



TALLINNA  
TEHNIKA KÕRGGKOOI

Pärtel Sarap

# LIIVPINNASTE TIHENDUSTEGURITE MÄÄRAMISE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2024



**Pärtel Sarap**

# **LIIVPINNASTE TIHENDUSTEGURITE MÄÄRAMISE ANALÜÜS**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Teedehituse õppekava

Juhendaja: Sven Sillamäe, *MSc*

Tallinn 2024

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Pärtel Sarap

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

### **Liivpinnaste tihendustegurite määramise analüüs**

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

### **Autorideklaratsioon**

Mina, Pärtel Sarap

tõendan/tõendame, et lõputöö on minu/meie kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Juhendaja **Sven Sillamäe**

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

*(kuupäevad digiallkirjades)*

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1 TIHENDAMISTEORIA .....	7
1.1 Olemasolev olukord .....	7
1.2 Pinnaste geotehnilised omadused ja mõisted .....	7
1.3 Tihendusmasinate käsitus.....	8
1.4 Tihendamisnõuded .....	8
1.5 Tihendamistehnoloogiad.....	9
1.6 Pinnaste tiheduse kontroll .....	9
2 MÕÕTESEADMED .....	11
2.1 Penetromeeter .....	11
2.1.1 Standardid .....	11
2.1.2 Seadme kirjeldus .....	11
2.1.3 Mõõtmisprotsess.....	11
2.1.4 Katsemõõtmiste analüüs.....	12
2.1.5 Mõõteseadme valik .....	12
2.2 Dünaamilised mõõteseadmed .....	13
2.2.1 Inspector 3 ja 4 .....	13
2.2.2 Loadman mõõteseade .....	14
2.3 Staatiline mõõtemetod .....	15
2.3.1 Plaatkoormuskatse.....	15
2.4 Mahumassi meetod .....	16
2.4.1 Liivakoonuse meetod.....	16
2.4.2 Kummiballooni meetod .....	17
2.4.3 Lõikerõnga meetod .....	18
2.4.4 Kiirendatud meetod liivpinnastele .....	18
2.5 Pinnaserulli CCC-süsteem.....	19
2.5.1 Standardid .....	19
2.5.2 Hamm Smart Doc .....	19
2.5.3 CCC-süsteem .....	19
2.5.4 Pinnaserulli kalibreerimine .....	20
3 MÕÕTMISKATSETUSED .....	22
3.1 Katsetuste asukoht.....	22
3.2 Kvaliteedinõuded.....	22

3.3	Mõõtmisseadmed .....	23
3.4	Mõõtmiskatsete kirjeldus.....	23
3.5	Katseplaan .....	23
3.6	Mõõtmistulemused Inspector 4 seadmega .....	24
3.7	Mõõtmistulemused plaatkoormuskatsega .....	25
3.8	Mõõtmistulemused mahumassi meetodil .....	27
3.9	Pinnase Proctor-teimi ja sõelkõvera tulemused.....	28
3.10	Ettepanekud .....	28
	KOKKUVÕTE .....	30
	SUMMARY .....	32
	VIIDATUD ALLIKAD.....	33
	LISAD .....	365
	LISA 1. Tihendamisprotsessi PDF aruanne .....	37
	LISA 2. Dünaamilise penetromeetri süvituslöökidele vastav tihedustegur .....	38
	LISA 3. INSPECTOR 4 mõõtmisseeriade tulemused .....	39
	LISA 4. HAMM CCC-SÜSTEEMI loodud tihendamisprotsessi raport.....	40
	LISA 5. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused esimeses mõõtepunktis .....	41
	LISA 6. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused teises mõõtepunktis.....	42
	LISA 7. Pinnase tiheduse määramine liivakoonuse meetodiga katseprotokoll .....	43
	LISA 8. Pinnase proctor-teimi ja sõelkõvera proovivõtu protokoll .....	44
	LISA 9. Proctor-teimi ja sõelkõvera katseprotokoll .....	45

## SISSEJUHATUS

Muldkeha ehitusmaterjalide tihenduse kontrollimiseks on kasutusel erinevaid seadmeid. Eestis on enim levinumateks liiv- ja kruuspinnaste kontrollseadmeteks Inspector 3 ja 4, plaatkoormuskatse ning penetromeeter. Antud mõõteseadmete puuduseks võib lugeda asjaolu, et mõõtetulemused kirjeldavad tihendustegurit vaid konkreetsetes mõõtepunktis. Sellest tulenevalt ei ole võimalik saada täielikku ülevaadet muldkeha ühtlasest tihendatusest.

Üheks võimalikuks meetodiks pinnaste ühtlase tiheduse kontrolliks on näiteks pinnaserullide CCC-süsteemi kasutamine (*Continuous Compaction Control*). Antud süsteemiga on võimalik tihendamisprotsessi vältel kontrollida kogu tihendatavat ala. Eestis ei ole antud meetod laialdaselt kasutusel, kuid selle meetodi kasutuselevõtt võimaldaks muuta muldkeha tiheduse kontrollimisprotsessi efektiivsemaks. Antud meetodi kasutuselevõtt aitaks parandada ehitatava muldkeha tihendamisprotsessi kontrollimise kvaliteeti. Tänu sellele oleks võimalik ennetada hilisemate defektide teket teekatendis. Samuti aitaks sellise kontrollimeetodi kasutuselevõtt kiirendada ka ehitusprotsessi.

Antud lõputöö põhieesmärgiks oli analüüsida ning võrrelda Eestis enam levinud muldkeha pinnaste tihenduskontrolli seadmeid tihendamiseks kasutatavate pinnaserullide CCC-süsteemiga. Selleks viidi läbi liiv- ja kruuspinnaste tihendamise katsetused Krei külas Sutika teel asuval ehitusobjektil. Katsemõõtmisteks kasutati CCC-süsteemi, plaatkoormuskatset, liivakoonust ning Inspector 4 mõõteseadet.

Lõputöös teostatavate katsetuste eesmärgiks on eelduse loomine pinnaserullide CCC-süsteemide (*Continuous Compaction Control*) laialdasemalt kasutuselevõtuks. Antud tihendamismeetodi kasutuselevõtt võimaldab ehitustööde käigus muldkeha tiheduse pidevat kontrollimist. Samuti aitaks see kiirendada rajatava muldkeha tehnoloogiliste kihtide üle andmise protsessi tellijat esindavale järelevalvet teostavale insenerile. Katsetulemuste põhjal tehti järeldused kuidas muuta tiheduse mõõtmise protsessi efektiivsemaks. Lisaks andis autor omapoolsed soovitused, milliseid muudatusi tuleks tihenduskontrolli ja tihendusprotsessis teha.

Lõputöö jaguneb kolmeks eraldiseisvaks osaks. Esimene osa käsitleb endas tihendamisteooriaga seotud mõisteid, nõudeid ning kasutatavate mõõteseadmete kirjeldust. Teises osas on kirjeldatud katsemõõtmiste asukohta, katsetamiseks kasutatud mõõteseadmeid ning katsemõõtmise protsessi. Viimane osa koosneb katsetulemuste analüüsist, tehtud järeldustest ning ettepanekutest.

# 1 TIHENDAMISTEORIA

## 1.1 Olemasolev olukord

Hetkel juhendatakse pinnase tihendamistööl 2006 aastal koostatud juhendist „Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend.“ Lisaks sellele on kirjeldatud muldkeha tiheduse nõudeid kihi paksuse, tiheduse kontrolli ja kontrolli sagedust määruses „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“. [1] Täitematerjalide sobilikkusele vastavust ja tihendamistehnoloogiad on määratletud EVS-EN 16907-5 standardi poolt [2].

## 1.2 Pinnaste geotehnilised omadused ja mõisted

Pinnaste geotehnilisteks omadusteks loetakse peamiselt järgnevaid omadusi: [3]

- pinnase terastikuline koostis, ehk lõimis, millega määratakse eri suurusega fraktsioonide sisaldus;
- veejuhtivus;
- külmakerkeohtlikkus;
- sisehõrdenurk;
- Elastsusmoodul (MPa) on iseloomustav suurus, millega näidatakse pinge ja sellele vastava elastse deformatsiooni suhet.

**Voolavuspiir (wL)** iseloomustab vajalikku vedeliku kogust, et savikas pinnas muuta pehmest voolavaks.

**Granulomeetriselised fraktsioonid** erineva terasuurusega osakesed, mis sisalduvad pinnases.

**HMV (*Hamm Measurement Value*)** väärtus iseloomustab pinnase jäikuse suurenemist, kasutades tihendamiseks pinnaserulli.

**Tihendustegur** iseloomustab pinnase tegeliku mahumassi suhet etalonkuivmahumassiga.

**Proctorteim** on katsemeetod, mille eesmärgiks on leida materjali maksimaalne kuivtihedus ja optimaalne veesisaldus.

**Muldkeha** on pinnase konstruktsioon koos selle juurde kuuluvate veeviimaritega. Muldkehale rajatakse katend koos teele kuuluvate rajatiste ning kõrgusmärkidega.

### **1.3 Tihendusmasinate käsitus**

Muldkeha tihendamiseks on vajalik valida õiget tüüpi tihendusmehhanism. Mehhanismi valides tuleb arvestada tihendatava kihi paksusega ja pinnase omadustega. Peamiselt kasutatakse muldkehade tihendamiseks tapp- ja vibrorulle. Vibrorull sarnaneb tööpõhimõttelt staatilisele pinnaserullile, kuid vibrorullile on lisatud valtsis pöörlev ekstsentriline koormus, mida iseloomustatakse sageduse ja amplituudiga. Silevaltsrullid tekitavad pinnasele staatilist koormust, dünaamilist impulssi ning vibratsiooni. Kõige paremini sobivad vibrorullid liiv- ja kruuspinnaste tihendamiseks. Tihendamisprotsessi käigus on vajalik jälgida et, sõltuvalt pinnase tüübist ning tihendamiseks kasutatava mehhanismist ei ületaks kihipaksus optimaalset piiri. [4]

Tapprullid sobivad sidusate pinnaste tihendamiseks. Antud tüüpi rull ei sobi tihedate ja tükki kuivanud pinnaste puhul, kui rull ei ole suuteline pinnasetükke purustama. Tapprullide puhul on vajalik arvestada, et tulenevalt juhendist „Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend“ on optimaalne tihendatav kihipaksus ligikaudu 20-30 cm. Olukorras, kus pinnase tihedus on saavutatud, ei tungi rulli tapid enam pinnasesse. Sellisel juhul tuleb pealiskiht tihendada mõne teist tüüpi rulliga, näiteks silevaltsrulliga. [4]

### **1.4 Tihendamisnõuded**

Mullatööde tihendamisnõuded on välja toodud juhendis „Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend“. Antud juhises on kirjeldatud pinnastele sobivaid tihendusmehhanisme, tihendatava kihi minimaalseid paksuseid ning minimaalseid rullimise läbikute arve. [5]

