



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja Arhitektuuri Instituut

**MAHUMASSI MÄÄRAMISE ERINEVAD
METOODIKAD, NENDE MÕJU JÄÄVPOORUSELE
JA TIHENDUSTEGURILE TARTU LÄÄNEPOOLSE
ÜMBERSÕIDU II EHTUSALA NÄITEL**

**DIFFERENT METHODOLOGIES FOR DETERMINING BULK
DENSITY, THEIR EFFECT ON VOID CONTENT AND
COMPACTION DEGREE, EXAMPLE OF TARTU'S WESTERN
BYPASS II CONSTRUCTION AREA
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Alver Allik

Üliõpilaskood: 191953EAXM

Juhendaja: Kristjan Lill

Tallinn 2023

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.

"....." 2023

Autor: Alver Allik

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023

Juhendaja: Kristjan Lill

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2023

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Alver Allik (sünnikuupäev: 08/04/1994),

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Mahumassi määramise erinevad meetodikad, nende mõju jäävpoorsusele ja tihendustegurile Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala näitel,

Different Methodologies for Determining Bulk Density, Their Effect on Void Content and Compaction Degree, Example for Tartu 's Western Bypass II Construction Area,

mille juhendaja on

Kristjan Lill,

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Ehituse ja Arhitektuuri Instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Alver Allik 191953EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/15 - Hooned ja rajatised, teedeehitus
Juhendaja(d): Kristjan Lill, dotsent

Lõputöö teema:

Mahumassi määramise erinevad meetodikad, nende mõju jäävpoorsusele ja tihendustegurile Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala näitel

Different Methodologies for Determining Bulk Density, Their Effect on Void Content and Compaction Degree, Example for Tartu´s Western Bypass II Construction Area

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Objekti kirjeldus
2. Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri ülevaade jäävpoorsusest ja tihendustegurist
3. Erinevad meetodid mujal maailmas
4. Kasutatud katsemeetodite kirjeldus
5. Katsetamine ja tulemuste analüüs

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise osa kirjutamine, andmete kogumine	21.12.2022
2.	95% valmis, lõputöö kaitsmistaotluse esitamine	12.12.2022
3.	Töö valmis, ettevalmistused kaitsmiseks, töö esitamine retsenseerimiseks	02.01.2023
4.	Lõppkaitsmine	11.01.2023

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 04.01.2023

Üliõpilane: Alver Allik 26.09.2022
/allkiri/
Juhendaja: Kristjan Lill 26.09.2022
/allkiri/

SISUKORD

1	Sissejuhatus.....	7
2	Taustainformatsioon	8
2.1	Objekti kirjeldus.....	8
2.1.1	Lähteandmed.....	9
2.2	Tööde vastuvõtmine	10
2.2.1	Jäävpoorsus	10
2.2.2	Tihendustegur.....	11
2.3	Meetodid mujal maailmas.....	12
2.3.1	Maaradariga mõõtmine	12
2.3.2	Corelok vaakumseade.....	16
2.3.3	Kompuutertomograafia	17
2.3.4	NDG ja NNDG seade	17
3	Katsetatud materjalid	19
3.1	Proovivõtukohtad	19
3.2	Segude lühikirjeldus	20
4	Kasutatud katsemeetodid.....	22
4.1	Erimassi määramine	22
4.1.1	Erimassi arvutamine	26
4.2	Proovikehade valmistamine	27
4.3	Mahumass	29
4.3.1	Meetod A: mahumass – kuiv.....	30
4.3.2	Meetod B: mahumass – immutatud ja kuivatatud pinnaga (saturated surface dry, SSD) (kasutatav kinnise pinnaga proovikehade puhul)	30
4.3.3	Meetod C: mahumass – hermetiseeritud proovikeha parafiinivahaga....	31
4.3.4	Meetod D: mõõtmete põhine mahumass	33
4.3.5	Meetod C: mahumass – hermetiseeritud vaakumseadmega	34
4.3.6	Meetod C: mahumass – hermetiseeritud parafilmiga.....	36
4.3.7	Jäävpoorsus	38
5	Tulemused koos analüüsiga	40

5.1	AC 8 surf 70/100.....	40
5.2	SMA 16 Pmb 65/105-65	43
5.3	AC 20 bin 70/100	47
5.4	AC 32 base 70/100 (GR)	50
5.5	Transpordiameti mahaarvamise kalkulatsioon	53
6	Kokkuvõte.....	58
7	Summary.....	59
	Kasutatud kirjandus	61

1 SISSEJUHATUS

Peale 24. veebruari aastal 2022 on olukord üle maailma väga ärev, ning seda rohkem vajatakse Eestisse suure kandevõimega teid, mis suudaks kanda nii liitlaste tehnikat kui ka meie enda sõjatehnikat. Mida suurem osakaal on raskeliiklusel ja liiklustihedusel, seda tugevamaid materjale peame kasutama. Tartu läänepoolse ümberehituse teine etapp on selleks väga hea näide, kuna kõik asfaltkonstruktsioonid on tardkivimtest ning kohati küündivad projektsete katendite kogupaksused 21 cm.

Magistritöö teema on seotud mahumasside, tihendusteguri ning jäävpoorsusega. Antud töö on jaotatud kolme etappi. Esimeses etapis antakse ülevaade objektist, miks antud ehitus üldse ette võeti ja mis lahendus projekteeriti. Kuna ehituse tellijaks on Transpordiamet, siis töö peab vastama teatud normidele. Transpordiametil on kindel „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri“ (Transpordiamet, 2021), kus on alapunktidena välja toodud erinevad trahviarvutused. Kuna uurimus keskendub rohkem mahumassile, jäävpoorsusele ja tihendustegurile, siis antud hetkel on fookus vastuvõtueeskirjas (Transpordiamet, 2021) just nendel punktidel. Lisaks Eesti juhiste jaoks on töös välja toodud erinevad tehnoloogiad, mida mujal maailmas kasutatakse nii purustatavate kui ka mittepurustatavate meetodite näitel.

Magistritöö põhifookus on katsetustel. Esimese katsena teostatakse iga segu liigist erimassi määramine. Erimass on kõigi edasiste katsetuste ning arvutuskäikude alus. Antud mahumassi määramise meetodid ning arvutuskäigud teostame TalTechi teede ja liikluse teadus- ja katselaboratoriumis, kus katsetatakse kõiki Eestis kasutatavaid mahumassi meetodeid. Katsetamisele eelnes välitöö objektil, mille tulemuseks saime 5 puurkeha sõiduteelt ning 5 puurkeha kõnniteelt. Segudeks on SMA 16 65/105-65, AC 20bin 70/100, AC 32base 70/100 ning AC 8 surf 70/100. Kõik segud on tardkivimite baasil. Lisaks puurkehadele sai objektilt paigalduse ajal võetud seguproovid. Iga segu ca 30 kg, et hiljem oleks võimalik teha laboris proovikehad, mille tulemusi puurkehadega võrrelda. Kuna plaan on võrrelda iga segu liiki kõigi EVS-EN 12697-6:2020 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) olevate katsemeetoditega, siis tuli teostada iga puurkeha kohta 4 erinevat mahumassi meetodit. Lisaks neljale standardis olevale mahumassi meetodile teostasime 2 uut meetodit, milleks on vakumeerimine ja parafilmiga katmine.

Lõpptulemusena on selge, milliseid meetodeid on mõistlik puurkehade katsetamisel kasutada ning mis ei ole nii otstarbekad. Viimase punktina teostatakse iga meetodi kohta „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri“ (Transpordiamet, 2021) järgi trahviarvutused, kus on tabelina välja toodud erinevad trahvi suurused.

2 TAUSTAINFORMATSIOON

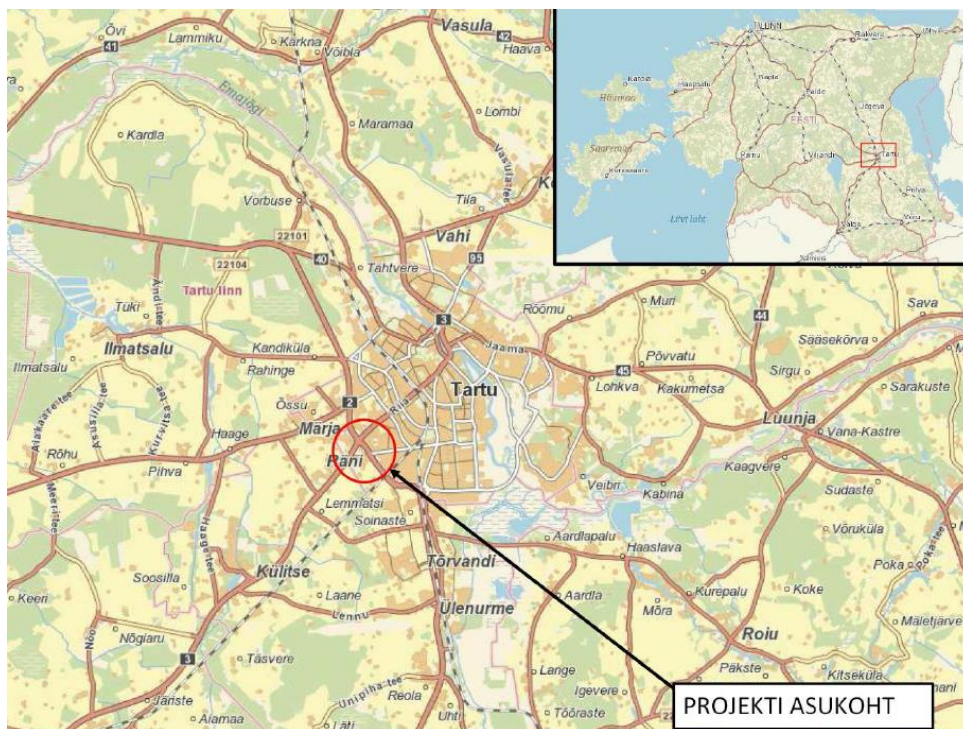
2.1 Objekti kirjeldus

Antud liiklussõlm on Eesti mõistes tuntud, kuna statistiliselt toimub antud ringristmikul kõige rohkem liiklusõnnetusi (joonis 2.1). Selle tulemusena ja kohati kasvava transiitliikluse osakaaluna hakati projekteerima kiiremini läbilaskvat ja ohutumat lahendust.

Käesolev tee ehitusprojekt on koostatud Maanteeameti ja Teedeprojekt OÜ (2020) vahel sõlmitud töövõtulepingu raames. Lepingu objektiks on Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala ehituse põhiprojekti koostamine.

„Vastavalt projekteerimistingimustele on projekti eesmärgiks Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala ümberehitus, liiklusohutuse taseme tõstmine, liikluse sujuvuse ja läbilaskvuse suurendamine põhimaanteedel ja tänavatel ning projekti realiseerimiseks vajalike ühenduste rajamine koos tehniliselt vajaliku teema määramisega“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 5).

„Projekteeritavad teed asuvad Tartu maakonnas Tartu linnas ja Kambja vallas. Projekteeritava lõigu põhiristmik on Riia ring, mis on E263 ja E264 maanteed ning Riia tn ristmik“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 5).



Joonis 2.1 Liiklussõlme asukoht (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 5)

2.1.1 Lähteandmed

Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala ehituse põhiprojekti kohaselt on projektilahenduse parameetrid:

- „Projekteerimise lähtetase- rahuldav
- Piirkiirus põhimaanteel 2 (E263)- 80 km/h
- Piirkiirus teistel teedel- 50 km/h
- Ristlõige- äärekiviga“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 6)

Projekti koostamise lähtealused on:

- „Projektilahenduse koostamisel lähtuda Maanteeameti projekteerimistingimuste lisas 2 toodud eskiisjoonistest
- Riia ringristmik laiendada 3-rajaliseks turboringristmikuks
- Projekteerida põhimaantee 2 (E263) viadukt üle Riia ringristmiku ja jalakäijate tunnelid ringristmiku harudele
- Projekteerida viadukt üle Aardla tn
- Projekteerida müraseinad vastavalt eskiisjoonistele
- Projekteerida teedele ja tänavatele valgustus (v.a kinnistutele juurdepääsuteed)
- Sademevete ärajuhtimine lahendada kinnisel meetodil
- Projekteerida haljastus kohtadesse kus see on sobilik
- Projekteerida tehniliselt optimaalsed ja finantsiliselt mõistlikud lahendused“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 6)

Projekteeritaval alal paiknevad järgmised suuremad ristmikud on:

- „Põhimaanteed 2 (E263) ja 3 (E264) ning Riia tn ringristmik (Riia ring)
- Põhimaantee 2 (E263) ja Aardla tn ringristmik
- Põhimaantee 3 (E264) ja Aardla tn ristmik
- Põhimaantee 3 (E264) ja Optika tn ristmik“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 9)

„Piirkond on suure liiklussagedusega, kus kohalik liiklus ja transiitliiklus segunevad. Tipptundidel esineb läbilaskvuse probleeme Riia tn ja Aardla tn ringristmikel. Põhimaanteed 2 ja 3 ristmiku (Riia ring) vahetus läheduses asub ka Lõuna-Eesti suurim kaubanduskeskus, mis suurendab liiklusvoogusid ja pikendab õhtust tippaega“ (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 9).

„Kuna piirkonnas on kaubanduskeskused (Lõunakeskus, Aardla tn Selver), siis on ka palju jalakäijaid ja jalgrattureid. Kergliiklusteede lõikumised põhimaanteega 2 (E263)

on lahendatud eri tasapinnas (tunnelid) Raja tn ja Aardla tn ristmikel. Ülejäänud teeületused on reguleerimata jalakäijate ülekäigurajad" (Teedeprojekt OÜ, 2020, lk 9).

