamahukas ning ei ole põhjendatud, on olemas palju kiiremaid ja lihtsamaid lahendusi tihendusteguri määramiseks.

LWD seadmega Proctor-vormis kandevõime mõõtmine avab võimaluse võrrelda samades tingimustes erinevate materjalide tugevusnäitajaid. Lisaks tasuks uurida ka meetodikat, et teatud veesisalduse juures teostatakse tihendamine ning mõõdetakse kandevõimet, seejärel jäetakse materjal vormis puutumatuult kuivama või siis uputatakse vette ning seejärel mõõdetakse uuesti kandevõimet ilma uue tihendamiseta. See peaks andma ülevaate, kuidas materjal käitub hilisema veesisalduse kõikumise juures. Antud töös jäi see katsetamata, sest selline katse vajaks suuremal hulgal Proctor vorme, mida käesolevas töös ei olnud võimalik kasutada.

KOKKUVÕTE

Dreenkihi ja muldkeha peamiseks kvaliteeti määravaks teguriks on materjali enda omadused, peenosise sisaldus, huumuse sisaldus, peensusmoodul ja lõimistegur. Lisaks eelpool loetletud kihtide kvaliteeti näitavaks teguriks on konstruktsiooni paigaldamise järgne tihendustegur ja elastsusmoodul, need sõltuvad suuresti materjali veesisaldusest antud konstruktsiooni paigaldamise ja tihendamise hetkel. Eestis kehtivates juhendites on peaaegjalikult välja toodud, et dreenkihi ja muldkeha materjalide tihendamine peaks toimuma materjali optimaalse veesisalduse juures, saavutamaks parimad tulemused.

Käesoleva magistr töö peamine eesmärk oli välja selgitada kuidas erinevad veesisaldused materjali tihendamisel mõjutavad erinevate materjalide mõõdetavat kandevõimet.

Käesoleva tööga saab järeldada seda, et ühtlaseteraliste ($Cu < 3$) liivade kandevõimed käituvad veesisalduse muutustele ühesuguse mustri järgi. Kuiva materjali puhul on kandevõime kõige madalam, keskmise niiskuse juures kõige kõrgem ning optimaalsele veesisaldusele lähenedes kandevõime langeb. Erinevate materjalide kandevõime vahe tekib peensusmoodulist, mida peenem on liiv, seda madalam on kandevõime ning peensusmooduli tõusuga kasvab ka kandevõime. Kuivtiheduse erinevus tuli välja, kui vaadelda lähemalt lõimistegurit. Väga ühtlaseteralise ($Cu < 2$) kuivtihedus on selgelt väiksem, kui mõõdukalt ühtlaseteralistel ($Cu 2 \dots 3$) liivadel.

Kui välitingimustes LWD seadmega konstruktsioonikihtide kandevõimet mõõta, siis lisaks mõõdetavale kihile mõjutab kandevõimet ka alumiste kihtide näitajad. R. Kopti magistr töö 2019. aastal uuriti LWD seadme mõjuulatust ning leiti, et see on ca 60 cm katsetatavast pinnast allapoole, seega haarab mõõtepiirkond ka alumisi kihte. Konstruktsioonikihid on valdavalt õhemad, seetõttu näiteks dreenkihi pealt mõõtes mõjutab mõõtetulemust ka aluspinnas ning olenevalt aluspinnasest võivad mõõtetulemused suuresti varieeruda. Seetõttu on Proctor-vormis mõõtmine kasulik, sest selline meetodika avab võimaluse leida vaid uuritava materjali reaalsed tugevusomadused ning erinevate materjalide omadusi võrrelda võrreldavates oludes. Matest vibroseade annab vormis tihendamise võimaluse sellisteks katseteks välitingimustes. Lisaks annab Proctor-vorm võimaluse lühikese ajaga teostada mõõtmised erinevate niiskuste juures. Ning niiskuse määramine portatiivse PCE-MA202 seadmega võimaldab seda teha otse objektil lühikese ajaga – ca 10-45 minutit olenevalt materjalist ja veesisaldusest.

SUMMARY

Effect of moisture content on bearing capacity of sands

The main determining factor for the quality of the drainage layer and the embankment is the properties of the material itself, the content of fine matter, the content of humus, the fineness module and the uniformity coefficient. In addition to the factor indicating the quality of the layers listed above, the compacting factor and elasticity module after installation of the structure, they largely depend on the water content of the material at the moment of installation and compacting of the given structure. The guidelines in force in Estonia mainly state that the compacting of the materials of the drainage layer and the embankment should be carried out at the optimum water content of the material in order to achieve the best results.

The main purpose of this master's thesis was to find out how different water content when compacting material affects the measurable bearing capacity of different materials.

This work concludes that the bearing capacity of uniform grain ($C_u < 3$) sands behaves according to the same pattern to changes in water content. In the case of dry material, the bearing capacity is the lowest, at average humidity the highest, and when approaching the optimum water content, the load capacity decreases. The difference in the bearing capacity of different materials arises from the fineness module, the finer the sand, the lower the load capacity, and with the increase of the fineness module, the load capacity also increases. The difference in dry density came out when looking more closely at the uniformity coefficient. The dry density of a very uniform grain ($C_u < 2$) is clearly lower than that of moderately uniform ($C_u 2-3$) sands.