Lisaks on majandus- ja taristuministri poolt koostatud määruses „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ kirjeldatud muldkehale esitatavaid nõudeid, näiteks tiheduse kontrolli sagedus, ehitatavate kihtide paksused ja tihendustegur. Nende kontrolliks kasutatavate mõõteseadmete ning katendi paigaldamise näol. Määruse kohaselt teostakse muldkehal, mille kõrgus on alla 3 m, tiheduse kontrollmõõtmisi iga 100 m tagant. Muldkehal kõrgusega üle 3 m, tuleb kontrollmõõdistusi teha iga 50 m tagant. Ehitatavate kihtide kihipaksus võib olla maksimaalselt 0,3 m kui katendi paigaldamine muldkehale toimub enne ühe aasta möödumist selle üleandmisest insenerile. Tihendusteguri leidmiseks muldkeha pinnalt on ette nähtud Inspector või Loadman tüüpi seadmete kasutamine. Kasutades mõnda teist tüüpi mõõteseadet tihendusteguri leidmiseks, tuleb võrrelda lugemeid Inspector-tüüpi seadmega ning korrutatada need üleminekuteguriga. [1]

## 1.5 Tihendamistehnoloogiad

Pinnaste algne tihedus sõltub mulde ehitamise meetodist. Buldooseriiga ehitades on see 0,7- 0,8 ning kallurautode, poolhaagete ja skreeperitega ehitades on see 0,85-0,9 pinnase maksimaalsest tihedusest. Täiendavate tihendusmehhanismide kasutamine on vajalik, et pinnas tiheneks nõuetes esitatud piirväärtuseni, milleks on 0,95-1. Peamiseks faktoriks, mis määrab tihendamisprotsessi kvaliteedi on pinnases sisalduv vesi. Tihendatava kihi paksus sõltub pinnase niiskussisaldusest ja tihendamiseks kasutatavatest mehhanismidest. Mulle tuleb tihendada ühtlaselt kogu kihi laiuses. Tihendades kihte ebaühtlaselt võib tekkida hilisemalt mulde vajumine ning see omakorda võib põhjustada defekte teekattele. Samuti võib ebaühtlasi vajumisi põhjustada ka mittepiisav tihendamine. [4]

Järgmist korduslähikut võib pinnaserulliga alustada peale seda, kui muldkeha on kogu laiuses juba ühe korra tihendatud. Olukorras kus tihendatakse kobedat pinnast on vajalik kasutada lisaks põhimehhanismidele ka abimehhanisme näiteks vibroplaate, millega teostatakse pinnase eeltihendamine. Eeltihendamine ei ole vajalik, kui mullatöömehhanismid ja vedukid liiguvad ühtlaselt kogu mulde laiuses. Kasutades abitihendamismehhanisme väheneb põhimasinat vajalike korduslähikute arv, millega saavutatakse rahaline ja ajaline kokkuhoid. Siinkohal tuleb abimehhanismidega teostada 30-40% üldisest vajaminevast lähikute arvust. Pinnase tihendusprotsessi on võimalik muuta peale abimasinate kasutamise ka pinnasekihi paksuse vähendamisega, korduslähikute arvu suurendamisega ning pinnasele vastava rullitüübi valikuga. [4]

## 1.6 Pinnaste tiheduse kontroll

Pinnaste tiheduse kontrolli nõudeid on kirjeldatud määruses „Teehoiutööde tehnoloogianõuded“. Antud määrus näeb ette et, muldkeha tihendamist kontrollitakse vastavalt projektis esitatud nõuetele. Juhul kui projektis puuduvad nõuded tihendamise kontrollimiseks, tuleb teostada kontroll muldkehal, kuni 3 m kõrgusega, iga 100 m tagant. Muldkehal kõrgusega üle 3 m, tuleb seda teostada aga iga 50 m tagant. [6] Liivpinnaste tihendustegur peab vastama joonisel (Joonis 1) toodud nõuetele. Teistest pinnastest ehitatud muldkeha kihtide elastsusmoodulit kontrollitakse Inspector või Loadman tüüpi seadmega. Oluline on jälgida, et elastsusmoodul vastaks projektis esitatud nõuetele. [4]

Muldkeha kiht	Kihi sügavus h teekatte pinnast, m	Vähim lubatud tihendustegur*	
		Kiirteed, I ja II klassi teed ja magistraaltänavad	Kõik teed, välja arvatud kiirteed, I ja II klassi teed ning magistraaltänavad
Ülakiht (töökiht)**	$H_k + 0,4$	1,00	0,98
	$H_k + 0,4 \leq h < 1,5$	0,98	0,96
Mitteüleujutatav alakiht	$h > 1,5$	0,98	0,95
Üleujutatav alakiht	$h > 1,5$	0,98	0,95
Süvendi töökiht	$h \leq 1,2$	0,95	0,95

\* Tihendustegur on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe.

\*\*  $H_k$  – katendi paksus, m.

Joonis 1. Liivpinnaste vähim lubatud tihendustegur [1]

## 2 MÕÖTESEADMED

### 2.1 Penetromeeter

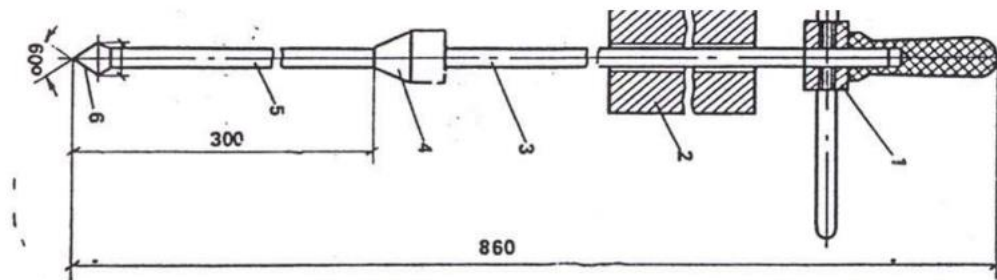
#### 2.1.1 Standardid

Kasutades pinnaste tiheduse kontrolliks penetromeetrit on vajalik esmalt veenduda, et seade vastaks standardile EN ISO 22476-2. Selles standardis on ära määratud katsetamise nõuded, mõõteseadme seisukord ja mõõteprotokolli koostamise kord. [7]

#### 2.1.2 Seadme kirjeldus

Eestis kasutatakse dünaamilist penetromeetrit (Joonis 2) erineva terakoostisega liivpinnaste tiheduse kontrolliks. Penetromeeteri osadeks loetakse järgnevaid detaile [4]:

1. käepide;
2. langev raskus massiga 2,5 kg;
3. raskust juhtiv varras;
4. alus, mis võtab vastu löögi raskuse;
5. tööotsiku varras, maksimaalse diameetriga 16mm;
6. tööotsiku koonus, 60° nurgaga;



Joonis 2. Penetromeetri detailide joonis [4]

#### 2.1.3 Mõõtmisprotsess

Enne pinnaste tiheduse kontrollimist tuleb veenduda, et mõõteseadme oleks töökorras. Mõõtmise teostamise hetkel peab seade olema võimalikult vertikaalses asendis ning seadet tuleb hoida stabiilselt paigal. [7] Mõõtmise tarbeks süvistatakse labidaga pinnasesse 10 cm avaus, sellega eemaldatakse kobe või ületihendatud kiht. Seejärel asetatakse seade tööotsiku varda otsas olev koonus avausse ning penetromeetri laengeva raskuse abil süvistatakse

tööotsiku varras pinnasesse kuni 20 cm. Seejärel alustatakse löökide loendamise, mis kuuluvad tööotsiku varda jõudmiseks 30 cm sügavusele mõõdetavasse pinnasesse. [4] Juhul, kui on vajadus teostada veel mõõtmisi samas asukohas, siis tuleb eelnevalt veenduda, et mõõtmiskohad ei asuks üksteisele lähemal, kui 30 cm. Kõik saadud katsetulemused kantakse mõõteprotokollis ning selle abil leitakse löökide arvule vastav tihendustegur vastavast tabelist (Lisa 2). [8]

#### 2.1.4 Katsemõõtmiste analüüs

Tulenevalt kontrollkatsest saadud löökide arvust, tuletatakse alltoodud tabeli põhjal pinnase tihendustegur (Lisa 2). Tabelit analüüsid on võimalik veenduda tihendustööde kvaliteedis ja selle tulemuse põhjal teha edasine tihendustööde plaan. [8]

Pinnase tihendustegurit on võimalik leida ka kasutades arvutusvalemit. Antud valemi (1) kasutamise puhul tuleb arvestada asjaoluga, et saadud tulemus võib tihendustegurit kohati üle- ja alahinnata. [3]

$$P_d = K * E * N_{20-30} / h, \quad (1)$$

kus

- K- tegur, mis arvestab löögi energiakadu;
- $N_{20-30}$ - löökide arv, mis on vajalik koonuse süvistamiseks pinnasesse 20-30 cm;
- E- tegur, mis arvestab löögi energiakadu;
- h- koonuse süvistamissügavus, 10 cm.

#### 2.1.5 Mõõteseadme valik

Sõltuvalt pinnasest tuleb valida sobiv mõõtesead. Penetromeeter on sobilik peen-, kesk- ja jämedateraliste liivpinnaste kontrolliks. Lisaks on antud seade sobiv ka möllikate pinnaste mõõtmiseks. Seade ei sobi kasutamiseks materjalide puhul, mille koostisest üle 25% moodustavad terad suurema läbimõõduga kui 2 mm. Lisaks ei tohi olla kontrollitav pinnas külmunud ega liigniiske.

## 2.2 Dünaamilised mõõteseadmed

### 2.2.1 Inspector 3 ja 4

Inspector tüüpi mõõteseadmed ei ole ühegi EVSi standardiga reguleeritud. Siiski Inspector tüüpi seadmega liivpinnaste kontrolli teostamisel tuleb lähtuda määruses „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ ning selle lisa 6 olevast liivpinnasest muldkeha vähimast lubatud tihendustegurist, sõltuvalt muldkeha kihist ning tee klassist. [1]

Antud seadmega mõõtmiseks teostatakse ühes ja samas punktis kaheksa katsekordust, kus katse tulemuste põhjal arvutab seade välja nii tihendusfaktori kui ka kandevõime väärtused. Selleks leiab seade 6, 7 ja 8 katsetulemuste keskmise väärtuse. Seejärel leitakse jagamistehte abil teise katsetulemuse ja eelnevalt leitud keskmise väärtuse omavaheline suhe. [9]

Seadmed on varustatud 10 kg kaaluva raskusega mille kukutamisel pinnasega kokkupuutuvalle tallale arvutab seade tihendusfaktori ja kandevõime väärtuse. Inspector tüüpi mõõteseadmed on 1150 mm kõrged ja seadme alumiiniumkorpus on mõõtudega 110x110 mm. Erinavalt Inspector 3 mõõteseadmele on Inspector 4 mõõteseadmele arenduse käigus lisatud juurde võimekus kuvada mõõtetulemusi mobiiltelefonis ja edastada andmeid e-maili vahendusel ning lihtsustatud on ka elektroonikamooduli eemaldamine seadme küljest. [9]

Mõõtes pinnaste tihendusfaktorit Inspector tüüpi seadmetega, kuvatakse mõõtetulemused ekraanile. Tulemustena kuvatakse tihendusfaktor, millel ühik puudub ning kandevõime väärtus, mille ühikuks on MPa. Tähtis on eristada tihendusfaktorit tihendustegurist, viimane kuvatakse alles e-mailile saadetas andmefailis. Alltoodud fotol (Foto 1) on näha Inspector 3 seadmes kuvatavad mõõtetulemused. Fotol kuvatavate andmete põhjal on võimalik väita, et pinnase kandevõimeks Ek on 125 MPa, mis on muldkeha aluskihtide ehitamisel enam kui nõutud 65 MPa, samuti on kuvatud tihendusfaktor Tf 0,98. Tihendusfaktori ja kandevõime võrdlemisel, on tuletatavaks tihendusteguriks Kc 0,99.