2.2 Tööde vastuvõtmine

Iga objekt tuleb anda koos dokumentatsiooniga töövõtjale üle. Selle eelduseks on Transpordiametil juhend, millele peab ehitus vastama. Eestis on selleks „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri" (Transpordiamet, 2021). Kui töö ei vasta Eestis kehtestatud normidele, siis toimub mahaarvamine ehk summa vähendamine. „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjas" (Transpordiamet, 2021) on välja toodud arvutuskäigud, kontrollimaks, kas töö vastab normidele. Kuna antud lõputöö keskendub jäävpoorsusele ja tihendustegurile, siis on juhendis selle kohta eraldi lõigud.

2.2.1 Jäävpoorsus

Kandevkihti ehk base kihti loetase poorseks asfaltbetooniks. See kiht laseb vett läbi ning antud kihi tööpõhimõtte on koormusi vastu võtta. Base kihile paigaldatakse kas vahekiht ehk bin või surf kiht, mida nimetatakse ka kulumiskihiks. Surf kiht on otseses kontaktis liikluse- ja ilmastikuoludega. Selle tulemusena peab ta olema vastupidav temperatuuri kõikumistele ja naelrehvidele. Kui kate jääb liiga poorseks: jäävpoorsus jääb üle lubatud piiri, on suur tõenäosus, et sulamis- ja külmumistsüklid hakkavad katet lõhkuma.

Alloleval pildil on näha, kus surf segu on jäänud liiga poorseks (joonis 2.2).



Joonis 2.2 Poorne surf segu

„Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirja“ kohaselt, „kui kattekihi jäävpoorsus ületab suurimat lubatud piirväärtust, siis vähendatakse katte maksumust katteprooviga haaratud pindalal summa võrra, mille suurus arvutatakse järgneva valemiga:

$$A = 0,03 \times A' \times H \times F \quad (2.1)$$

kus A - maksumuse vähendamine, €;

A' - maksumuse vähendamine;

$A' = 4p^2$ - AC surf, AC bin ning SMA segust katted; peale

$A' = 2p^2$ - AC base ja MSE tehasesegust katted;

H - katte hind €/m²;

F - prooviga haaratud katte pindala, m²;

p - kattekihi lubatud suurima jäävpoorsuse (%) ja tegeliku jäävpoorsuse (%) vahe“ (Transpordiamet, 2021, lk 8).

„Kui kattekihi jäävpoorsus on väiksem, kui madalaim lubatud piirväärtus, siis vähendatakse katte maksumust katteprooviga haaratud pindalal summa võrra, mille suurus arvutatakse eelpool toodud valemiga, arvestusega, et p - kattekihi lubatud väiksema jäävpoorsuse (%) ja tegeliku jäävpoorsuse (%) vahe. Tegelik jäävpoorsus mõõdetakse juhises esitatud „Kattest puurkehade võtmise skeem“ kohaselt võetud kahe katteproovi/puurkeha keskmisena või maaradari mõõtefaili põhjal ühe meetri pikkuste lõikude alusel“ (Transpordiamet, 2021, lk 8).

2.2.2 Tihendustegur

„Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirja“ kohaselt, „kui katte tihendustegur ei vasta juhises antud nõutule, siis vähendatakse katte eest makstavat tasu summa võrra, mille suurus arvutatakse järgneva valemiga:

$$A = 0,01 \times A' \times H \times F \quad (2.2)$$

kus A - maksumuse vähendamine, €;

A' - maksumuse vähendamine;

$A' = 4p^2$ - AC surf, AC bin ning SMA segust katted;

$A' = 2p^2$ - AC base ja MSE tehasesegust katted;

H - katte hind €/m²;

F - prooviga haaratud katte pindala, m²;

p - tihendusteguri piirväärtuse (%) ja piirväärtusest väiksema tegeliku väärtuse (%) vahe“ (Transpordiamet, 2021, lk 8-9).

Eeskiri ütleb, et „katseprotokollis ja teetööde dokumentides suhtarvuna väljendatud tihendustegur teisendatakse protsentideks (%). Tihendustegur määratakse juhises esitatud „Kattest puurkehade võtmise skeem“ kohaselt võetud kahe katteproovi/puurkeha keskmisena või maaradari mõõtefaili põhjal ühe meetri pikkuste lõikude alusel. Jäävpoorsuse ja tihendusteguri maksumuse vähendamise valik. Kattekihi jäävpoorsuse ja tihendusteguri nõuetele mittevastavuse korral tasu vähendamisel arvestatakse tulemust, mis võimaldab makstavat tasu rohkem vähendada“ (Transpordiamet, 2021, lk 9).

„Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri“ ütleb, et „kui katte vuugi tihendustegur ei vasta juhise nõutule, siis vähendatakse katte eest makstavat tasu summa võrra, mille suurus arvutatakse järgneva valemiga:

$$A = 0,03 \times A' \times H \times L \quad (2.3)$$

kus A - maksumuse vähendamine, €;

A' - maksumuse vähendamine;

$A' = 3,5p^2$ – AC surf, ning SMA segust katted;

$A' = 2p^2$ – AC bin, AC base ja MSE tehasesegust katted;

H - katte hind €/m²;

L - vuugiprooviga haaratud vuugi pikkus, m;

P - vuugi tihendusteguri piirväärtuse (%) ja piirväärtusest väiksema tegeliku väärtuse (%) vahe“ (Transpordiamet, 2021, lk 9).

Vastavalt „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjale“ „katseprotokollis ja teetööde dokumentides suhtarvuna väljendatud tihendustegur teisendatakse %. Tihendustegur mõõdetakse vuugist vastavalt Juhises esitatud skeemi kohaselt võetud puurkeha/vuugiproovi alusel või maaradari mõõtefaili põhjal ühe meetri pikkuste lõikude alusel. Vuugi proov peab olema võetud selliselt, et vuuk oleks võimalikult proovikeha keskel“ (Transpordiamet, 2021, lk 9).

2.3 Meetodid mujal maailmas

2.3.1 Maaradariga mõõtmine

„Maaradar - tehnoloogia (GPR e. Ground Penetrating Radar) võimaldab mõõta teekatte dielektrilisi väärtusi, mille põhjal arvutatakse teekatte jäävpoorsused. Meetod sobib jäävpoorsuse määramiseks“ (Maanteeamet, 2016, lk 10).

„Erinevalt traditsioonilisest kvaliteedi kontrollil võetavate puurkehadega kontrollimisest saadakse radariga mõõtmisel katkematu info kontrollitava asfaltbetoonkatte jäävpoorsuste väärtustest mõõtmisrajal“ (Maanteeamet, 2016, lk 11). Kuna maaradariga teostatakse ainult 8 puurauku paigaldatud segust, siis selle tulemusena kahjustatakse mõõdetavat katet oluliselt vähem. Puuraukude tegemine annab teadmise ainult teatud alalt, kuid maaradariga mõõtmisel saab tulemuse tervelt alalt. Kahjuks maaradariga ei ole võimalik mõõta niisket või külmunud katet (Maanteeamet, 2016).

„Katte jäävpoorsuse all mõistetakse katte õhupooride mahu ja katte kogumahu suhet protsentides. Kattematerjali dielektrilisi omadusi kirjeldavate väärtuste (suhteline dielektriline läbitavus) all mõistetakse elektrivälja poolt mõjutatava materjali võimet elektromagnetilist energiat salvestada ja seejärel edasi kanda. Samuti võib seda kirjeldada kui materjali omadust elektromagnetväljas polariseeruda ja sellest tulenevalt reageerida loodud elektromagnetlainetele. Materjali dielektriline väärtus on funktsioon materjali komponentide mahulistest proportsioonidest ja nende komponentide dielektrilistest väärtustest“ (Maanteeamet, 2016, lk 11).

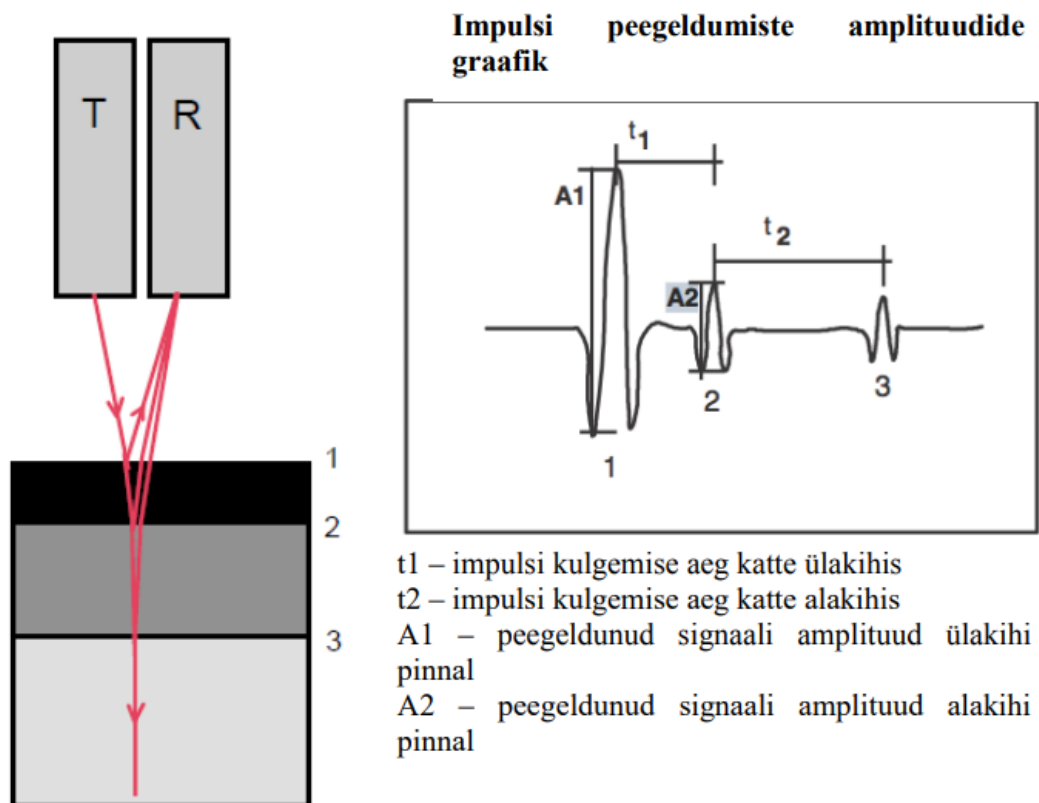
„Jäävpoorsuse mõõtmine põhineb katte dielektriliste väärtuste muutumisel. Dielektriline läbitavus on üks materjali elektrilisi omadusi iseloomustavaid näitajaid. Katte dielektrilised omadused sõltuvad katte komponentide dielektrilistest omadustest. Katet tihendades katte poorsus väheneb ning suurema dielektrilise läbitavusega komponentide suhteline osakaal kasvab. Katte dielektriline läbitavus tihendades kasvab. Dielektriline väärtus leitakse õhk-paar antennidele hästi sobiva peegeldumistehnika abil. Katendi dielektriline väärtus leitakse arvutustega erinevate kihtide pindadelt tagasipeegelduvate elektromagnetlainete amplituudidest. Antenni saatja saadab välja elektromagnetilisi impulsse, mille tagasipeegeldused kattekihtide pindadelt püütakse kinni antenni vastuvõtjaga ja registreeritakse“ (Maanteeamet, 2016, lk 11).

„Õhk-paar antenni tööpõhimõte on kujutatud alloleval joonisel (joonis 2.3), kus T on antenni saatja ja R on antenni vastuvõtja ning numbritega 1, 2 ja 3 on tähistatud kattekihtide pinnad, millelt toimuvad tagasipeegeldumised. Dielektriline väärtus ϵ_r leitakse alljärgneva valemiga:

$$\epsilon_r = \left(\frac{1 - A_a/A_m}{1 + A_a/A_m} \right)^2 \quad (2.4)$$

kus A_a - tagasipeegeldumise amplituud kattelt

A_m - tagasipeegeldumise amplituut metallplaadilt“ (Maanteeamet, 2016, lk 12).



Joonis 2.3 Impulsi peegeldumiste amplituudide graafik (Maanteeamet, 2016, lk 12)

„Nõuded mõõteseadele on järgmised:

- vähemalt 1,0 GHz õhk-paarantenn;
- mõõtmisandmete registreerimise ja salvestamis süsteem;
- baassõiduk;
- arvuti koos andmetöötlustarkvaraga” (Maanteeamet, 2016, lk 12).

„Mõõtmistulemused salvestatakse minimaalselt sagedusega 4 mõõtmist (skaneerimist) meetri kohta. Mõõtmised teostatakse võimalikult ühtlase kiirusega. Üks mõõtmine haarab ala umbes 300 mm x 300 mm. Mõõdetakse vähemalt üks profiil igal põhisõidurajal rattajälgede vahelt ning põhisõiduradade vahelised vuugid. Iga mõõtmine teostatakse ühtse profiilina algusest lõpuni. Põhjendatud vajadusel võidakse kokku leppida eeltoodust erinevas mõõtejoonte pikkuses, koguses ja asukohas. Mõõtmisi ei ole lubatud teostada vihmaga või märjal kattel. Samuti ei ole mõõtmisi lubatud teostada kui katend on külmunud või kui õhutemperatuuri on alla $+1^{\circ}\text{C}$ ” (Maanteeamet, 2016, lk 13).