Suppose outdoors, for example, the load capacity of the structural layers with the LWD device is measured. In addition to the layer being measured, the load capacity is also influenced by the characteristics of the lower layers. R. Kopti's master's thesis in 2019 examined the range of impact of the LWD device and found it to be about 60 cm below the surface under test, so the measuring range also grabs the lower layer, the structural layers are predominantly thinner, therefore, for example, when measuring from a drainage layer, the measurement result is also impacted by the substrate, and depending on the substrate, the measurement results may vary greatly. Therefore, measurement in Proctor mold is useful, since such a methodology opens up the possibility of finding only the actual strength characteristics of the test material and comparing the properties of the different materials in comparable circumstances. The Matest vibratory device provides the possibility of compacting in the form for such tests

outdoors. In addition, the Proctor mold provides an opportunity to carry out measurements at different humidities in a short time. And determining humidity with a portable PCE-MA202 device allows you to do this directly on the site in a short time – approx. 10-45 minutes depending on the material and water content.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Eesti Keele Instituut, „Eesti keele seletav sõnaraamat,“ Eesti Keele Instituut, 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://eki.ee/dict/ekss/index.cgi?Q=pinnas>.
- [2] V.Jaaniso, „Pinnasemehaanika inseneridele“.
- [3] A.Aavik, „Õppematerjal: tee-ehitus tehnoloogia,“ 2018.
- [4] S.Sillamäe, „Muldkehades ja drenikihtides kasutatavate mineraalmaterjalide veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega,“ Maanteeamet, Tallinn, 2016.
- [5] A.Aavik, „Õppematerjal: Tee-ehitus I, Pinnaste tihednamise kontroll. Pinnaste omaduste laboratoorne määramine,“ 2017.
- [6] Maanteeamet, „Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised,“ Maanteeamet, 2006.
- [7] Riigiteataja, „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded,“ 23 11 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107082015001?leiaKehtiv>.
- [8] Maanteeamet, „Killustikust katendikihtide ehitamise juhised,“ Maanteeamet, 2016.
- [9] Maanteeamet, „Muldkeha ja drenikihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised,“ 2016.
- [10] Tallinna Linnavalitsus, „Sillutiskivi, asfalt- ja tsementbetooniga teede ja tänavate tüüpkatendikonstruktsioonide projekteerimisele, rajamisele ja remondile esitatavad nõuded,“ Tallinna Linnavalitsus, 2019.
- [11] S. Khosravifar ja Z. Afsharikia, „Standardizing LightWeight Deflectometer Modulus Measurements for Compaction Quality Assurance,“ Maryland Department of Transportation, 2017.
- [12] Z.Afsharikia, „Modulus based compaction quality assurance for unbound materials using Light Weight Deflectometer,“ University of Maryland, Ameerika Ühendriigid, 2019.
- [13] S. Khosravifar, „Large-Scale Vontrolled-Condition Experiment to Evaluate Light Weight Deflectometers for Modulus Determination and Compaction Quality Assurance of Unbound Pavement materials,“ University of Maryland, Ameerika Ühendriigid, 2015.
- [14] V.Jaaniso, „Geotehnika. Laboritööde juhend,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2013.
- [15] Ohaus, „Instruction Manual MB45 Moisture Analyser“.
- [16] Troxler Electronic Laboratories INC., „Manual of Operation and Instruction. Troxler 3440 Surface Moisture-Density Gauge“.
- [17] Virginia DOT, „Field Moisture and Density Testing with the Nuclear Gauge,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.virginiadot.org/VDOT/Business/asset_upload_file705_118183.pdf.
- [18] Decagon Devices Inc., „GS1 Soil Moisture sensor Operator's Manual,“ 2015.
- [19] Dynatest, „Dynatest Light Weight Deflectometer Owner's Manual,“ 2015.
- [20] R.Eichfuss, „Tee konstruktsiooni kihtide kandevõime ja selle mõõtmine seadmega Dynatest LWD,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [21] R.Kopti, „Geosünteedide mõju katendikihtide kandevõimele ja ettepanekud kvaliteedikontrolli nõuete korrigeerimiseks,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2019.
- [22] R.Renter, „Liiva ja killustiku segude elastsusmoodulid,“ Tallinna Ülikool, Tallinn, 2019.

- [23] „Testing procedures and testing equipment – Plate load test, English translation of DIN 18134:2012-04.,” 2012.
- [24] Teede Tehnokeskus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.teed.ee/teenused/katsetamine-ja-mootmine/mootmine/kandevoime/plaatkoormuskatse/>.
- [25] PCE Instruments UK Ltd., „Absolute Moisture Balance PCE-MA Series Manual,” 2018.
- [26] H.Pajus, „Meetod täitematerjali vertikaal- ja horisontaalsuunalise filtratsioonimooduli määramiseks püsiva rõhuga permeameetriga,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.
- [27] Matest, „Matest tootekataloog,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.matest.com/en/product/s197n1-vibrating-compaction-hammer>. [Kasutatud 10 03 2021].
- [28] B.Steinert, „Portable Falling Weight Deflectometer Study,” University of maine, Ameerika Ühendriigid, 2005.
- [29] Riigiteataja, „Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord,” 11 06 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/905848>.