Foto 1. Mõõtmisseeria tulemuste kuvamine Inspector 3 seadmes [10]

### 2.2.2 Loadman mõõteseade

Loadman tüüpi mõõteseade on väljatöötatud Soomes, et mõõta pinnase maksimaalset deformatsiooni, elastsusmoodulit, koormuskestust ning tihendustegurit. Loadman seadmega on võimalik teha katsetusi igas muldkeha kihis. Seade sarnaneb Eestis toodetava Inspector tüüpi seadmega ehituse ja tööpõhimõtte poolest. Siiski ei ole Loadman Eestis laialdaselt kasutusel. Sarnaselt Inspectorile on ka antud seda kasutajasõbralik. Seade kajastab kiirelt katsetulemused kuid on hinna poolest kallim kui näiteks Inspector mõõteseade. Alltoodud joonisel (Joonis 3) on kujutatud Loadman tüüpi mõõteseadet. [4]



Joonis 3. Loadman mõõteseade [4]

## 2.3 Staatiline mõõtemeetod

### 2.3.1 Plaatkoormuskatse

Antud katsemeetod on reguleeritud standardi EVS 934:2016 poolt. Plaatkoormuskatset (Joonis 4) kasutatakse vajumi sõltuvust koormusest määramiseks. Mõõtmistulemuste põhjal tuletatakse koormus-vajumi graafik mille alusel saadakse elastsusmoodul  $E_v$  ning aluse reaktsioonimoodul  $k_s$ . Saadud väärtuste abil hinnatakse pinnaste deformatsiooni ja tugevust. Plaatkoormuskatse on sobilik jämedate- ja segateraliste ning sitkete kuni kõvade peeneteraliste pinnaste kontrolliks. Väga peeneteraliste pinnaste näiteks liivsavi ja savi puhul on võimalik mõõtmisi teostada vaid juhul kui pinnase tugevusomadused on vahemikus sitke kuni kõva. Mõõtes kiirelt kuivavaid ühtlaseteralisi liivpinnaseid; pinnakoorigu moodustunud pinnaseid; pehmenenud või muul viisil rikutud pealispinnaga materjale; on vajalik enne katsemõõdistusi eemaldada rikutud kiht. Eemaldades rikutud pealiskihti tuleb säilitada pinnase tihedus võimalikult muutumatuna. [11]

Plaatkoormuskatse eeliseks võib lugeda võimalust teostada mõõtmine igalt muldkeha kihilt peale selle valmimist. Mõõtetulemuste abil on võimalik korrigeerida ehitusprotsessi soovitud kandevõime väärtuste saavutamiseks. Teostades muldkeha ehitamise jooksul plaatkoormuskatsega kontrollmõõtmisi, on võimalik ennetada muldkehas tekkivaid defekte, mis omakorda võib viia katendis roobaste tekkeni, vähendades seeläbi teekatendi eluiga. [12]

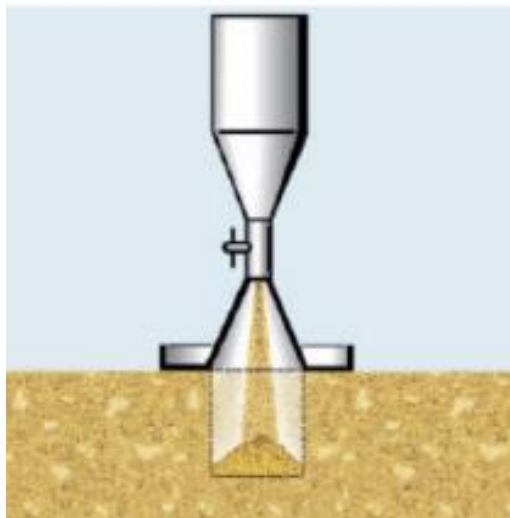


Joonis 4. Plaatkoormuskatse [12]

## 2.4 Mahumassi meetod

### 2.4.1 Liivakoonuse meetod

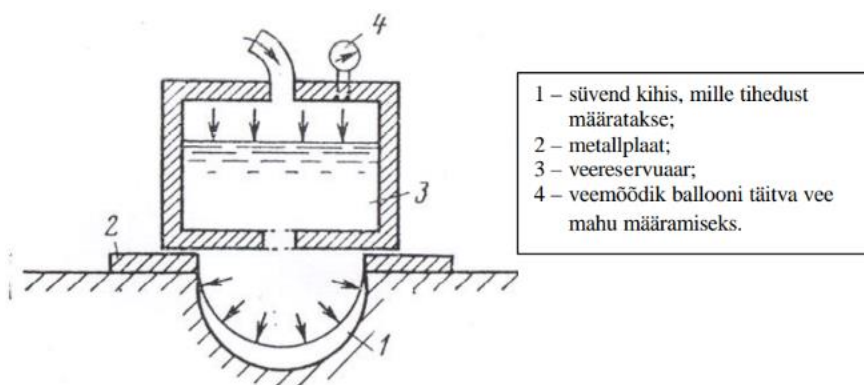
Liivakoonuse meetod (Joonis 5) on Eestis kõige levinum viis pinnase tiheduse määramiseks mahumassi põhjal. Kontrollmõõtmisi on võimalik teostada peeneteralistele pinnastele, kuid ei ole sobivaks meetodiks pinnaste puhul mis sisaldavad suures koguses kive ning suuri terakesi. Pinnase tiheduse määramiseks on vajalik esmalt määrata mahuti, koonuse ning mahutit täitva liiva mass  $W_1$ . Seejärel kaevatakse tihendatud pinnasesse süvend ning süvendist saadud niiskele pinnasele määratakse mass  $W_2$  ja veesisaldus  $w_c\%$ . Järgmiseks leitakse süvendist kaevatud pinnase kuiv mass. Katsega alustamiseks paigutatakse liivaga täidetud mahuti süvendi kohale ning lastakse liival voolata süvendisse ning koonusesse. Juhul kui süvis ja koonus on liivaga täitunud, siis määratakse mahuti, koonuse ja mahutisse jäänud liiva mass ning nende andmete põhjal arvutatakse süvendi ja koonuse täitmiseks kulunud liiva mass. [4]



Joonis 5. Liivakoonuse meetod [4]

#### 2.4.2 Kummiballooni meetod

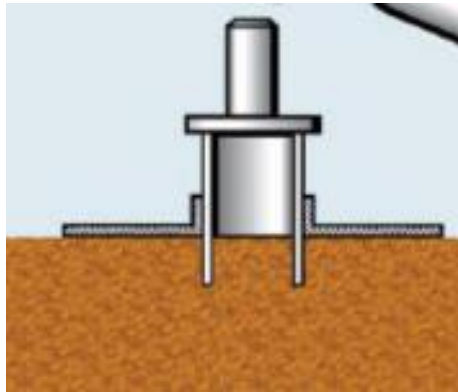
Kummiballooni meetod (Joonis 6) sarnaneb tööpõhimõttelt liivakoonusele, kuid süvise täitmiseks kasutatakse liiva asemel vett. Mõõtekatse on täpne, kuid sõltub kummiballooni omadustest võtta süvendi kuju. Mõõtmise teostamiseks kaevatakse tihendatud pinnasesse süvend ning mõõteseade asetatakse selle kohale. Seejärel täidetakse süvendisse asetatud kummiballoon veega, mille tulemusel võtta kummiballoon süvendi kuju. Seadmel oleva näidiku abil määratakse vee kogus, mis kulus süvendi täitmiseks. Saadud väärtuse abil arvutatakse pinnase tihedus. [4]



Joonis 6. Kummiballooni meetod [4]

### 2.4.3 Lõikerõnga meetod

Kasutades lõikerõnga (Joonis 7) meetodit liivpinnase tiheduse mõõtmiseks, lõigatakse tihendatud pinnasest rikkumata struktuuriga proovikeha. Lõikerõnga meetod sobib kasutamiseks peenemateralistele tihendatud pinnastele, mille tera läbimõõt on ligikaudu 4 mm. Olukorras, kus proov sisaldab suures osas jämedamateralist materjali, ei tungi lõikerõngas pinnasesse ning katsetulemused ei tule seetõttu piisavalt täpsed. [4] Katse läbiviimiseks surutakse esmalt lõikerõngas pinnasesse, seejuures vältides rõnga süvistamiseks löökide või vibratsiooni kasutamist, mis põhjustaksid pinnase soovimatu tihenemise. Sõltuvalt katsetatavast pinnasetüübist tuleb valida ka sobiva läbimõõduga lõikerõngas. Siinkohal on puhaste savipinnaste kontrolliks kasutusel 40 mm läbimõõduga rõngas, liivpinnastel vähemalt 100 mm ning kruusakive sisaldaval moreenil on vajalik lõikerõnga läbimõõt vähemalt 300 mm. [13]



Joonis 7. Lõikerõngas [4]

### 2.4.4 Kiirendatud meetod liivpinnastele

Liivpinnaste tiheduse kontrolliks on võimalik kasutada ka kiirmeetodit. Selleks võetakse tihendatud pinnasekihist proov, mis asetatakse silindrisse ning seejärel tihendatakse 30 löögiga, kasutades selleks 30 cm kõrguselt kukkuvat 2,5 kg raskust. Katse tulemusel määratakse proovi kõrguse muutumine millimeetrites ning selle alusel tuletatakse pinnase tihendustegur vastavast tabelist (Joonis 8). [4]

? h, mm	K <sub>o</sub>	? h, mm	K <sub>o</sub>	? h, mm	K <sub>o</sub>
1	0,99	6	0,91	11	0,84
2	0,97	7	0,90	12	0,82
3	0,96	8	0,88	13	0,80
4	0,94	9	0,87	14	0,78
5	0,93	10	0,85	15	0,77

Joonis 8. Proovikeha kõrguse muutusele vastavad tihendustegurid [4]

## 2.5 Pinnaserulli CCC-süsteem

### 2.5.1 Standardid

Pinnaserullide CCC-süsteemidele kehtib standard CEN/TS 17006:2016. Antud standardis kirjeldatakse nõudeid millele peavad vastama pinnaserullid, mõõtmisvahemikud ning tihendatavad pinnased. [14]

### 2.5.2 Hamm Smart Doc

Pinnaserullide tootja Hamm on välja töötanud rakenduse *Hamm Smart Doc*. Antud rakendus on mõeldud pinnaste tihendamisprotsessi seireks ja dokumenteerimiseks. Rakendus on viidud vastavusse standardiga CEN/TS 17006:2016. Hamm Smart Doc puhul on tegemist Android tüüpi nutiseadmetele mõeldud rakendusega. Kasutades rakendust, on võimalik pinnaserulli operaatoril luua tihendatava ala projekt kuhu kuvatakse pidevalt rullimise ajaperioodil saadud andmed pinnase tihendamise protsessist. Peale tihendamisprotsessi lõppu loob rakendus aruande (Lisa 1) ja edastab selle operaatorile PDF-failina. Dokumendis on kajastatud rullimise jooksul kasutatud parameetrid, tihendusväärtus HMV, valtsi hüpperežiim, vibratsiooni kasutamine ja sõidusuund. [15]