„Tee vastuvõtul teostatud teekatte poorsuse mõõtmistulemused esitatakse pärast vormistamist koheselt tellijale või tellija määratud isikule. Roimela (1998) sõnul põhineb

poorsuse määramine katte keskmisel dielektrilisel väärtusel, kasutades ära uuringuid, milles laboratoorsete katsete abil on leitud funktsioon materjali dielektrilisuse ja jäävpoorsuse vahel. Potentsiaalsed tee ristlõiked proovivõtuks eelvalikukohad kinnistatakse värviga kattele vahetult enne mõõtmiste teostamist ning mõõtmiste ajal lisatakse elektroonilised asukohamärked maaradariandmetele" (Maanteeamet, 2016, lk 13).

„Eelvalikukohti peab olema vähemalt 3 ja need valitakse võimaluse korral täispikettidel selliselt, et eelvalikukohtade kaugused objekti otsest ja üksteisest oleksid võimalikult ühesugused – s.o ¼ objekti pikkusest. Proovivõtuks valitakse need eelvalikukohad (tavaliselt kaks kohta), mille piirkonnas ϵ_r väärtused on kõige lähedasemad katte keskmisele. Proovivõtuks valitakse selline koht eelvalikukoha piirkonnast, mille vahetus läheduses ϵ_r väärtused hälbivad vähim (ϵ_r kõikumine meetri kohta $<0,2$). Sellistest kohtadest võetakse kokku 4 proovikeha sõiduradadelt ja 4 proovikeha vuugist eeldusel, et kogu objekti ulatuses on kasutatud sama segu. Proovikehad peab võtma mõõtetööde teostaja poolt näidatud kohtadest viimase juuresolekul" (Maanteeamet, 2016, lk 13).

„Kalibreerimisproovikehad võetakse ning nende jäävpoorsused ja tihendustegurid ning erimass määratakse EVS-EN standardi kohaselt akrediteeritud laboratooriumis. Igale mõõterajale arvutatakse jäävpoorsused 1 m pikkuste lõikude keskmistena alljärgneva valemiga:

$$y = 272,93e^{-1,3012k\epsilon_r} \quad (2.5)$$

kus k - kalibreerimistegur;

ϵ_r - mõõdetud dielektrilisuse väärtus.

Juhul kui kalibreerimistegurid erinevad üksteisest märgatavalt, peab aruandes esitama selle kohta põhjenduse" (Maanteeamet, 2016, lk 13).

Kuna antud tehnoloogiaga mõõtes saab parema ülevaate jäävpoorsusest, siis on soovituslik seda teha maaradariga. Kui mingil põhjusel ei ole võimalik maaradariga jäävpoorsust mõõta, peab tellija esitama kirjaliku põhjenduse, et esineb üks kolmest tingimusest (Maanteeamet, 2016):

- „Eestis teenust ei pakuta (vajalik Eestis registreeritud teenusepakkuja kinnituskiri);
- ilmastikust tingitud põhjustel (vajalik teenusepakkuja kinnituskiri);
- muud põhjused (vajalik teenusepakkuja kinnituskiri)" (Maanteeamet, 2016, lk 14).

Kirjaliku tõendi peab koostama maaradariga jäävpoorsust mõõtev ettevõtte, kellel on vähemalt kolmeaastane mõõtmise kogemus. Ilmastikust tingitud põhjuseks loetakse olukorda, kus 28 päeva jooksul ei ole võimalik mõõtmist teostada, kuna kate pole kuiv. Muudeks põhjusteks loetakse olukorda, kus mõõtmisandmed pole kasutatavad. Selleks on jäävpoorsuse ja dielektrilise väärtuse erinevus või keskkonnast ja materjalidest tingitud probleemid. Kui maaradariga mõõtmine pole objektil võimalik on võimalus teostada objektil puurkehade võtmine. Puurkehad võetakse kõigi osaliste kohaloleku ajal akrediteeritud labori poolt ning määratakse proovikehade erimass, jäävpoorsused ja tihendustegurid akrediteeritud laboris (Maanteeamet, 2016).

2.3.2 Corelok vaakumseade

Kuna viimasel ajal on hakatud kritiseerima SSD meetodit, siis on hakatud otsima alternatiive. Üheks alternatiiviks on Corelok vaakummeetod. Hall, Griffith ja Williams (2001) proovisid Arkansase Ülikoolis Corelok meetodit ning võrdlesid seda SSD meetodiga.

Antud meetodi puhul kuiv puurkeha kaalutakse ja pannakse vaakumkotti, mille tihedus on teada, vakumeeritakse ning pannakse veevanni. Edasi teostatakse arvutusi nagu meetod C. Antud katsega jõuti järeldusele, et kordusproovide tegemisel on Corelok meetod täpsem kui SSD meetod (Hall et al., 2001).

Samuti on Corelok meetodit uurinud Xie ja Watson (2004) Auburni Ülikools. Antud uuringu käigus võrreldi SSD meetodit ja Corelok meetodit. Jõuti järeldusele, et SSD meetod ei sobi SMA segude puhul, kuna vesi valgub proovikehast kiirelt välja ning selle tulemusel on arvutuslik mahumass suurem kui tegelik mahumass. Corelok meetodiga testimisel viidi sisse parand.

Corelok meetodi ja SSD meetodil tekkisid erinevused korduskatsetel. Nimelt väga tiheda puurkeha puhul oli kahe meetodi erinevus 0,5%. Arvati, et tiheda puurkeha puhul peaks Corelok meetod ja SSD meetod andma täpselt samad tulemused. Kontrolliks teostati SSD ja Coreloki katsed terassilindriga. Silindri pind on sile ning pinnapoorideta. SSD meetodiga saadi tulemuseks 0% ehk antud silinder on poorideta. Coreloki meetodiga saadi kahe katse keskmiseks 0,6%. Sellest tingituna arvatakse, et Corelok meetodil on süsteemi viga, mis pole arvestanud vaakumkoti jäikust, proovikeha geomeetrilist kuju ning vaakumrõhku, siis neid tulemusi ilma parandita ei saa võrrelda. Parandi arvutamiseks kasutati terassilindrit, mille kaal ja tihedust oli teada (Xie & Watson, 2004).

2.3.3 Kompuutertomograafia

Harbin Tehnoloogia instituudi ja Hongkongi polütehnilise ülikooli ühistööna valmis uuring, kus võrreldi nelja erinevat meetodit kompuutertomograafiaga (Zhang, Leng, Dong, Liu ja Zhang, 2018). Meetoditeks olid EVS-EN 12697-6:2020 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) järgi meetod D ja meetod C. Lisaks katsetati vaakumtehnoloogiat ehk Corelok seadmega vakumeerimist ja parafilmiga proovikeha katmist (Zhang et al., 2018).

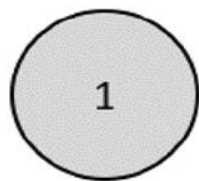
Uuringus jõuti järeldusele, et meditsiiniline kompuutertomograafia aparaat ei sobi, vaid tuleb kasutada tööstuslikku masinat. Vastava programmiga töödeldes annab kompuutertomograafia aparaat väga täpsed tulemused. Antud andmeid hakati võrdlema erinevate meetoditega. SSD meetod ja parafilmi meetod pole kompuutertomograafia meetodiga võrreldes täpsed. Üpriski sarnaseid tulemusi näitas vakumeerimine ja kompuutertomograafia (Zhang et al., 2018).

Väiksema poorsusega proovikehadel on vaakumseadmega ja parafilmiga teostatud katsed sarnased. Ning ühtivad kompuutertomograafia andmetega, kuid leiti, et SSD meetod on ülehinnatud (Zhang et al., 2018).

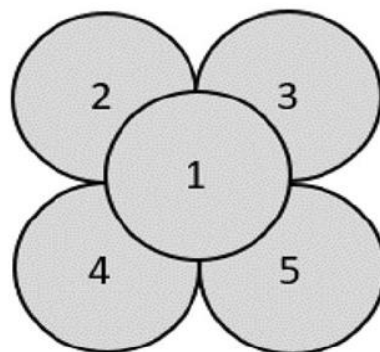
2.3.4 NDG ja NNDG seade

Uurimustöö koostati Sunhine Coast Ülikooli poolt lennujaama objekti põhjal. Antud uurimustöö hõlmab NNDG mõõtmisseadmega mõõtmist erinevates tingimustes. NDG ehk tuuma tihendusemõõtja. Antud tehnoloogia töötati välja 1950. aastal. Materjalidest läbitungimiseks kasutatakse radiatsioonikiirgust. Teedehituses hakati kasutama 1990. aastal. Antud seade on ohtlik ning peab transportima eraldi autoga. Seade ei ole usaldusväärne, kuna tihti saadi samadest kohtadest mõõtes erinevaid tulemusi (White, 2019).

NNDG ehk mitte tuuma tihendusemõõtja (joonis 2.7) – antud seade on ohutum kui NDG mõõtja. Tööpõhimõte on elektromagnetkiirusel ning välja töötati see 1990. aastal. Enne kasutamist tuleks antud seade kalibreerida ehk puurauk teha. Kui seade on kalibreeritud, saab kasutada kahte mõõtmisprogrammi. Esimene programm on ühe mõõtmise tulemus ja teine programm on 5 keskmise mõõtmise mõõtmistulemus (joonis 2.6) (White, 2019).



(a)



(b)

Joonis 2.6 NNDG mõõtmiskeem (White, 2019, lk 4)

NNDG seadet kasutati erinevates tingimustes. Jõuti järeldusele, et ühe koha mõõtmise režiim on täpsem kui 5 mõõtmise keskmine. Veel avastati, et antud seade on usaldusväärne, kui pind on kuiv ning temperatuuri kõikumust pole (White, 2019).



Joonis 2.7 Non Nuclear Pavement Density Gauge Pqi 380 (Indiamart)



Joonis 3.2 Kattest puurkehade võtmine

3.2 Segude lühikirjeldus

2021. aastal toodeti Eestis kokku 1 696 543 tonni asfaltsegu. Protsentuaalselt rohkem teistest segudest segati kokku surf segu (61%) (Eesti Taristusehituse Liit, 2022). Vastavalt Transpordiameti „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhisele“ mõistetakse „asfaltsegude all EVS 901-3 nõuetele vastavaid asfaltbetoonsegusid, killustikmastiksfasfalt segusid ja mustsegusid ning asfalt- ja mustkate all nendest segudest valmistatud katteid“ (2021, lk 4).

Igal asfaltsegul on oma retsept, mis peab vastama EVS 901-3 (Tee-ehitus., 2021) nõuetele. Näiteks AC surf segu koosneb, fillerist, vastava fraktsiooniga peen- ja jämekillustikust ning bituumenist. Antud lõputöös kasutati nelja erinevat segu. Kõnniteel AC 8 surf 70/100, sõidutee kulumiskihis SMA 16 Pmb 65/105-65, siduvkihis AC 20 bin 70/100 ja kandevkihis AC 32 base 70/100.

Kuna objekti liikluskoormus on väga suur, siis moodustavad kõikide segude täitematerjali tardkivimid. Bituumensideaineks kasutatakse ainult kahe ettevõtte toodet. AB Orlen Lietuva, mille rafineerimistehas on Leedus ning NYNAS AS, mille rafineerimistehas on Rootsis. Kandevkihis, siduvkihis ning kõnnitee kulumiskihis kasutatakse bituumenit 70/100, mille tootja on Orlen Lietuva ning sõidutee kulumiskihis polümeermodifitseeritud bituumenit 65/105-65, mille tootja on NYNAS AS. Täitematerjalilis kasutatakse kahe karjääri tooteid. Kandevkihis on kasutatud Rudus OY

killustikku ning karjääriks Inkoo. Siduvkihis kasutatakse Norrast toodud killustikku TAU. Sama karjääri toodet kasutatakse ka kulumiskihis. Filleriks on kas Rakkes asuva Nordkalk AS toode või Väo lubjakivifiller.

4 KASUTATUD KATSEMEETODID

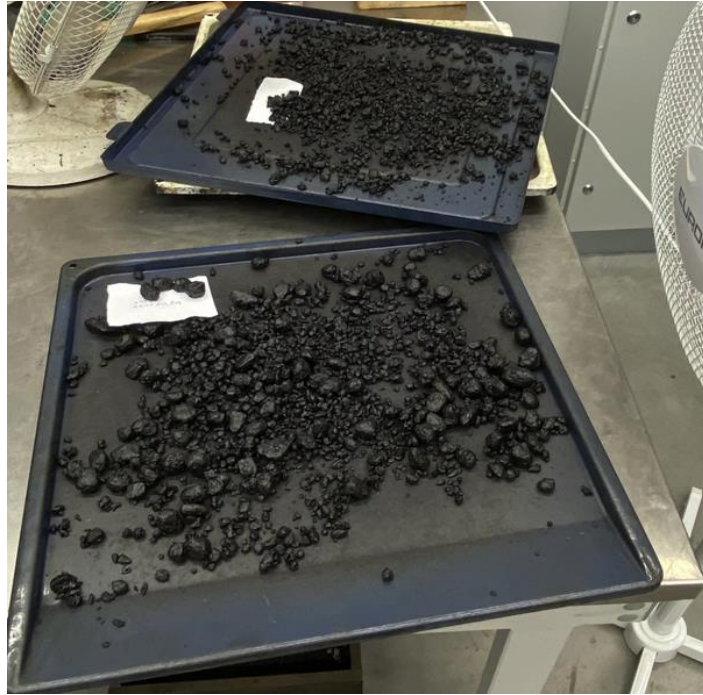
4.1 Erimassi määramine

Vastavalt EVS-EN 12697-6:2020 kohaselt on „erimass poorideta asfaltsegu mass mahuühiku kohta teataval katsetemperatuuril“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 4). Enne erimassi määramist tuli proovisegu eelnevalt kuumutada ahjus, et see oleks töödeldav. Kui katseproovi temperatuur on $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, võib proovi ahjust välja võtta. Järgnevalt kobestatakse segu ning toimub jagamine (joonis 4.1). Iga fraktsiooniga segul on oma kindel kogus, mis peab erimassi määramiseks alles jääma.