### 2.5.3 CCC-süsteem

Antud lõputöö raames kasutatakse katsemõõtmisteks pinnaserulli Hamm H14i, mis on varustatud Hammi poolt välja töötatud CCC-süsteemiga (Joonis 9). Süsteem koosneb mikroprotsessorist, kiirendusandurist ning näite kuvavast ekraanist. Antud süsteemi kasutades on võimalik tihendamise protsessi ajal kontrollida kogu tihendatavat ala ning vältida ala- ja ületihendamist, jälgides pidevalt nutiseadmesse edastatavaid tihendamisandmeid. Kontrollides pinnase tihedust tihendamise ajal, tuleb jälgida, et sõidukiirus ja vibratsiooni

sagedus oleksid kogu protsessi ajal konstantsed. Vastasel juhul ei ole mõõtmistulemused korrektsed. Kasutades rullimistöodes vibratsiooni, mõõdab valtsi küljes asuv kiirendusandur valtsi vibratsiooni ning pinnase vastupanu omavahelise väärtuse ning kuvab selle väärtuse HMV (*HAMM Measurement Value*) näidikul. Jälgides HMV väärtust on võimalik ennetada valtsi topelthüppe olukorda, mis põhjustaks pinnase ületihenemise, mille tagajärjeks võib olla materjali purunemine ja kobestumine. [16]



Joonis 9. HAMM CCC-süsteem [16]

#### 2.5.4 Pinnaserulli kalibreerimine

Enne tihendamistöödega alustamist ning CCC- süsteemiga pinnase kontrollimist on vajalik teostada süsteemi kalibreerimine. Kalibreerimiseks tuleb teha kontrollmõõtmine tihendatud pinnaselt, näiteks plaatkoormuskatse või Inspector mõõteseadmega. Lähtudes ehitatava kihi nõuetest ning kihipaksusest valitakse tihendustegur, millele peab materjal vastama. Kalibreerimise alustamiseks tihendatakse pinnaserulliga ligikaudu 20 m pikkune ja 6 m laiune homogeenne materjaliga katseala. Rullimist alustatakse katseala servast ning igal järgmisel rullitaval lõigul peab valts kattuma 20 cm ulatuses eelmise rullitud lõiguga. Lisaks on vajalik jälgida, et sõidukiirus ja vibratsiooni sagedus oleks tihendamise ajal konstantsed ning tagurpidi sõites tuleb valtsi vibratsioon välja lülitada. [3] Tihendamisprotsessi lõppedes mõõdetakse plaatkoormuskatse või Inspector seadmega pinnase tihendutegur. Tulenevalt

sellest, et plaatkoormuskatse tegemine on ajamahukas, on soovituslik kasutada Inspector seadet, et saada mõõtmistulemused võimalikult kiiresti. Juhul kui mõõtmistulemused ei ole vastavuses kehtestatud nõuetega tuleb tihendamisprotsessiga jätkata kuni pinnas on tihenenud vajaliku tulemuseni. Selleks, et veenduda pinnase tihendatuses tehakse pinnaserulliga veel üks läbik, mille käigus jälgitakse HVM näidikul kuvatavaid andmeid, millele nõuetekohaselt tihendatud pinnas vastab. Peale HVM väärtuste salvestamist on CCC-süsteem kalibreeritud.



toimuda enne aasta möödumist muldkeha järelevalvet teostavale insenerile üleandmisest. [1] Lisaks on määratud muldkeha täitematerjalide nõutud filtratsioonimoodul, Vassiljevi plastsusarv ning orgaanika sisaldus. Filtratsioonimoodul määratakse standartse Proctor teimi katsega ning peab olema vastavalt hanke seletuskirjale 0,3-2,0 m ööpäevas. Vassiljevi plastsusarv peab olema väiksem kui seitse ning materjalid ei tohi sisaldada orgaanikat üle 6%. [17]

### **3.3 Mõõtmisseadmed**

Muldkeha tihedusmõõtmiste jaoks kasutatakse plaatkoormuskatset, Inspector 4 mõõteseadet ning pinnaserulli Hamm HC 140i. Pinnaserull Hamm HC 140i on varustatud pideva tiheduse mõõtesüsteemiga CCC ning ühendatakse nutiseadmega läbi bluetooth liidese. Enne katsemõõtmistega alustamist tuleb veenduda, et CCC-süsteem, plaatkoormuskatse ning Inspector mõõteseadmed oleksid nõuete kohaselt kalibreeritud.

### **3.4 Mõõtmiskatsete kirjeldus**

Katsemõõdistusi teostatakse Krei külas asuva Sutika tee uusarenduse ligipääsutee mulde ehitamise jooksul. Selleks määratakse esmalt tihendatava pinnase geotehnilised omadused. Peale seda kalibreeritakse pinnaserull ning alustatakse pinnase tihendamisprotsessi. Kasutades *Hamm Smart Doc* programmi, tihendatakse pinnast optimaalse piirini, peale mida võrreldakse saadud tulemusi plaatkoormuskatse, Inspector 4 seadme ja liivakoonuse katsetulemustega.

### **3.5 Katseplaan**

Mõõtmiskatsed teostatakse loodusliku kruuspinnasega, mis on ehitusobjektile kallurautoga transporditud Kose-Risti karjäärist. Looduslikku kruuspinnast kasutatakse tee aluskihis täitematerjalina. Materjal sisaldab endas suures koguses looduslikke kive ning peenema fraktsiooniga peenosis on looduslik jämedateraline liiv. Materjali valavad kallurautod otse ehitatavale teele, ning selle käigus tihendavad nii veokid kui ka buldooser töö käigus pinnast. Juurdeveetavast looduslikust kruusast ehitatava kihti paksus on ligikaudu 40 cm.

Katseplaani läbiviimiseks on vajalik alustada rulli kalibreerimisega ning peale seda on võimalik alustada katsemõõtmistega. Tihendamistööde käigus tuleb jälgida, *Hamm Smart Doc* rakenduses kuvatavaid *HMV* väärtuseid ning seeläbi veenduda materjali homogeenses tihendamises. Peale pinnaserulliga tihendamise lõpetamist, kontrollitakse tihendatud pinnas

üle Inspector 4 seadmega ning võrreldakse *Hamm Smart Doc* kogutud andmetega. Saadud andmete põhjal koostatakse analüüs ja võrdlus tihendamistööde kontrollmeetodite kohta.

### 3.6 Mõõtmistulemused Inspector 4 seadmega

Mõõtmisi teostati 19.04.2024, õhutemperatuur oli 3 °C ning sademeid ei esinenud. Kontrollmõõtmisi teostati kahel katsealal, mõlemal korral kuues erinevas punktis peale igat pinnaserulliga tihendamise läbikut (Foto 2). Mõõtetulemuste iga seeria talletati mõõteseadme mällu, peale mida saadetakse andmed seadmest e-mailile. Peale seda on saadetud andmetega võimalik teostada andmete analüüs arvutis. Inspector mõõteseadmega mõõtmistöid teostades on oluline pöörata tähelepanu asjaolule, et Inspector kuvab peale mõõtmisseeriat tihendusfaktori  $T_f$  ning hilisemalt andmeid analüüsidest kuvatakse tihendustegur  $K_c$  Excel andmeprogrammis. Analüüsidest mõõtetulemuste tabelis (Lisa 3) kuvatavaid andmeid saab veenduda, et kasutades pinnaserulli CCC-süsteemi on võimalik tihendada pinnas nõutud tihendustegurini, milleks on 0,95 [17].



Foto 2. Katseala [19]

### 3.7 Mõõtmistulemused plaatkoormuskatsega

Mõõtmisi teostati 24.04.2024, õhutemperatuur oli 4 °C ning puudusid sademed. Raskendavaks asjaoluks on 23.04.24 sadanud lumi, mis muutis mõõdetava pinnase kohati liigniiskeks. Akreiditeeritud plaatkoormuse mõõtmiskatse on teostatud AS Teede Tehnokeskuse poolt standardi EVS 934:2016 kohaselt. Mõõtmiskatsed teostati kahest punktist, ning enne mõõtmiskatsetusi (Foto 3, Foto 4) eemaldati ligikaudu 10 cm niisket pinnast kontrollitavalt pinnase kihilt.

Plaatkoormuskatse mõõtetulemuste analüüsimiseks tuleb võrrelda mõõtetulemusi AS Teede Tehnokeskuse poolt koostatud aruande „Mulde kandevõime ja tihendusnõuete kontrollmeetodikatse arendamise kasutamiseks riigimaanteedel rekonstrueerimisel ja ehitamisel. I osa, riigimaanteedel 2017 aastal teostatud plaatkoormuskatsetuste praktika analüüs ja teiste riikide kogemused plaatkoormuskatse rakendamisel“ leitava sobilike plaatkoormuskatse mõõtetulemuste tabeliga (Joonis 11).

Analüüsidest plaatkoormuskatse mõõtetulemusi tabelis toodud kruuspinnase GW väärtustega on võimalik väita, et mõõtetulemused esimeses mõõtmispunktis (Lisa 5) vastavad soovitatavatele väärtustele. Võrreldes mõõtetulemusi teises punktis, ei ole katsetulemused sobivad, kuna  $E_{v2}$  väärtus on 159,5 MPa peaks olema  $E_{v2}$  ja  $E_{v1}$  omavaheline suhe väiksem või võrdne väärtusega 2,3. Teise mõõtekatse puhul on vajalik arvestada asjaolu, et katsepunktis oli liigniiske materjal, mis mõjutab katsetulemusi negatiivselt. Kokkuvõtlikult on võimalik väita, et kasutades pinnaserulli CCC-süsteemi tihendamisprotsessi käigus ja tihendatud pinnast plaatkoormuskatsega kontrollides saavutada ettenähtud pinnase tihedustegur.

Pinnase liik (grupp <sup>1</sup> )	$D_{Pr}$ [%]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}/E_{v1}$ [-]
Kruuspinnased GW, GI ( $C_u > 6$ )	$\geq 100$	$\geq 100$	$\leq 2.3$
	$\geq 98$	$\geq 80$	$\leq 2.5$
	$\geq 97$	$\geq 70$	$\leq 2.6$
Kruuspinnas GE ( $C_u < 6$ ) ja Liivpinnased SE, SW ja SI	$\geq 100$	$\geq 80$	$\leq 2.3$
	$\geq 98$	$\geq 70$	$\leq 2.5$
	$\geq 97$	$\geq 60$	$\leq 2.6$

Joonis 11. Sobilikud plaatkoormuse mõõtetulemused [20]



Foto 3. Plaatkoormuskatse esimene mõõtmine [21]



Foto 4. Plaatkoormuskatse teine mõõtmine [22]

### 3.8 Mõõtmistulemused mahumassi meetodil

Mõõtmiskatse teostati 24.04.24 liivakoonuse mõõtmismeetodit kasutades (Foto 5). Teede Tehnokeskuse AS poolt teostatud liivakoonuse mõõtmiskatse (Lisa 7) ei kuulu labori akrediteerimisulatusse, kuid on vastavuses standardiga ASTM D1556/D1556M-15e1. Katsemõõtmisi teostati ühest punktist. Katsemõõtmiseks kasutatud pinnase märg mahumass on  $2,33 \text{ Mg/m}^3$  kohta ning mahumass peale kuivatamisprotsessi on  $2,20 \text{ Mg/m}^3$  kohta. Pinnases oleva vee kogus 6% leiti vastavalt standardile EVS-EN 1097-5:2008. Liivakoonusega tihedusteguri leidmiseks arvutati pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskusesisalduse juures oleva mahumassi suhe. Arvutuskäigu tulemiks saadi tihedustegur  $K_t$  väärtusega 0,99. [23] Antud tihendustegurit võib lugeda sobivaks, kuna väärtus on kõrgem kui hanke seletuskirjas nõutud tihendustegur 0,95 [17]. Seega on antud katsetulemuste põhjal võimalik väita, et kasutades tihendamisprotsessi käigus pinnaserulli CCC-süsteemi saavutada homogeenselt tihendatud materjal, mis vastab nõuetes kehtestatud tihedustegurile.