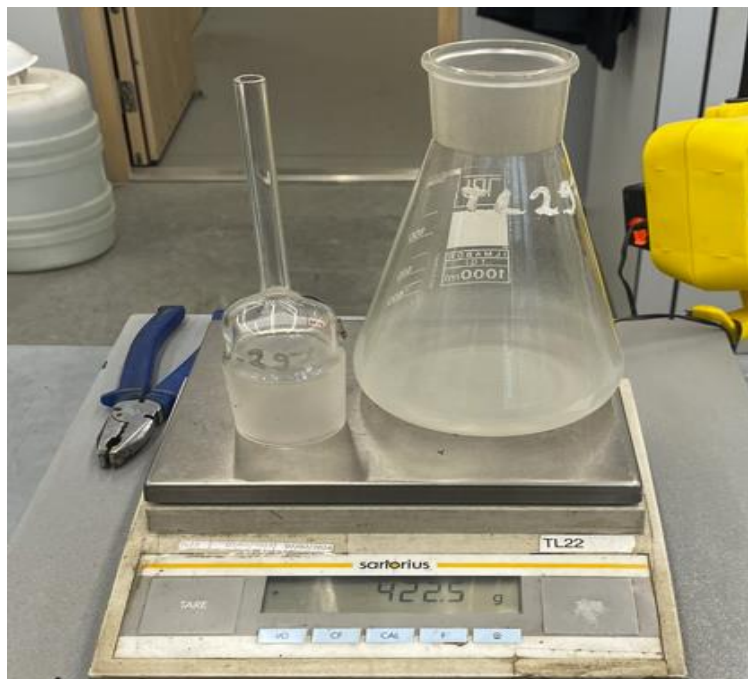
Joonis 4.1 Segu kobestamine

Peale kobestamist laotatakse proov plaadi peale laiali ning toimub kivimite üksteisest eraldamine, seejärel tuleb katseproov maha jahutada (joonis 4.2).



Joonis 4.2 Katseproovi maha jahutamine

Vastavalt EVS-EN 12697-5 „kõik massid tuleb määrata grammides (g), ümardatud lähima 0,1 grammini. Püknomeetri maht tuleb määrata kuupmeetrites (m^3), ümardatuna lähima $0,5 \times 10^{-6}$ kuupmeetriini (m^3). Kaaluge teadaoleva mahuga tühi püknomeeter koos ülaosaga“ (joonis 4.3) (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 9). „Asetage kuiv katseproov püknomeetrisse, viige see ümbritsevale temperatuurile, seejärel kaaluge taas koos ülaosaga (m_2)“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 9).



Joonis 4.3 Püknomeetri kaalumine

Vastavalt EVS-EN 12697-5 „täitke püknomeeter õhuvaba vee, demineraliseeritud vee või lahustiga nii, et vedeliku nivoo jääb 30 mm või enam püknomeetri ja ülaosa ühenduskohast allapoole“ (joonis 4.4) (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 9).



Joonis 4.4 Püknomeetri täitmine õhuvaba veega

EVS-EN 12697-5 kohaselt „eemaldage poorides olev õhk, rakendades selleks (15±1) minuti vältel osaliselt, jääkrõhuga 4kPa või vähem, vaakumit“ (joonis 4.5) (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 9-10). „Tähtis on õhu eemaldamine juurdepääsetavatest pooridest. Õhu eemaldamist saab hõlbustada segamise, pöörlemise või püknomeetri väristamisega vibroalusel. Kui kasutate vett, võib väikese koguse dispergaatori (kaks tilka) lisamine õhu eemaldamist hõlbustada. Kui kasutate lahustit, tuleks segada ja väristada ilma vaakumit rakendamata. Õhuvaba vee võib asendada keedetud veega. Mõnede segude jaoks võib osutuda vajalikuks optimaalse vakumeerimisaja määramine, pikendada seda 15 minutist edasi 1 või 2 minuti kaupa ja tuvastades suurima erimassini viinud aja. Sellistel puhkudel tuleb vakumeerimisaeg katseprotokollis kirjutada“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 9-10).



Joonis 4.5 Pooridest õhu eemaldamine

EVS-EN 12697-5 kohaselt „kinnitage ülaosa või kork. Täitke püknomeeter õhuvaba vee, demineraliseeritud vee või lahustiga (veenduge, et õhku ei lisanduks) peaaegu ülaosa märgini või korgini“ (joonis 4.6) (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 10). „Kui kasutate vett, asetada püknomeeter vähemalt 30 minutiks, kuid mitte kauemaks kui 180 minutiks valitud kindla katsetemperatuuriga ($\pm 1,0$ °C) veevanni, et viia proovi ning püknomeetris sisalduva vee temperatuur samale tasemele veevanni vee temperatuuriga. Alternatiivina võib püknomeetri panna ka vähemalt 60 minutiks, kuid mitte kauemaks kui 180 minutiks valitud katsetemperatuuril olevasse termostaati, et viia püknomeetris olevad proov ja vesi katsetemperatuurile ($\pm 1,0$ °C). Kui kasutate lahustit, asetage püknomeeter vähemalt 60 minutiks, kuid mitte kauemaks kui 180 minutiks valitud kindla katsetemperatuuriga ($\pm 0,2$ °C) veevanni, et viia proov ning püknomeetris sisalduva lahusti temperatuur samale tasemele veevanni vee temperatuuriga. Veevanni vee tase peab olema umbes 20 mm püknomeetri servast allpool“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 10).



Joonis 4.6 Püknomeeter täidetud demineraliseeritud veega

Vastavalt EVS-EN 12697-5 „täitke püknomeeter vee või lahustiga ja sobitage vedeliku tase mõõtemärgini. Vee või lahustiga täidetud mahuti tuleb veevannis viia katsetemperatuurile. Võtke püknomeeter veevannist välja, kuivatage selle välispind ja kaaluge see kohe“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 10).

4.1.1 Erimassi arvutamine

Algul tuleb arvutada vee tihedus katsetemperatuuril. Arvutus toimub EVS-EN 12697-5 kohaselt valemiga:“

$$\rho_w = 1,0002205 + \left(\frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6} \right) \quad (4.1)$$

kus ρ_w - on veetihedus katsetemperatuuri megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)
 t - on vee temperatuur kraadides Celsiuse järgi ($^{\circ}\text{C}$)“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 11).

Tuleb arvutada mahulise meetodi käigus määratud asfaltsegu erimass ρ_{mw} ümardatuna lähima 0,001 Mg/m³ EVS-EN 12697-5 kohaselt järgmiselt:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \times V_p - (m_3 - m_2) \div \rho_w} \quad (4.2)$$

kus ρ_{mv} - on mahulise meetodiga määratud asfaltsegu näiv erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m³), ümardatuna lähima 0,001 Mg/m³;

m_1 - on püknomeetri, ülaosa ja vedru (selle olemasolul) ühismass grammides (g);

m_2 - on püknomeetri, ülaosa, vedru ja katseproovi ühismass grammides (g);

m_3 - on püknomeetri, ülaosa, vedru, katseproovi ja vee või lahusti ühismass grammides (g);

V_p - on mõõtemärgini täidetud püknomeetri maht kuupmeetrites (m³);

ρ_w - on vee tihedus või lahusti tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m³) ümardatuna lähima 0,0001 Mg/m³ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018, lk 11).

4.2 Proovikehade valmistamine

Objektilt sai võetud iga segu kohta 5 suurkeha. Lisaks tehti iga segu kohta laboratoorsed proovikehad. Igast segust 4 proovikeha valmistati lööktihendamise meetodikaga vastavalt EVS-EN 12697-30 juhisele (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018), kus proovikeha valmistamise temperatuur surf, base ja bin segudel on 145 °C (joonis 4.7). Temperatuur on erinev SMA 16 65/105-65 milleks oli 165 °C. Kuna base segu Marshalli lööktihendajasse standardi järgi ei mahu, siis base segu tehti güräator-tihendajaga (joonis 4.8). Lisaks tehti ühe seeria SMA 16 65/105-65 segu güräator-tihendajaga, et võrrelda tulemusi. Güräator-tihendajaga näeb standard EVS 901-3 (Tee-ehitus., 2021) ette, et SMA 16 65/105-65 proovikeha tihendamisel teostab güräator 120 pööret ning base segu korral 60 pööret. Güräator-tihendajaga valmistati 3 proovikeha.



Joonis 4.7 Marshalli lööktihendaja



Joonis 4.8 Gýraator-tihendaja base proovikeha valmistamine

4.3 Mahumass

Eestis on mahumassi määramiseks neli meetodit. Lisaks mahumassile tuleb määrata ka erimass, et saaks teada tihendatud asfaltkatte jäävpoorsuse. Mahumassi määramine toimub vastavalt EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020). EVS-EN 12697-6 on välja toodud kõigi katsemeetodite kirjeldus ning protseduurireedid. Esimese asjana kui puurkehad laborisse viidi mõõdeti iga puurkeha paksused vastavalt standardile EVS-EN 12697-36 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2022).

Kuna üks puurkeha sisaldas kohati kolme kihti siis mõõdeti paksused pealiskihist kuni iga kihi lõpuni. Paksus mõõdeti neljast punktist. Peale kihtide mõõtmist toimus puurkehade eraldamine lõikuriga. Igast puurkehast eraldati järgnev segu kiht ning puurkeha ots lõigati sirgu, et ei jääks ühegi teise kihi komponente. Peale eraldumist tuli kõik puurkehad puhtaks pesta, et ei jääks pooridesse tolmu ega lõikamisel tekkinud tolmu ja vee segu. Hiljem jäeti puurkehad üheks ööpäevaks seisma ventilaatorite alla, et vesi saaks pooride seest välja kuivada.

Euroopas kasutatavad katsemeetodid on järgmised:

- „meetod A: mahumass – kuiv (kasutatav väga kinnise pinnaga proovikehade korral)“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 4). Antud meetodit on soovitatav rakendada, kui poorsus on kuni 7%;
- „meetod B: mahumass – immutatud ja kuivatatud pinnaga (saturated surface dry, SSD) (kasutatav kinnise pinnaga proovikehade puhul)! (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 4). Antud meetodit on soovitatav rakendada, kui poorsus on kuni 7%;
- „meetod C: mahumass – hermetiseeritud proovikeha (kasutatav avatud või koreda pinnaga proovikehade korral)“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 4). Antud meetodit on soovitatav rakendada, kui poorsus jääb alla 10%;
- „meetod D: mahumass – mõõtmepõhine (kasutatav korrapärase pinna ja geomeetrilise vormiga, st ruudu-, ristküliku- või silindri- vms kujuliste proovikehade korral)“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 4). Antud meetodit on soovituslik rakendada, kui poorsus on üle 10%.

Laboris katsetamisel teostati kõik katsed kindlas järjekorras. Esimene meetod olid mõõtepõhine mahumassi määramine, teisena teostati meetod A ning samal päeval meetod B. Meetod A ja meetod B on võimalik paralleelselt teostada ning selline lahendus andis ajaliselt suure kokkuhoiu. Järgnevalt hakati teostama hermetiseeritud proovikeha meetodeid. Eelnevalt teostati katsed vaakumseadme ja parafiiniga ning viimaseks katseks jäi parafiiniga katmine. Parafiiniga katmise viimaseks jätmisel on väga kindel

põhjus. Nimelt kui tekib mõne eelneva katsega probleem või on soov katset korrata siis see ei ole peale parafiinivahaga katmist enam võimalik.

4.3.1 Meetod A: mahumass – kuiv

Antud katsemeetodit kasutatakse kinnise pinnaga proovikehade puhul. On sobilik peene fraktsiooni ja suurema pigisisaldusega segude puhul. Antud katsemeetodiks on vajalikud kaal, veevann ja termomeeter. Katse läbiviimine võtab vähe aega.

Esiteks kaalutakse katsekeha kuivalt. Peale kuiva kaalu saamist paigaldatakse katsekeha veevanni ning kaalutakse vees. Oodatakse, kuni katsekeha vees ei liigu ja kaalunumbrid stabiliseeruvad. Peale katsekeha välja võtmist mõõdetakse vee temperatuur. Sellega katse lõppeb ning alustatakse arvutust vastavalt standardi EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020):"

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (4.3)$$

kus ρ_{bdry} - on kuiv mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

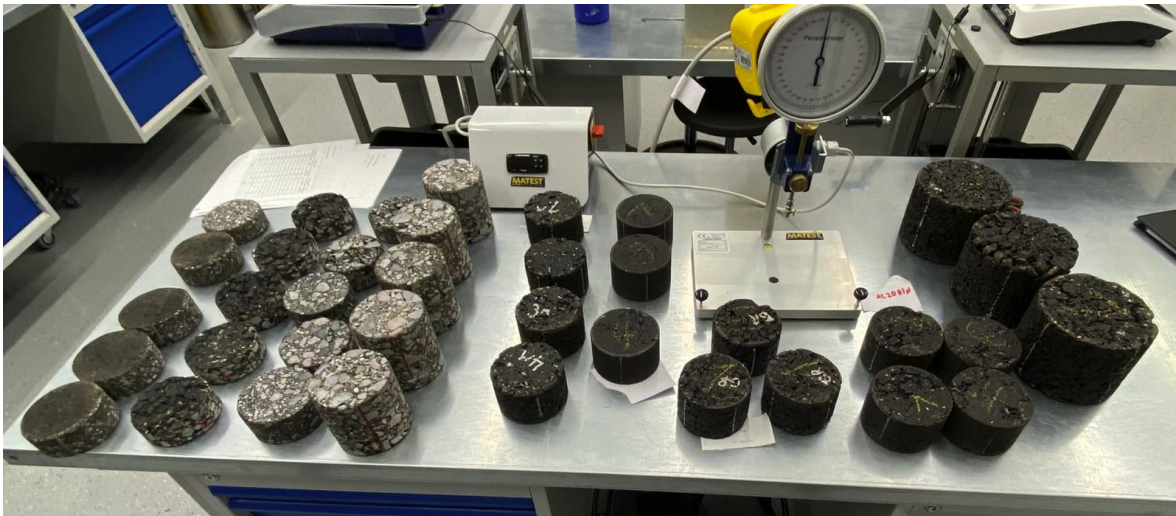
m_2 - on proovikeha mass vees grammides (g);

ρ_w - on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)."