Foto 5. Liivakoonuse mõõtmiskatse [24]

### 3.9 Pinnase Proctor-teimi ja sõelkövera tulemused

Pinnase terastikulise koostise ja Proctor-teimi katsete jaoks võeti proov (Lisa 8) looduslikust kruusast vastavalt standardile EVS-EN 931-1:2000 p 8.8. Teede Tehnokeskus AS poolt Proctor seadmega teostatud katse (Lisa 9) on läbiviidud vastavalt standardile EVS-EN 13286-2:2010. Standardse Proctor-teimi katse teostamiseks kasutati B vormi fraktsiooniga 0/31,5 mm ja haamrit massiga 2,5 kg. Proovis sisalduvate ülemõõduliste kividega tehti ümberarvutus veesisalduse ja maksimaalse kuivtiheduse leidmiseks standardi EVS-EN 13286-2:2010 lisa C põhjal. Katsetulemusena saadi pinnase maksimaalseks kuivtiheduseks  $\rho_d$  2,22 Mg kuupmeetri kohta. Lisaks on materjali optimaalseks veesisalduseks  $w_0$  4,6%, seega on eelnevalt leitud veesisalduseks leitud 6% suurem kui optimaalne veesisaldus. Tõene väita, et pinnase kandevõimet mõjutab pinnases sisalduv liigne vesi. Katsetatavast pinnasest jäi 16 mm, 31,5 mm või 63 mm katsesõelale 24 % pinnase kuivmassis sisalduvatest teradest.

Terastikulise koostise määramise katse teostati vastavalt standardile EVS-EN 933-1:2012. [23] Vastavalt hanke seletuskirjale ei tohi mulde ehitamisel kasutada materjali, milles sisalduvate alla 0,14 mm osiste sisaldus ületab 25% piiri [17]. Terastikulise koostise määramise protokoll kohaselt on materjalis sisalduva alla 0,14 mm osiste sisaldus 13% katsetatavast pinnasest ning peenosiste terasuurusega alla 0,063 mm 9,0%. [23] Katsetulemuste põhjal on võimalik veenduda, et ehitamiseks kasutatav materjal on sobiv Proctor-teimi ja terastikulise koostise põhjal.

### 3.10 Ettepanekud

Teede Tehnokeskus AS ja autori poolt teostatud katsetulemuste põhjal on võimalik väita, et kasutades liiv- ja kruuspinnaste tihendamise käigus pinnaserullide tootja Hamm poolt väljatöötatud CCC-süsteemi tihendusprotsessi kontrollimiseks on võimalik saavutada pinnaste nõuetekohane tihedusteguri väärtus. Süsteemi kasutamine muldkeha ehitatavate kihtide tihendamiseks võimaldab tihendusmehhanismi operaatoril pidevalt jälgida pinnase tihendamisprotsessi käiku, ning veenduda pinnase tihendatuses. Lisaks võimaldab süsteemi kasutamine prognoosida ligikaudset protsessi ajakulu ja vajaminevate resursside kogust saavutamaks nõuetekohaselt tihendatud pinnas. Samuti kiireneb rajatud kihtide kontrollimine ehitaja ja ehitusjärelvalvet teostava inseneri jaoks, kuna ehitaja on eelnevalt veendunud pinnase tihendus nõuetele vastavuses. Antud süsteemiga pidevalt tihendusprotsessi kontrollides on võimalik ennetada tihendamismehhanismi operaatoril pinnase ületihendamist ja sellest tulenevalt vältida liigset aja- ja kütusekulu. Kasutades tööprotsessi jooksul CCC-

süsteemi on võimalik vähendada ehitustegevuse keskkonnamõju ning saavutada rahaline kokkuhoid, kuna süsteemi poolt operaatorile edastavate andmete põhjal on võimalik otsustada millal tihendamisprotsess lõpetada.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on võrrelda liivpinnaste tihedustegurite määramise meetodeid. Selleks valiti välja liivpinnaste tihedusteguri mõõtmiseks kasutatavad seadmed ning teostati lähtuvalt koostud katseplaanist katsemõõtmised. Lõputöö raames püstitati kaks põhieesmärki, mis said töö käigus täidetud. Eesmärkideks seadis autor liivpinnaste tihedustegurite määramise meetodite analüüsi ja teiseks eesmärgiks oli eelduse loomine Hamm CCC-süsteemide laialdasema kasutuselevõtu eelduse loomine.

Lõputöö on jaotatud kolme osasse. Esimene osa koosneb mõistete definitsioonidest ja tihendamisteooriast. Teine osa sisaldab endas mõõteseadmete –ja protsessi kirjeldust ning stanadardeid, millest mõõtetöödel lähtuti. Kolmas osa hõlmab endas lõputöö raames tehtud mõõtmiskatsetuste ja asukoha kirjeldusi ning mõõtmiseks valitud katseseadmeid. Samuti katseplaani, mõõtmistulemuste analüüsi ning lähtuvalt saadud tulemustest tehtud töö autori ettepanekuid.

Lõputöö mõõtmiskatsetuste raames teostas Teede Tehnokeskus AS plaatkoormuskatse, liivakoonuse, ehitamiseks kasutatava materjali terastikulise koostise määramise ning Proctor-teimi katsetused. Töö autori poolt teostati pinnase tihedusteguri mõõtmiskatsed Inspector 4 mõõteseadmega. Kõikide katsemõõtmiste läbiviimisel lähtuti vastavalt kehtivatest standarditest ja normatiividest.

Kõiki eelnevalt saadud katsetulemusi võrreldi hiljem katsetamisprotsessis kasutatud Hamm HC140i CCC-süsteemi mõõteandmetega. Saadud mõõtetulemuste analüüsi tulemusel on autori hinnangul võimalik lisaks, Eestis laialt levinud tihedusteguri mõõteseadmetele, alternatiivselt kasutada ka Hamm CCC-süsteemi. Antud süsteemi kasutuselevõtt aitaks kaasa ehitusprotsessi kiirendamisele, vähendades seeläbi tihendamistööde keskkonnamõju ning looks eelduse ühtlaselt tihendatud muldkeha rajamisele. Lisaks lihtsustuks ehitatava muldkeha kihtide tihedusteguri kontrollprotsess nii tellija kui ka ehitaja jaoks.

Mõõtetulemuste analüüsi tulemusel leiti, et pinnase tihendamistööde käigus tihedusteguri kontrollimiseks kasutatud Hamm CCC-süsteemi hilisemal võrdlemisel Eestis enam levinud mõõteseadmetega jäid leitud tihedustegurid ettenähtud normide piiridesse. Väljaarvatud plaatkoormuskatse teine mõõtmine, kus pinnas oli liigniiske. Kõik ülejäänud teostatud katsemõõtmiste tulemused vastasid autori ootustele.

Lisaks analüüsile on lõputöö autor koostanud ka juhise liiv- ja kruuspinnaste tihendamisprotsessi jooksul kasutatava Hamm CCC-süsteemi kalibreerimiseks ja

kasutamiseks. Koostatud juhend võiks aidata kaasa Hamm CCC-süsteemide laialdasemale kasutuselevõtule Eestis. See omakorda looks aluse põhjalikuma ülevaate tekkimisele liivpinnaste tihendamisprotsessist.

Mõõtmiskatsetuste tulemused ning katseprotsess vastasid lõputöö autori ootustele. Edasiselt on autori hinnangul võimalik uurida Hamm CCC-süsteemi kasutamist nii killustikaluste kui ka erinevate stabiliseeritud katendikihtide tihendamisel.

## SUMMARY

The main objective of thesis „*Analysis of Determining Compaction Factors of Sandy Soils*“ has been the analysis and comparison of the most equipment used for the measuring the density of embankment soil in Estonia, deploying the CCC system of soil compacting rolls. The aim of the experimental measurements carried out in the framework of the thesis is to create a prerequisite for the wider adoption of the CCC system in the use of soil rolls in Estonia. This compacting method is not currently used in Estonia, but its introduction would enable to constantly check the density of the embankment during construction works. The thesis consists of three parts, in which the author analyzes the compaction theory, the measuring devices used to find the density factor of sandy and gravel soils, and the analysis of the density factor test measurements carried out during the construction process of the Sutika road embankment.

Measurement tests were carried out with Inspector 4, a plate load test, a sand cone and Proctor probe measuring devices. The author compared the test results with the data collected during the compression process of the soil roll Hamm CCC system. As a result of the comparison, the author found that by using the Hamm CCC system during the compaction process of sandy and gravel soils, it is possible to reduce the time spent on the construction process, the environmental impact caused by the compaction work, and to make the process of control measurements of the layers to be built by the embankment more efficient.

This thesis provides guidance on carrying out further tests for measuring the soil density factor. The thesis also provides a basis for carrying out the calibration of the CCC system used during the compacting of sandy and gravel soils.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Majandus- ja taristuministerium, „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded,“ Riigi Teataja, Tallinn, 2015.
- [2] Eesti Standardikeskus, „Mullatööd Osa 5: Kvaliteedikontroll,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2018.
- [3] Transpordiamet, „Pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhendi kaasajastamine,“ Transpordiamet, Tallinn, 2024.
- [4] A. Aavik, „MULDKEHA TIHENDAMISE JA TIHEDUSE KONTROLLI JUHENDI KOOSTAMINE,“ Maanteeamet, Tallinn, 2005.
- [5] Transpordiamet, „Muldkoha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend,“ Transpordiamet, Tallinn, 2023.
- [6] Riigi Teataja, „Teehoiutööde tehnoloogianõuded,“ Majandus- ja kommunikatsiooniministerium, Tallinn, 2004.
- [7] E. Standardikeskus, "Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic probing - Amendment 1 (ISO 22476-2:2005/Amd 1:2011)," 15 November 2011. [Online]. Available:  
<https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=36402&language=EnglishLanguage>. [Accessed 26 Veebruar 2024].
- [8] Gilson Grupp OÜ, „Penetromeetri kasutusjuhend,“ Gilson Grupp OÜ, Tallinn.
- [9] Englo OÜ, „INSPECTOR-3 Pinnase Elastsusmooduli Tester,“ Englo OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.englo.eu/et/products-estonian/inspector-3>. [Kasutatud 28 Veebruar 2024].
- [10] P. Sarap, Artist, *Mõõtmiseseeria tulemuste kuvamine Inspector 3 seadmes*. [Art]. Erakogu, 2023.
- [11] Eesti Standardikeskus, „Katsemeetodid ja katseseadmed Plaatkoormuskatse,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2016.
- [12] Teede Tehnokeskus, „www.teed.ee,“ Teede Tehnokeskus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://teed.ee/teenused/katsetamine-ja-mootmine/mootmine/kandevoime/plaatkoormuskatse/>. [Kasutatud 5 Märts 2024].
- [13] V. Jaaniso, „Pinnasemehaanika inseneridele,“ Tallinn.