4.3.2 Meetod B: mahumass – immutatud ja kuivatatud pinnaga (saturated surface dry, SSD) (kasutatav kinnise pinnaga proovikehade puhul)

Meetod B puhul on eelnevalt vaja kaaluda katsekeha. Peale kuiva proovikeha massi teada saamist paigaldatakse proovikeha veevanni ning mõõdetaks vee temperatuur, mis on kindlalt temperatuuril (joonis 4.9). Üldjuhul labori veevannid on 20-22 kraadi (Celsiuse järgi) juures. Vastavalt EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) kohaselt tuleb proovikeha hoida veevannis 30 minutit kuni 3 tundi. Selle ajaga on üldjuhul kõikidest proovikeha avatud pooridest õhk välja saanud. Peale 30 minutit või kuni 3 tundi vees hoidmist tuleb proovikeha kaaluda vees. Kui proovikeha on vees kaalutud, tuleb keha veest välja võtta ning rätikuga pindkuivaks teha. Peale pealispinna kuivatamist tuleb kaaluda niiske proovikeha õhus. Korrektseks kaalumiseks loetakse seda, kui niiske proovikeha kaalult eemaldamisel ei ole kaalul veetilkasid. Antud

meetod ei sobi väga poorsete kehade puhul ehk drenasfaldist tehtud katse- ja puurkehad.



Joonis 4.9 Kuivatatud proovikehad

Antud meetodi arvutus käib järgmise valemiga:"

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4.4)$$

kus ρ_{bssd} - on immutatud ja kuivatatud pinnaga (SSD) proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

m_2 - on proovikeha mass vees grammides (g);

m_3 - on immutatud ja kuivatatud pinnaga (SSD) proovikeha mass grammides (g);

ρ_w - on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)"

(Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 8).

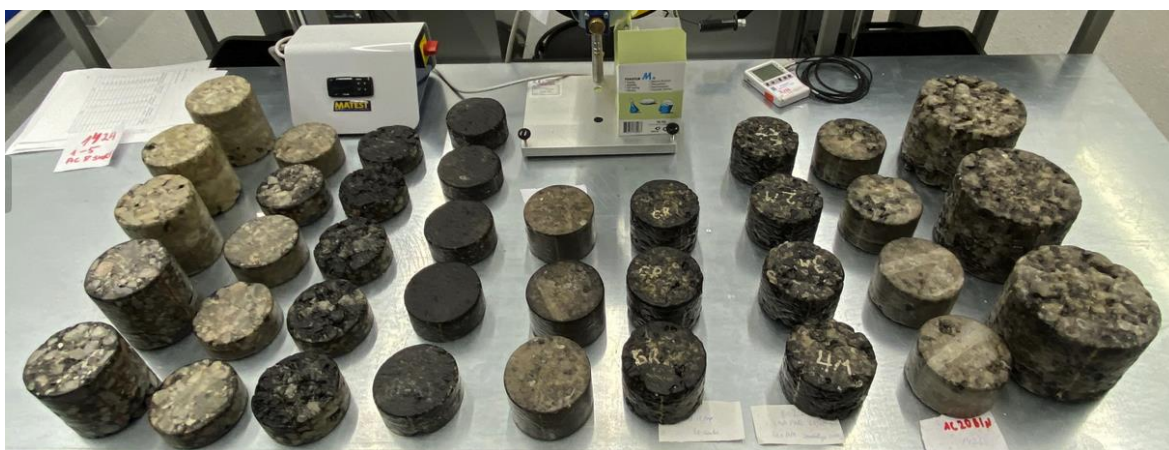
4.3.3 Meetod C: mahumass – hermetiseeritud proovikeha parafiinivahaga

Vastavalt EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) tuleb antud meetodi puhul eelnevalt parafiinivaha üles sulatada. Samal ajal kui vaha sulab, kaalutakse ära kuiv proovikeha. Peale vaha sulamist kastetakse proovikeha parafiinivaha vanni. Vannis peab proovikeha liigutama, et kõik poorid täituksid vahaga. Antud katset on mõistlik teha poole keha kaupa ehk kastad pool proovikeha parafiini vanni, võtad keha vannist välja, lased jahtuda ning kordad katset teise poolega (joonis 4.10). Proovikeha peab katma ühtlane parafiinikiht. Peale parafiiniga katmist tuleb oodata, kuni proovikehal

parafiinikiht jahtub ning siis saab alustada kaalumise. Eelnevalt on kaalutud kuiv proovikeha ning nüüd tuleb kaaluda proovikeha koos parafiinikihiga. Peale kuiva hermetiseeritud proovikeha kaalumist tõstetakse proovikeha veevanni ning toimub märgkaalumine. Lisaks mõõdetakse vee temperatuur. Kuna antud katsega kaetakse proovikeha parafiiniga, mida ei saa hiljem katsekehast eemaldada, siis peale seda katset on proovikeha rikutud (joonis 4.11). Parafiini tihedus on $0,9 \text{ Mg/m}^3$.



Joonis 4.10 Parafiini vanni kastmine



Joonis 4.11 Parafiiniga kaetud kaetud proovi- ja katsekehad

Antud meetodi arvutus käib järgmise valemiga:"

$$\rho_{\text{bsea}} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) / \rho_w - (m_2 - m_1) / \rho_{\text{sm}}} \quad (4.5)$$

kus ρ_{bsea} - on hermetiseeritud proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

m_2 - on kuiva hermetiseeritud proovikeha mass grammides (g);

m_3 - on hermetiseeritud proovikeha mass vees grammides (g);

ρ_w - on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

ρ_{sm} - on isoleermaterjali tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)" (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 8).

4.3.4 Meetod D: mõõtmete põhine mahumass

Vastavalt EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) on antud meetodi puhul vajalik nihik või joonlaud. Keha paksust mõõdetakse neljast kohast ning vastavalt katsekeha paksusele erineb diameetri mõõtmine. Kui keha on üle 6 cm, toimub diameetri mõõtmine kuuest kohast ehk puurkeha ülevalt, keskelt ja alt ning siis keeratakse keha 90 kraadi ning korratakse protseduuri. Kui proovikeha paksus on alla 6 cm, toimub diameetri mõõtmine neljast kohast ehk puurkeha ülevalt ja alt ning keeratakse 90 kraadi ning korratakse. Kuna meie proovikehad ja puurkehad olid kõik silindrikujulised, siis kasutati arvutamiseks silindrilise proovikeha valemit.

Antud meetodi arvutus käib järgmise valemiga:"

$$\rho_{dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3 \quad (4.6)$$

kus ρ_{dim} - on mõõtmete põhine proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

h - on proovikeha kõrgus millimeetrites (mm);

d - on proovikeha diameeter millimeetrites (mm)" (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 9).

4.3.5 Meetod C: mahumass – hermetiseeritud vaakumseadmega

Antud meetod on lihte ning kiire, kuid sellel on omad vead. Nimelt esimeste proovikehade vakumeerimisel oli näha, et kasutatavad kotid on väga õrnad, proovikehade teravad servad lõhuvad vaakumkoti ning mõõtmise ajal pääseb vesi proovikehale ligi. Antud probleemi vältimiseks lihvisime proovikehade servad kumeramaks, et välistada kottide purunemist (joonis 4.12).

Katse algab proovikeha teravate servade lihvimisega. Seejärel puhastatakse proovikeha (meie kasutasime surveõhku) ning kaalutakse õhus. Peale kaalumist paigaldatakse proovikeha vaakumkotti ning paigaldatakse vaakummasinasse, kus toimub vaakumkotist õhu eemaldamine ja koti kinni sulatamine (joonis 4.13). Vastavalt EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) toimub peale vakumeerimist kaalumine vees, kus tuleb jälgida, et koti külge ei jää õhumulle (joonis 4.14). Peale märgkaalu saamist tõstetakse proovikeha koos vaakumkotiga veest välja ning eemaldatakse vaakumkott.

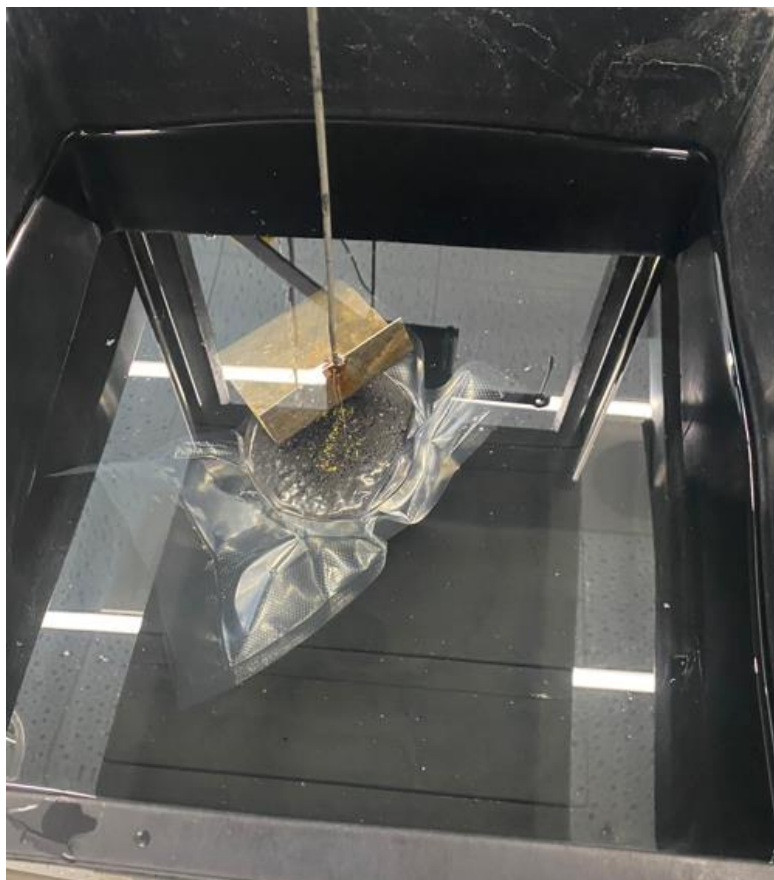
Kuna vaakumkoti tihedus ei olnud teada, siis arvasime selle ise. Meile oli teada vaakumkoti materjal, mõõdud ning paksus mikronites. Antud andmete põhjal arvasime tihedused. Kuna güräator-tihendajaga tehtud proovikehad olid väga suured, siis katsetasime kahe erineva vaakumkoti tüübiga. Suure vaakumkoti tihedus oli 0,84 Mg/m³ ja väiksema koti tihedus oli 0,92 Mg/m³.



Joonis 4.12 Servade lihvimine



Joonis 4.13 Vakumeerimine



Joonis 4.14 vakumeeritud keha veevannis

Antud meetodi arvutus käib järgmise valemiga:"

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) / \rho_w - (m_2 - m_1) / \rho_{sm}} \quad (4.7)$$

kus ρ_{bsea} - on hermetiseeritud proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

m_2 - on kuiva hermetiseeritud proovikeha mass grammides (g);

m_3 - on hermetiseeritud proovikeha mass vees grammides (g);

ρ_w - on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

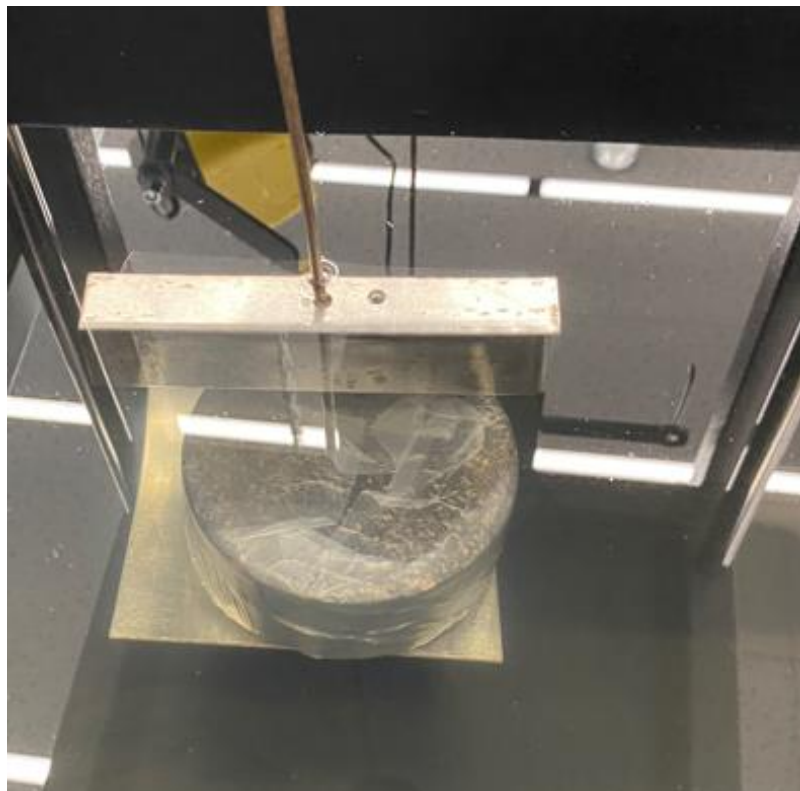
ρ_{sm} - on isoleermaterjali tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)" (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 8).

4.3.6 Meetod C: mahumass – hermetiseeritud parafilmiga

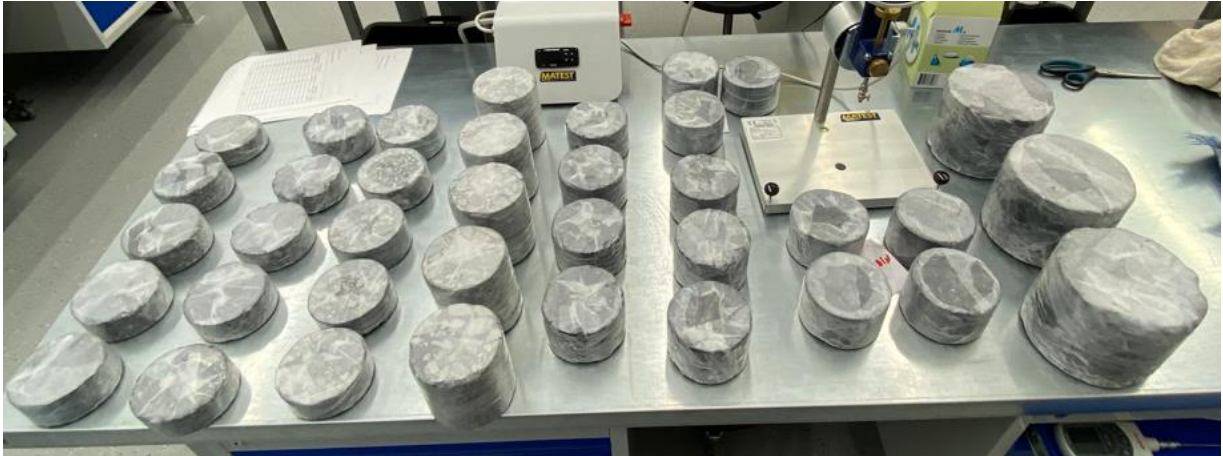
Parafilm kattmaterjalina on rohkem levinud erinevates laborites, kus toimub vedelate ainete käitlemine. Kuna parafilm on lõhnatu, maitsetu ning väga veniv siis kasutatakse seda erinevate anumate katmiseks (Parafilm). Kuna ka parafilm on sarnaselt vaakumkottidele õrn materjal, tuleb eelnevalt proovikehade servad lihvida (joonis 4.12). Väiksemate kehade puhul toimub katmine kiirelt, kuid suurte katsekehade katmine on keerulisem (joonis 4.15). Katse alguses tuleb proovikeha kaaluda kuivalt. Peale kuiva kaalu saamist tuleb katsekeha katta parafilmiga ning kaaluda katsekeha vees (joonis 4.16 ja joonis 4.17). Parafilmi tihedus on $0,922 \text{ Mg}/\text{m}^3$.



Joonis 4.15 Parafilmiga kaetud puurkehad



Joonis 4.16 Parafilmi puurkeha vees



Joonis 4.17 Parafilmiga kaetud puur- ja proovikehad

Antud meetodi arvutus käib järgmise valemiga:"

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) / \rho_w - (m_2 - m_1) / \rho_{sm}} \quad (4.8)$$

kus ρ_{bsea} - on hermetiseeritud proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

m_1 - on kuiva proovikeha mass grammides (g);

m_2 - on kuiva hermetiseeritud proovikeha mass grammides (g);

m_3 - on hermetiseeritud proovikeha mass vees grammides (g);

ρ_w - on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3);

ρ_{sm} - on isoleermaterjali tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3)" (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 8).

4.3.7 Jäävpoorsus

Kuna hilisemas järgus on vaja trahviarvutuste tegemiseks lisaks mahumassile ka iga segu ja meetodi kohta jäävpoorsust, siis leidsime ka need väärtused. Toon välja kõikide puurkehade ja proovikehade jäävpoorsused erinevate mahumassi meetoditega. „Jäävpoorsus on õhuga täidetud pooride sisaldus proovikehas (väljaraides) väljendatud mahuprotsentides" (Lill, 2020, slaid 48).

Jäävpoorsus on üks tähtsamaid parameetreid tee elueal, mida väiksem on jäävpoorsus seda tihedam on kate. Kui katte jäävpoorsus on liiga suur, siis on suur tõenäosus, et peale paigaldamist tekib järeltihenemine sõidukite rehvidega. Teele tekivad sellest tingitud defektid, üks suurimaid defekte on roopad. Järgmine probleem on katte eluiga. Mida suurem on jäävpoorsus kulumiskihil seda rohkem hakkavad sulamise ja külmumise tsüklid antud katet lagundama ning võivad viia löökaukude tekkimiseni.

Proovikeha jäävpoorsus arvutatakse ümardatuna lähima 0,1%-ni EVS-EN 12697-8 kohaselt järgmiselt“:

$$V_a = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \times 100 \quad (4.9)$$

kus V_a - jäävpoorsus mahuprotsentides;

ρ - proovikeha mahumass, kg/m³;

ρ_s -asfaltsegu näiv erimass, kg/m³ " (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018).

5 TULEMUSED KOOS ANALÜÜSIGA

Erimassi tulemused peale arvutuskäiku on välja toodud Tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Erimassi tulemused

AC 8 surf 70/100	SMA 16 Pmb 65/105-65	AC 20 bin 70/100	AC 32 base 70/100 (Gr)
2.440 Mg/m ³	2.498 Mg/m ³	2.482 Mg/m ³	2.557 Mg/m ³

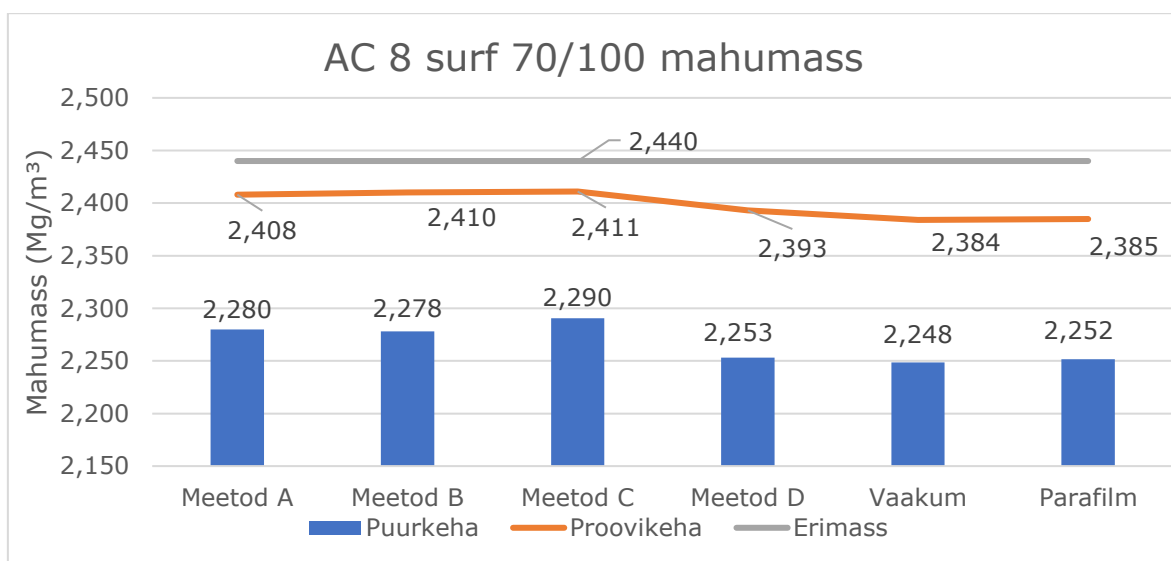
5.1 AC 8 surf 70/100



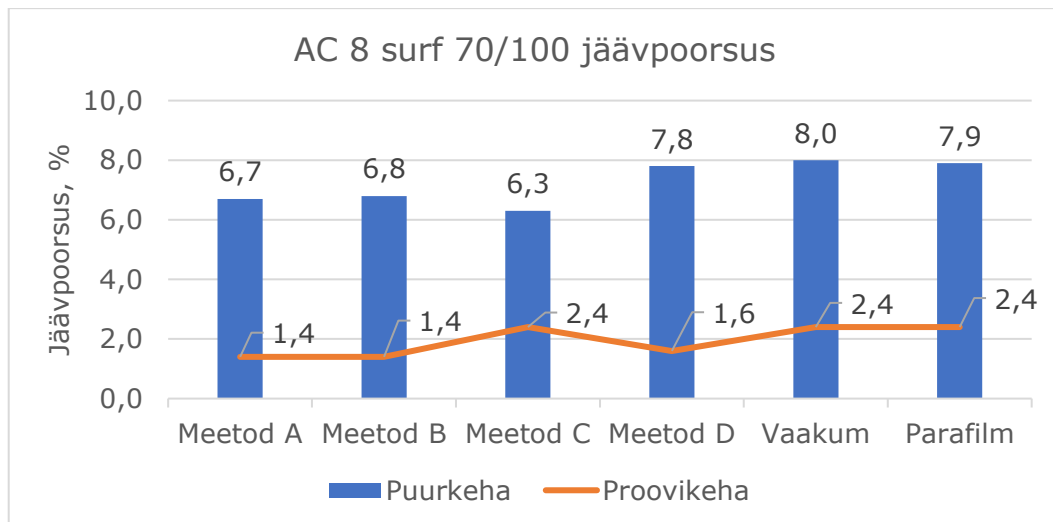
Joonis 5.1 AC 8 surf 70/100 proovikehad



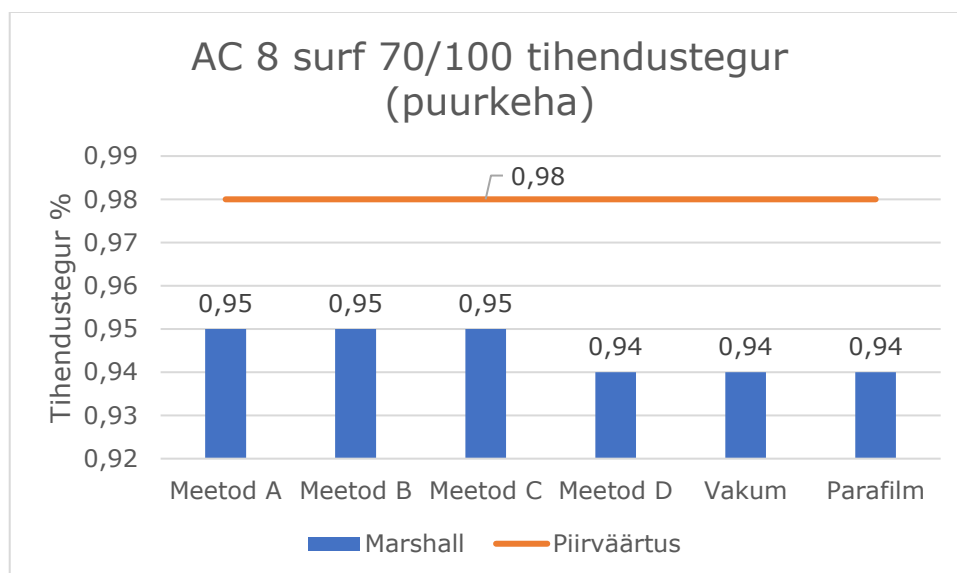
Joonis 5.2 AC 8 surf 70/100 puurkehad



Joonis 5.3 AC 8 surf 70/100 mahumass



Joonis 5.4 AC 8 surf 70/100 jäävpoorsus



Joonis 5.5 AC 8 surf 70/100 tihendustegur

Joonisel 5.3 on näha AC 8 surf mahumassid. Kuna üks proovikeha jäi laboris valmistades liiga poorseks, siis on laboratoorse proovikeha mahumassi arvutamisel võetud aluseks kolme proovikeha keskmine (joonis 5.1). Tulemustes on näha, et puurkehade ja proovikehade mahumassidel on väga suured erinevused, kuigi visuaalselt ei tundunud AC 8 surf puurkehad poorsed (joonis 5.2).

Joonis 5.4 on välja toodud AC 8 surf puurkehade ja proovikehade jäävpoorsused. Antud tulemustes on näha, et protsentuaalselt kõigub erinevus proovikehade puhul 1,4% kuni 2,4%ni ning puurkehade puhul 6,3% kuni 8,0%ni. Nende andmete põhjal saab väita, et puurkehade jäävpoorsused on paigast ära, kuna õhutühimike protsent on liiga suur (joonis 5.4). Proovikehade tulemusi vaadeldes on sarnased jäävpoorsused meetodit D, vaakumi ja parafilmi kasutades. Antud tulemused on tõenäoliselt tinginud sellest, et

vaakumkott ja parafilm tekitasid konaruste kohale silla, mis annab sarnased tulemused. Meetod A ja meetod B on sarnased nii puurkehadel kui ka proovikehadel. See olukord on tõenäoliselt tingitud surf segu iseärasusest. Surf segudes on nii jämedat fraktsiooni kui ka peenikest fraktsiooni ning tihendades ei jää suuri tühimikke ning selle tulemusena on meetod A ja B tulemused täpsemad. Lisaks on välja toodud tihendusteguri näitajad (joonis 5.5). Tulemused saadi arvutuste teel jagades puurkeha keskmine mahumass proovikeha keskmise mahumassiga. Antud joonise peal on näidatud puurkeha tihendustegurid ning „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhisest“ (Transpordiamet, 2021) oleva tihendusteguri piirväärtus (joonis 5.5). Tulemused ei ületa piirväärtust ning puurkehad pole tihedad. Tihendusteguri graafikul on näha, et meetod A, B ja C tihendustegurid on samad ning meetod D, vaakumi ja parafilmi tihendustegurid on samad. Graafikuid võrreldes jooksevad tihendustegurid mahumassi graafikuga üpriski sarnaselt, mida suurem on mahumass seda suurem on ka tihendustegur.