- [14] European committee for standardization, "Earthworks- Continuous Compaction Control (CCC)," European committee for standardization, 2016.
- [15] HAMM AG, „Kasutusjuhend teerull HC 100i/ HC 110i/ HC 120i,“ HAMM AG, Tirschenreuth, 2023.
- [16] HAMM AG, COMPACTION in asphalt construction and earthwork, Tirschenreuth: HAMM AG, 2017.
- [17] OÜ TOTOM, „Sutika tee arenduse teede projekt,“ OÜ TOTOM, Tallinn, 2021.
- [18] Maa-amet, „<https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/kitsendused>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/kitsendused>. [Kasutatud 25 Aprill 2024].
- [19] P.Sarap, Artist, *Inspector mõõteseadme katseala*. [Art]. Erakogu, 2024.
- [20] AS Teede Tehnokeskus, „Mulde kandevõime ja tihendusnõuete kontrollmetoodikate arendamise kasutamiseks riigiteede rekonstrueerimisel ja ehitamisel. I osa, riigimaanteedel 2017 teostatud plaatkoormuskatsetuste praktika analüüs ja teiste riikide kogemused plaatkoormuskatse rakenda,“ AS Teede Tehnokeskus, Tallinn, 2017.
- [21] P.Sarap, Artist, *Plaatkoormuse esimene mõõtmine*. [Art]. Erakogu, 2024.
- [22] P.Sarap, Artist, *Plaatkoormuse teine mõõtmine*. [Art]. Erakogu, 2024.
- [23] Teede Tehnokeskus AS, „Katseprotokoll nr 806/24,“ Teede Tehnokeskus AS, Tallinn, 2024.
- [24] P.Sarap, Artist, *Liivakoonuse mõõtmiskatse*. [Art]. Erakogu, 2024.
- [25] John Deere, "Hamm Self-monitoring in earthworks via Smart Doc," [Online]. Available: <https://www.deere.com/en/electronics/news-room/news-articles/hamm-self-monitoring-via-smart-doc/>. [Accessed 07 Märts 2024].
- [26] P.Sarap, „Inspector 4 mõõtmisseeriade tulemused,“ Erakogu, Tallinn, 2024.
- [27] P.Sarap, „Hamm CCC-süsteemi loodud tihendamisprotsessi raport,“ Erakogu, Tallinn, 2024.
- [28] P.Sarap, „Plaatkoormuskatse mõõtetulemused esimeses mõõtepunktis,“ Erakogu, Tallinn, 2024.
- [29] P.Sarap, „Plaatkoormuskatse mõõtetulemused teises mõõtepunktis,“ Erakogu, Tallinn, 2024.
- [30] Teede Tehnokeskus AS, „Proovivõtuprotokoll nr L-0424/1,“ Teede Tehnokeskus AS, Tallinn, 2024.
- [31] [Võrgumaterjal].

- [32] Englo OÜ, „Pinnase Elastsusmooduli Testrid,“ Englo OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.englo.eu/et/category-estonian/lightweightdeflectometer>. [Kasutatud 28 Veebruar 2024].
- [33] Maanteeamet, „Elastsete katendite arvutamise programmi kasutusjuhend,“ Maanteeamet, Tallinn, 2017.
- [34] Teede Tehnokeskus, „www.teed.ee,“ Teede Tehnokeskus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.teed.ee/teenused/katsetamine-ja-mootmine/mootmine/kandevoime/fwd-mootmine/>. [Kasutatud 5 Märts 2024].

## **LISAD**

Lisa 1. Tihendamisprotsessi PDF aruanne

Lisa 2. Dünaamilise penetromeetri süvituslöökidele vastav tihedustegur

Lisa 3. Inspector 4 mõõtmisseeriade tulemused

Lisa 4. Hamm CCC-süsteemi loodud tihendamisprotsessi raport

Lisa 5. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused esimeses mõõtepunktis

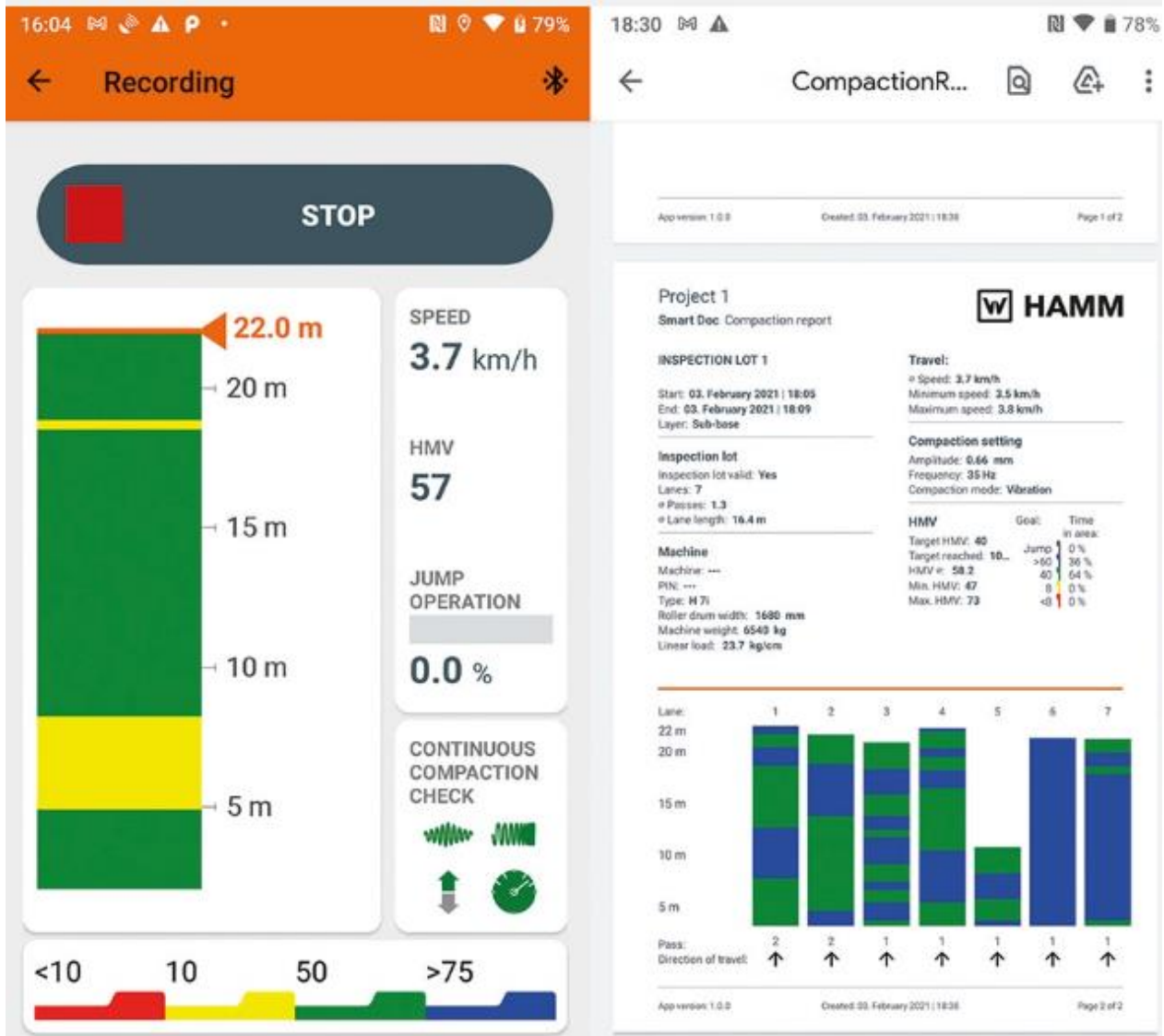
Lisa 6. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused teises mõõtepunktis

Lisa 7. Pinnase tiheduse määramine liivakoonuse meetodiga katseprotokoll

Lisa 8. Pinnase Proctor-teimi ja sõelkõvera proovivõtu protokoll

Lisa 9. Proctor-teimi ja sõelkõvera katseprotokoll

# Lisa 1. Tihendamisprotsessi PDF aruanne [25]



## Lisa 2. Dünaamilise penetromeetri süvituslöökidele vastav tihedustegur [8]

Penetromeetri löökide arv	Mulle üle ühe kuu	Värsketel mulletel		
		Peenliiv	Kesklüiv	Tolmliiv
5	0.902			
6	0.907			
7	0.912	0.902	0.910	
8	0.928	0.920	0.939	
9	0.932	0.926	0.943	
10	0.937	0.930	0.946	0.907
11	0.942	0.938	0.952	0.918
12	0.946	0.943	0.957	0.922
13	0.950	0.947	0.962	0.928
14	0.954	0.955	0.968	0.931
15	0.958	0.960	0.971	0.940
16	0.961	0.964	0.974	0.944
17	0.964	0.968	0.977	0.950
18	0.967	0.972	0.978	0.953
19	0.970	0.976	0.980	0.960
20	0.972	0.978	0.982	0.964
21	0.975	0.981	0.985	0.970
22	0.976	0.981	0.986	0.974
23	0.978	0.986	0.988	0.976
24	0.980	0.990	0.990	0.980
25	0.981	0.993	0.991	0.981
26	0.983	0.997	0.993	0.984
27	0.985	1.000	0.995	0.986
28	0.986	1.002	0.996	0.990
29	0.988	1.004	0.998	0.994
30	0.989	1.006	0.999	0.996
31	0.992	1.008	1.000	0.998
32	0.993	1.010	1.001	1.000
33	0.994	1.013	1.002	1.002
34	0.995	1.014	1.003	1.004
35	0.996	1.015	1.004	1.006
36	0.998	1.016	1.005	1.008
37	0.999	1.017	1.006	1.010
38	1.000	1.018	1.007	1.011
39	1.001	1.019	1.008	1.012
40	1.002	1.020	1.009	1.013

# Lisa 3. Inspector 4 mõõtmisseriesiate tulemused [26]

## ÜMBERARVUTUS ( Ek ; Tf ) > ( Ev2 ; Kc )

Ainult informatsiooniks, ilma garantita

Lähteandmed				Ümberarvutus		
Kandevõime aruanne 23/apri/2024 Seade nr. 0270418						
Seeria Nr.	Mõõtmise aeg	Ek (MPa)	Tf	Väli pinnas või materjal	Plaatkatse Ev2 (MPa)	Tiheduskoefitsient Kc
1	18/04/2024 11:53	109	1,30	GW	83	0,98
2	18/04/2024 11:55	82	1,28	GW	85	0,96
3	18/04/2024 11:57	75	0,99	GW	82	0,96
4	18/04/2024 12:11	58	1,29	GW	48	-
5	18/04/2024 12:13	86	1,56	GW	68	0,97
6	18/04/2024 12:15	111	1,39	GW	85	0,99
7	18/04/2024 12:17	89	1,39	GW	70	0,97
8	18/04/2024 12:18	82	1,30	GW	85	0,96
9	18/04/2024 12:20	91	1,28	GW	71	0,97
10	18/04/2024 12:33	57	1,30	GW	47	-
11	18/04/2024 12:35	76	1,52	GW	61	0,96
12	18/04/2024 12:37	117	1,38	GW	89	0,99
13	18/04/2024 12:38	108	1,38	GW	83	0,98
14	18/04/2024 12:40	84	1,25	GW	66	0,96
15	18/04/2024 12:42	105	1,33	GW	80	0,98
16	18/04/2024 14:12	86	1,06	GW	88	0,97
17	18/04/2024 14:14	75	1,14	GW	80	0,96
18	18/04/2024 14:16	122	1,27	GW	92	0,99
19	18/04/2024 14:17	92	1,37	GW	72	0,97
20	18/04/2024 14:19	108	1,29	GW	83	0,98
21	18/04/2024 14:21	105	1,19	GW	80	0,98
22	18/04/2024 14:40	102	1,29	GW	78	0,98
23	18/04/2024 14:42	79	1,18	GW	63	0,96
24	18/04/2024 14:44	130	1,18	GW	97	1,00
25	18/04/2024 14:46	99	1,41	GW	76	0,98
26	18/04/2024 14:47	107	1,62	GW	82	0,98
27	18/04/2024 14:50	106	1,22	GW	81	0,98
28	18/04/2024 15:08	82	1,21	GW	65	0,96
29	18/04/2024 15:10	74	1,21	GW	59	0,96
30	18/04/2024 15:12	105	1,42	GW	80	0,98
31	18/04/2024 15:13	82	1,37	GW	85	0,96
32	18/04/2024 15:14	101	1,23	GW	78	0,98
33	18/04/2024 15:16	94	1,13	GW	73	0,97
34	18/04/2024 15:29	99	1,27	GW	76	0,98
35	18/04/2024 15:30	76	1,06	GW	61	0,96
36	18/04/2024 15:32	98	1,01	GW	76	0,98
37	18/04/2024 15:33	88	1,38	GW	69	0,97
38	18/04/2024 15:35	95	1,22	GW	74	0,97
39	18/04/2024 15:36	112	1,22	GW	85	0,99
40	18/04/2024 15:51	83	1,19	GW	65	0,96
41	18/04/2024 15:53	78	1,13	GW	62	0,96
42	18/04/2024 15:54	134	1,23	GW	100	1,00
43	18/04/2024 15:56	74	1,01	GW	59	0,96
44	18/04/2024 15:57	94	1,21	GW	73	0,97
45	18/04/2024 15:59	99	1,32	GW	76	0,98
169	18/04/2024 07:59	106	1,22	GW	81	0,98
170	18/04/2024 08:03	105	1,17	GW	80	0,98
171	18/04/2024 08:05	96	0,97	GW	74	0,97
172	18/04/2024 08:08	51	1,09	GW	43	-
173	18/04/2024 08:10	49	0,91	GW	41	-
174	18/04/2024 08:54	76	1,31	GW	61	0,96
175	18/04/2024 08:57	106	1,61	GW	81	0,98
176	18/04/2024 08:59	82	1,30	GW	65	0,96
177	18/04/2024 09:02	109	1,51	GW	83	0,98
178	18/04/2024 09:03	86	1,61	GW	53	-
179	18/04/2024 09:06	69	1,15	GW	56	-
180	18/04/2024 09:44	65	1,81	GW	53	-
181	18/04/2024 09:47	74	1,51	GW	59	0,96
182	18/04/2024 09:49	97	1,43	GW	75	0,97
183	18/04/2024 09:51	108	1,40	GW	83	0,98
184	18/04/2024 09:53	74	1,64	GW	59	0,96
185	18/04/2024 09:56	97	1,56	GW	75	0,97
186	18/04/2024 10:10	65	1,33	GW	53	-
187	18/04/2024 10:13	92	1,44	GW	72	0,97
188	18/04/2024 10:15	100	1,30	GW	77	0,98
189	18/04/2024 10:17	101	1,44	GW	78	0,98
191	18/04/2024 10:20	85	1,42	GW	67	0,96
193	18/04/2024 10:38	80	1,57	GW	63	0,96
194	18/04/2024 10:40	94	1,25	GW	73	0,97
195	18/04/2024 10:42	117	1,23	GW	89	0,99
197	18/04/2024 10:45	93	1,41	GW	72	0,97
199	18/04/2024 11:49	88	1,57	GW	66	0,97