5.2 SMA 16 Pmb 65/105-65



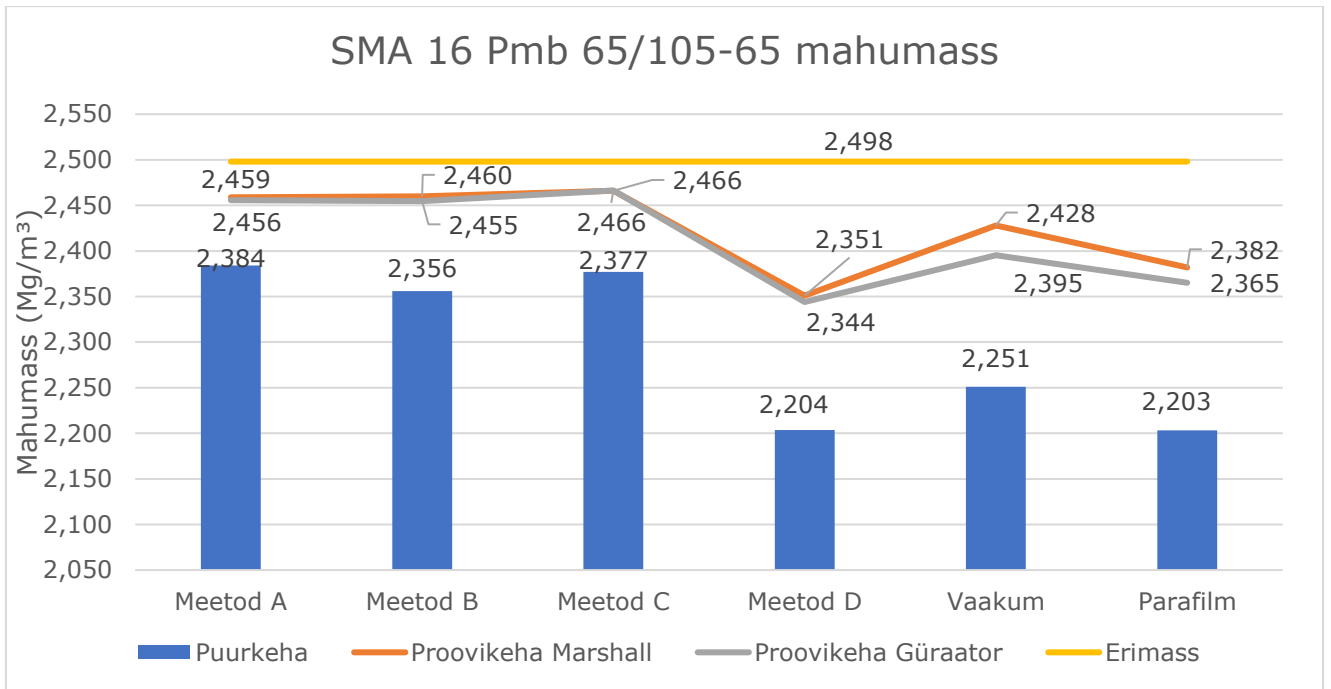
Joonis 5.6 SMA 16 Pmb 65/105-65 puurkeha



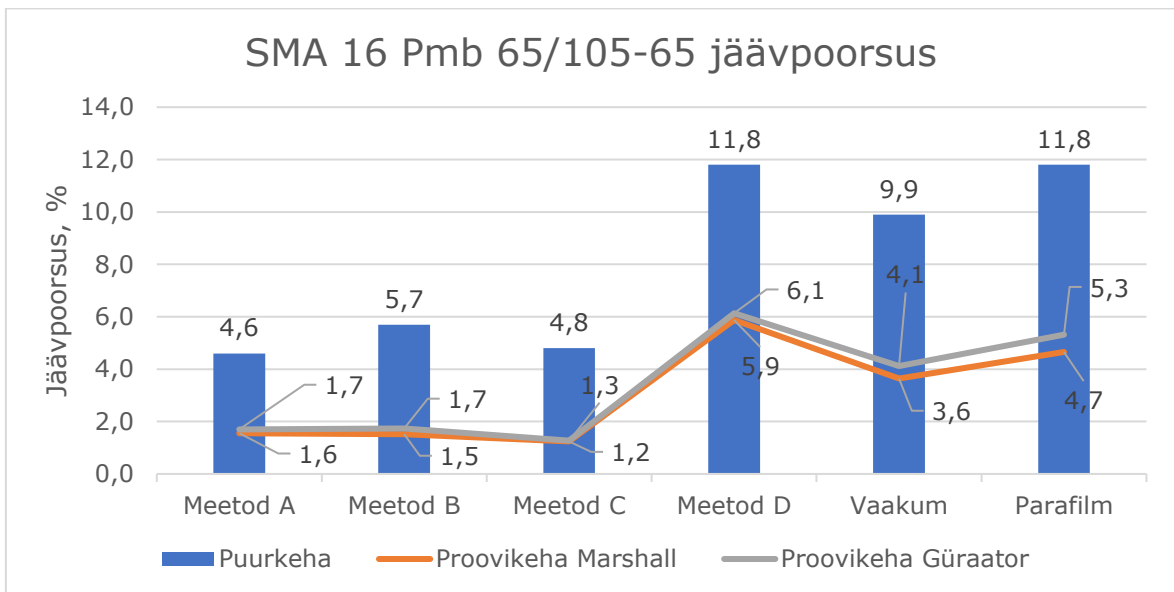
Joonis 5.7 SMA 16 Pmb 65/105-65 proovikeha Gýraator-tihendaja



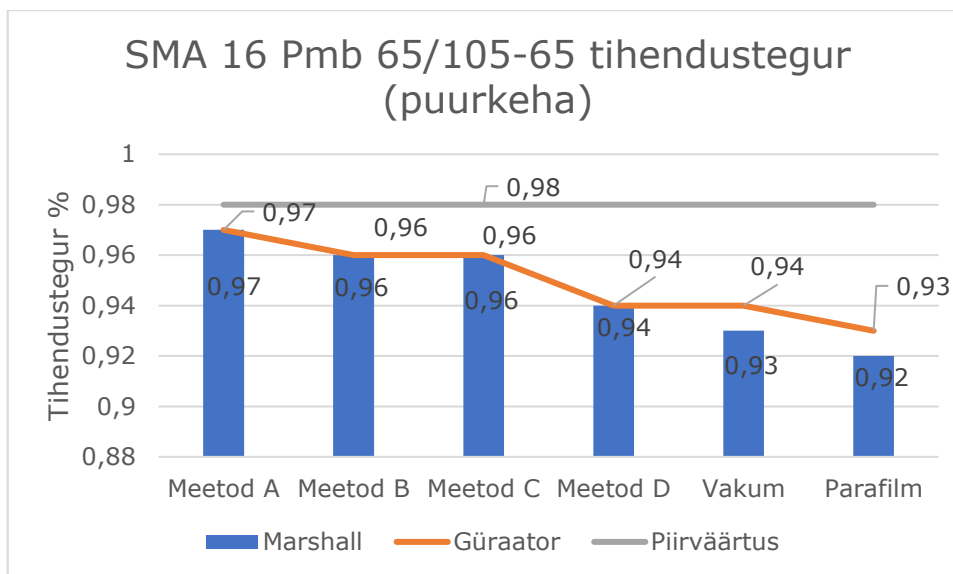
Joonis 5.8 SMA 16 Pmb 65/105-65 proovikeha Marshalli lööktihendaja



Joonis 5.9 SMA 16 Pmb 65/105-65 mahumass



Joonis 5.10 SMA 16 Pmb 65/105-65 jäävpoorsus



Joonis 5.11 SMA 16 Pmb 65/105-65 tihendustegur

SMA 16 Pmb graafikul on märgitud nii guraator-tihendaja tulemus kui ka Marshalli lööktihendaja tulemused. Meetod A, meetod B ja meetod C on proovikehade poolest praktiliselt samad (joonis 5.9). SMA struktuuriline ülesehitus on surf segudest teine ehk antud segu ei sisalda nii palju peentäitematerjali. Proovikehade puhul, mille mahumass on erimassile väga lähedas sobiks katsetamiseks meetod A, B ja C. Kuna SMA segu koosneb suurest kivifraktsioonist ja suurest kogusest bituumeni ja filleri segust, siis on kattel ainult pinnapealsed poorid. Proovikehade jäävpoorsuse kõikumine kolme esimese meetodiga on väga väike 1,2% kuni 1,7% (joonis 5.7 ja joonis 5.8). Kui vaadelda puurkehi siis visuaalselt puurkehad olid väga poorsed ning nende puhul ei saa uskuda A, B ja C meetodit (joonis 5.6). EVS-EN 12697-6 on kirjas, et „meetodid A ja B on sobilik kasutada kehade puhul, mille poorsus on kuni 7% ja meetod Cd saab kasutada poorsusega kuni 10%“ (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020, lk 12). Selle teadmise valguses on tõenäoline, et tuleks antud puurkehade katsetusel kasutada D meetodit. Meetod D jäävpoorsus on 11,8%, sama tulemuse andis ka parafilmiga katmise meetod ning vakumeerimine andis 1,9% väiksema jäävpoorsuse. Antud katsete põhjal võib arvata, et poorsete katsekehade puhul on vakumeerimine, parafilm ja meetod D kasutamisel saadud andmed täpsemad (joonis 5.10). Joonisel 5.11 on näidatud puurkehade tihendustegurid. Graafikul on näha, et kõigi meetoditega tihendustegurid on alla piirväärtuse. Graafikus on näha, et parafilmi katsega on tihendustegur kõige madalam. Kuna kehad olid väga poorsed siis selle põhjal võime järeldada, et parafilmiga katmise meetod on antud olukorras kõige täpsem (joonis 5.11).