### Pinnaste ja materjalide tingimised

1. Ehtusliivad ( SW ; SP )

SW - erineva terasuurusega liiv  
SP - ühtlase terasuurusega liiv

2. Kruusad

GW - erineva terasuurusega kruusad  
GP - ühtlase terasuurusega kruusad

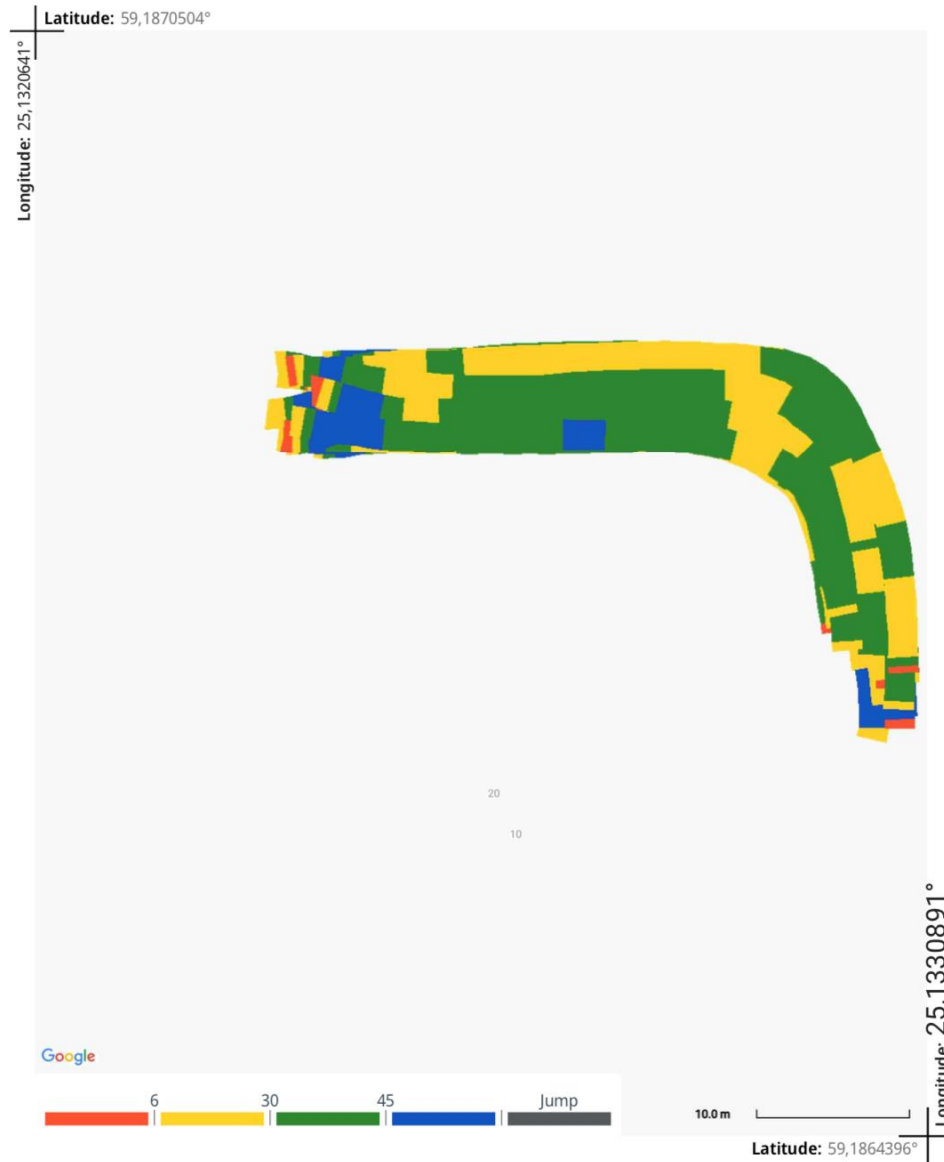
3. Kiltkivid

K2/4LA40

Fraktsiooni suurus  
sln 2-4 cm      Los Angelese  
katse tugevus

# Lisa 4. Hamm ccc-süsteemi loodud tihendamisprotsessi raport [27]

Smart Doc Compaction report



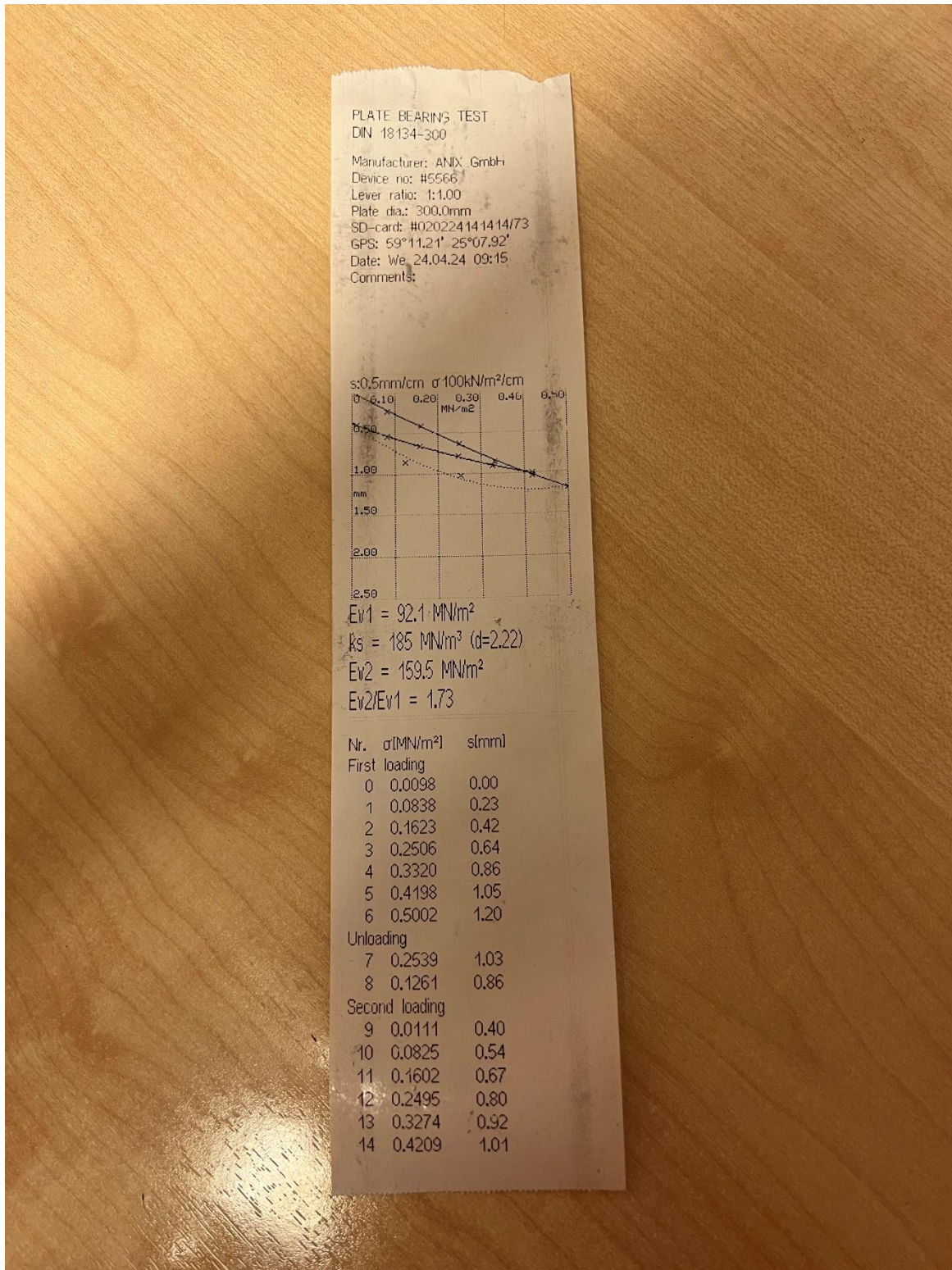
HMV

App version: 3.0.1

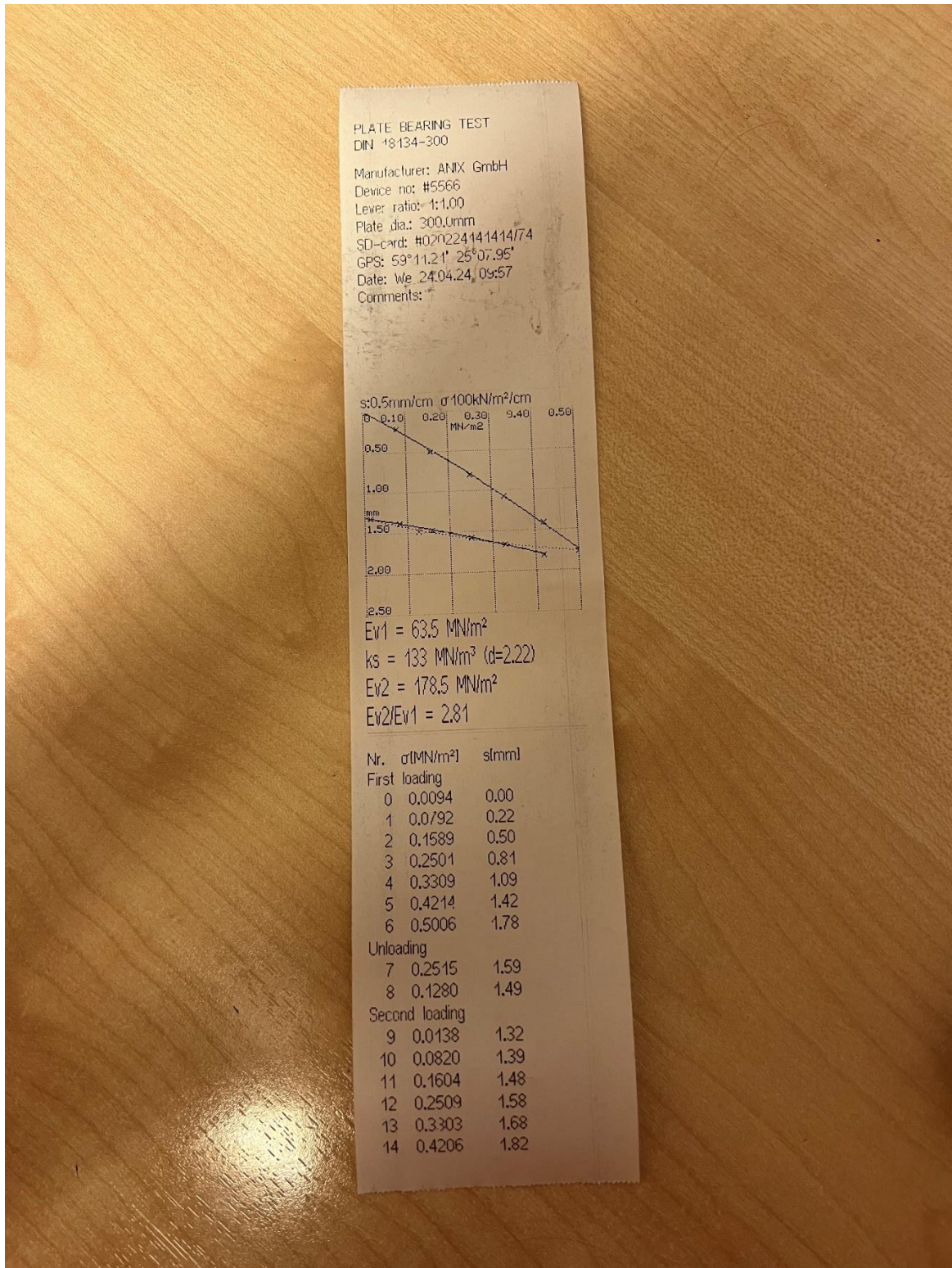
Created: 18.04.2024 15:43

Page 5 of 6

## Lisa 5. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused esimeses mõõtepunktis [28]



## Lisa 6. Plaatkoormuskatse mõõtetulemused teises mõõtepunktis [29]



## Lisa 7. Pinnase tiheduse määramine liivakoonuse meetodiga katseprotokoll [23]

Katseprotokoll nr 806/24

lk 2/2

3. \*\* Pinnase tiheduse määramine liivakoonuse katsel ASTM D1556/D1556M-15e1

Võtmise koht	** Liivakoonuse katse, märg mahumass, Mg/m <sup>3</sup>	**Liivakoonuse katse, kuiv mahumass, Mg/m <sup>3</sup>	Veesisaldus, %	** Tihendustegur K <sub>t</sub>
1	2,33	2,20	6,0	0,99

\*\* - Käesolevas protokollis tärniga tähistatud katsed ei kuulu labori akrediteerimisulatusse.

# Lisa 8. Pinnase Proctor-teimi ja sõelkõvera proovivõtu protokoll [30]

Protokollinumeratsioon: S-MMDD/n kus M – kuu; D – päev; n – jrk nr; S – sertifitseerimine; L – teedelabor; E – ehitusmaterjalide labor

<b>PROOVIVÕTU PROTOKOLL NR L-0925/11</b>	
Proovi tähis: <i>buur</i>	Pakendite arv: <i>3</i>
<b>TOOTE KIRJELDUS</b>	
Proovivõtu koht: <i>Suiba tee, Kivi küla</i>	
Materjali nimetus: <i>looduslik buur</i>	
Toote kirjeldus: <i>kuuri 30 kivid, liiv, peagaterakna</i>	
Partii liik ja suurus: <i>3tk, 80kg</i>	
Toote kasutusotstarve: <i>TK + proctor</i>	
Muud kommentaarid:	

<b>PROOVIVÕTU KIRJELDUS</b>	
Proovivõtu kuupäev: <i>29.09</i> , 21	Kellaeg: <i>10:45</i>
Proovivõtu plaan: <b>koostati / ei koostatud</b>	
Ilmastikutingimused proovide võtmisel: <i>soe päev, pilves</i>	
Proovivõtu protseduur ja vahendid: <b>EVS 932-1</b> jaotis 8.8 järgi (proovide võtmine lamelaast kuhilast). <i>niideta seeraga labidala</i>	
Üksikproovi mass: <i>25,45</i> kg;	üksikproovide arv: <i>3</i> tk.
Proovide vähendamise meetod: laboris <i>jagamiskast</i>	
Edasi-tagasi läbisõit: <i>80 km</i>	Kulunud aeg: <i>60 min</i>
Proovivõtja firma: <b>AS Teede Tehnokeskus, Väike-Männiku 26, 11216 Tallinn</b>	
Esindaja nimi: <i>O. Jäät</i>	Allkiri: <i>OJ</i>
Protokollil allkirjastiades nõustun, et ei oma pretensioone proovivõtja/proovivõtmise protseduuri osas.	
Tootja / tarnija / ettevõtja:	
Esindaja nimi: <i>Pästel Saarep</i>	Allkiri: <i>P Saarep</i>
Kohalviibijad: <i>M. Kasik</i>	

# Lisa 9. Proctor-teimi ja sõelkõvera katseprotokoll [23]



## KATSEPROTOKOLL NR 806/24

26.04.2024 nr 7-6.4/924

Lk 1/2

**Tellijä:** Verston OÜ – Pärtel Sarap

### Proovide andmed:

<b>Objekt*</b>	Sutika tee, Krei küla	<b>Laborisse toomise aeg ja tooja</b>	24.04.2024 11:30, Oliver Jäär, Teede Tehnokeskus AS
<b>Võtmise koht*</b>	Sutika tee, Krei küla	<b>Labori reg nr</b>	0962
<b>Võtmise aeg ja võtja</b>	24.04.2024 10:45, Oliver Jäär, Teede Tehnokeskus AS		
<b>Proovi tähistus*</b>	Looduslik kruus		

### Katsetamine ja tulemused

Veesisaldus määrati vastavalt standardile EVS-EN 1097-5:2008. Tihendustegur  $K_t$  on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe (Teehoiutööde tehnoloogilised juhised. Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised. 2006-41). Standard Proctor-teimil kasutati B vormi (fr 0/31,5 mm) ja haamrit massiga 2,5 kg. Ülemõduliste kividega tehti veesisalduse ja maksimaalse kuivtiheduse ümberarvutus standardi EVS-EN 13286-2:2010 lisa C põhjal. Proovid on võetud labori poolt vastavalt standardile EVS-EN 931-1:2000 p 8.8. Proovivõtu protokoll on esitatud katseprotokolli digikonteineris.  
\* - Tellija poolt esitatud andmed

#### 1. Terastikulise koostise määramine EVS-EN 933-1:2012 (pesemine ja sõelumine)

<b>Reg nr</b> 0962
Võtmise koht: Sutika tee, Krei küla
Katsetamise kuupäev: 26.04.24

Läbib sõela ava (mm)	90	80	63	40	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
Mass ümardatud (%)	100	99	94	83	76	64	60	57	50	48	43	38	32	23	17	13
Peenosiste sisaldus (<0,063), f (%)	9,0															

#### 2. Sidumata ja hüdraailiselt seotud segude katsetamine EVS-EN 13286-2:2010 Proctor seadmega

<b>Reg nr</b> 0962
Võtmise koht: Sutika tee, Krei küla
Katsetamise kuupäev: 26.04.24

Vormi suurus	B
Haamri mass (Standard Proctor) (kg)	2,5
Maksimaalne kuivtihedus, $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2,22
Optimaalne veesisaldus, $w_0$ (%)	4,6
16 mm, 31,5 mm või 63 mm katsesõelale jäänud terade kogus protsentides kuivmassist (%)	24

**Amet Labori juhataja** **Nimi Henri Prank** /allkirjastatud digitaalselt/

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta. Labor ei vastuta tellija poolt esitatud andmete õigsuse eest. Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba. Labor väljastab värviilise templiga või digitaalselt allkirjastatud katseprotokolle.

TEEDE TEHNOKESKUS AS  
Väike-Männiku 26  
11216 Tallinn, Eesti  
Reg nr 10701123

Telefon: +372 677 1500  
info@teed.ee  
www.teed.ee