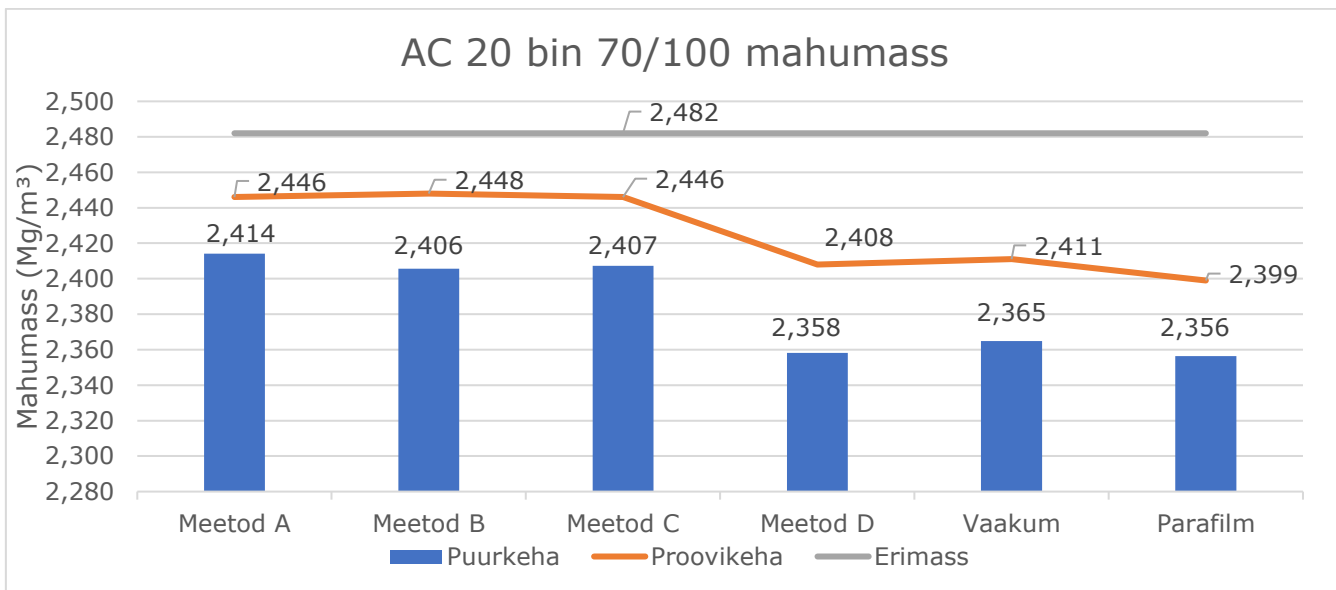
5.3 AC 20 bin 70/100



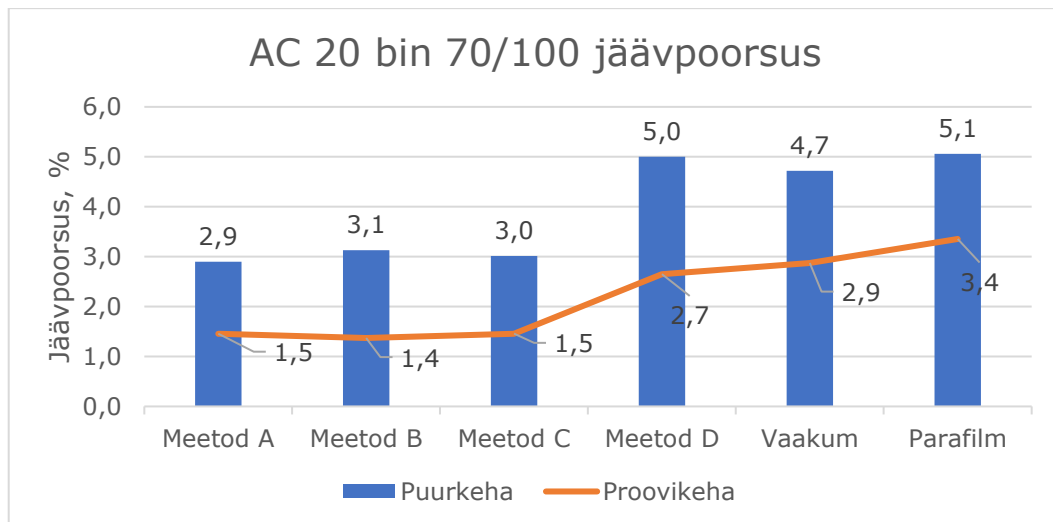
Joonis 5.12 AC 20 bin 70/100 puurkeha



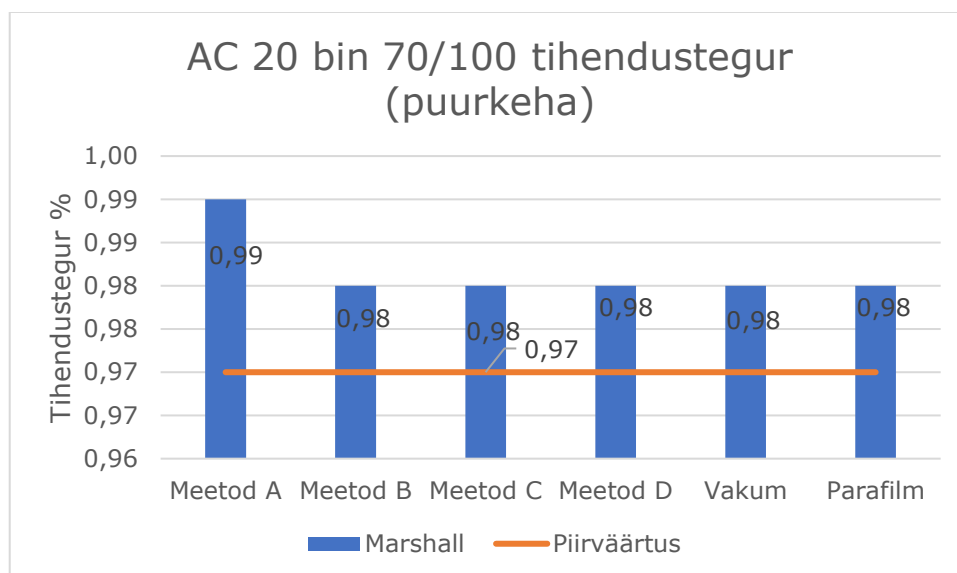
Joonis 5.13 AC 20 bin 70/100 proovikeha



Joonis 5.14 AC 20 bin 70/100 mahumass



Joonis 5.15 AC 20 bin 70/100 jäävpoorsus



Joonis 5.16 AC 20 bin 70/100 tihendustegur

Antud graafikus jookseb endiselt ühine joon läbi, kus meetod A, B ja C on sarnased (joonis 5.14). Jäävpoorsus kõigub proovikehadel 1,4% kuni 3,4%ni ning puurkehadel 2,9% kuni 5,1%ni (joonis 5.15). Kuna antud segu struktuuriliselt ning bituumeni sisalduse poolest on võrdväärne AC 20 surfiga, siis neid tulemusi võib võrrelda surf segudega (joonis 5.12 ja 5.13). On näha, et meetod A, B ja C on sarnased nagu SMA puhul ning meetod D, vaakumeerimine ja parafilm on omavahel sarnased. Kuna antud segu struktuuriline poorsus on madal, siis on mõistlik oletada, et meetod A, B ja C tulemused on täpsemad ning meetod D, vaakumi ja parafilmi tulemused on ülehinnatud just jäävpoorsuse poolest. Tihendusteguri graafikult on näha, et kõik purkehad on tihendatud üle piirväärtuse ehk kõik kehad on tihedad. Kõik meetodid peale meetod A tihendustegur on 0,98% (joonis 5.16). Selle põhjal võib väita, et meetod A-ga tekib puurkehade ülehindamine ja mõistlik on kasutada meetod B või C-d.

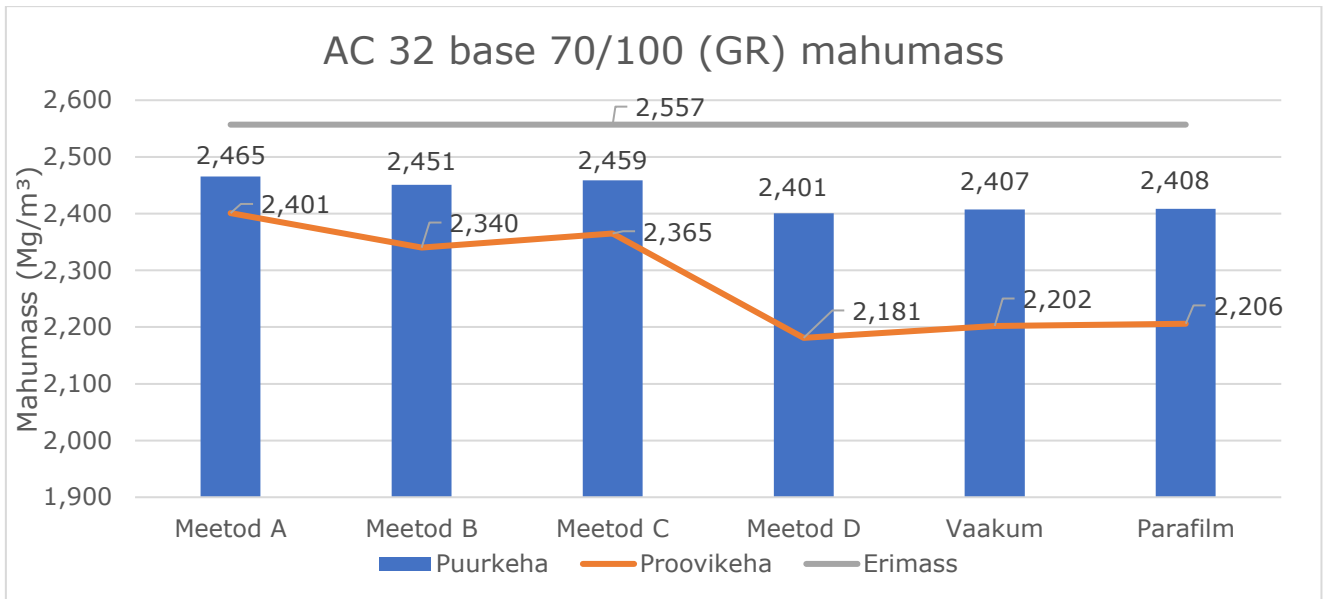
5.4 AC 32 base 70/100 (GR)



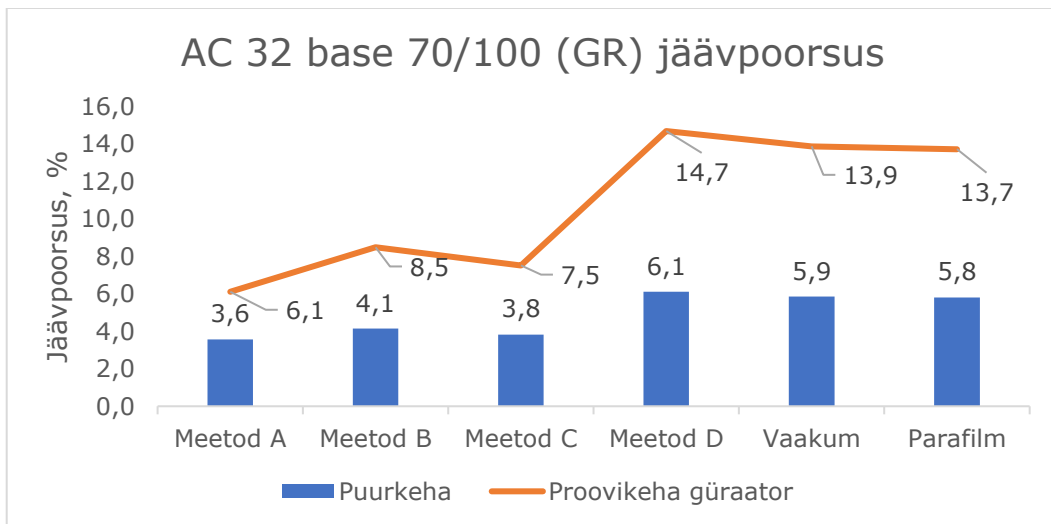
Joonis 5.17 AC 32 base 70/100 (GR) puurkeha



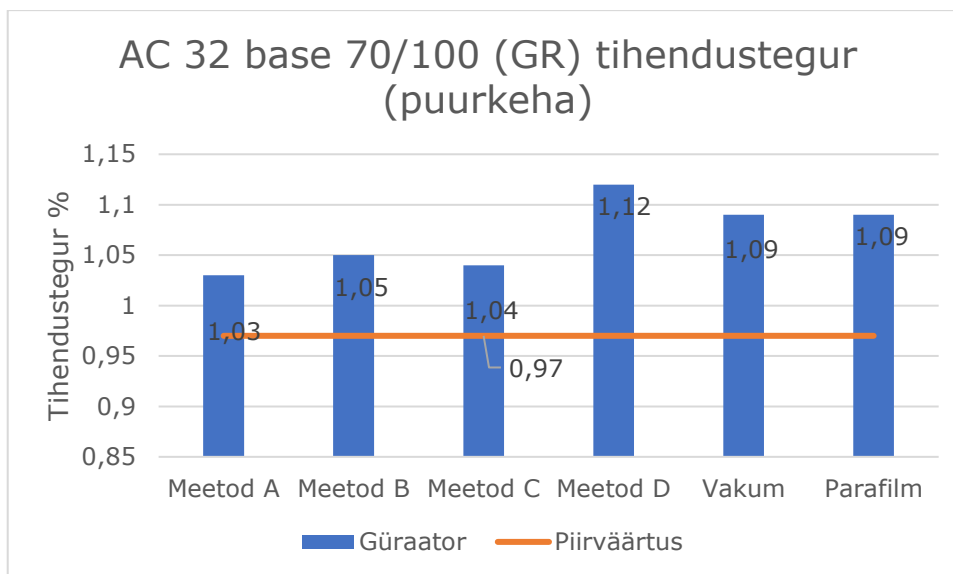
Joonis 5.18 AC 32 base 70/100 (GR) proovikeha



Joonis 5.19 AC 32 base 70/100 (GR) mahumass



Joonis 5.20 AC 32 base 70/100 (GR) jäävpoorsus



Joonis 5.21 AC 32 base 70/100 (GR) tihendustegur

Andmete põhjal näeme, et puurkeha tulemused on erimassile väga lähedal ehk puurkehad on tihedad (joonis 5.19 ja joonis 5.20). Erinevate meetodite võrdluses on puurkehade jäävpoorsused 3,6% kuni 6,1%ni ning proovikehade jäävpoorsuse kõikumine on 6,1% kuni 14,7%ni (joonis 5.20). Ilmselt on puurkehade tihedus tingitud sellest, et peale base kihi paigaldust lasti liiklus antud kihi peale ning suvel soojade ilmadega tekkis järeltihenemine. Kuna puurkehad on base kihi kohta liiga tihedad ehk õhupoore praktiliselt pole, vaid on ainult pindmised poorid, siis meetod A, B ja C annavad ühese tulemuse. Suur kõikumine on proovikehaga: nimelt proovikehade struktuur on oluliselt poorsem, kui puurkehade oma (joonis 5.17 ja joonis 5.18). Lisaks meetod A-d kasutades valgub vesi proovikehast kohe välja. Sama probleem on ka meetod B-ga. Vakumeerimine ja parafilmiga katmise meetodid on väga väikese kõikumisega, kuna vaakumkoti ja parafilmi kiht tekitavad sillad proovikehade konaruste vahel. Meetod C osutus antud hetkel kõige täpsemaks, kuna parafiini vaha jooksis proovikeha vanni kastes pooridesse ning täitis avad. Güraator tihendaja proovikehad olid katset tehes päris suured ning parafiini vaha kogus vähenes märgatavalt peale iga proovi vahavanni kastmist. Tihendusteguri graafikut vaadeldes on näha, et kõikide katsetega on puurkehade tihendused üle piirväärtuse. See tähendab, et kõik kehad on üle tihendatud (joonis 5.21). Surf segul on võimalik üle tihendamist objektile teada saada sellega, kui katte peale hakkavad tekkima bituumeni laigud. Antud olukord on tingitud sellest, et jäävpoorsus on liiga madal ning kivimite vahele ei mahu enam sideaine ära ning see tõuseb pinnale. Kuna tegu on base seguga, mille struktuuris on rohkem jämedaid kivimeid kui peenemaid ning bituumeni osakaal pole nii suur siis sellist olukorda objektile ei tekkinud. Graafikut vaadeldes ning EVS-EN 12697-6 juhiseid (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) vaadeldes sobiks antud keha katsetamiseks kas meetod A, B või C.

5.5 Transpordiameti mahaarvamise kalkulatsioon

Transpordiametil on „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjas“ välja toodud erinevad trahviarvutused. Antud hetkel keskenduti jäävpoorsusele ning tihendustegurile. Proovikehad, mis on objektilt võetud, ei ole võetud vastavalt Transpordiameti juhises olevale puurkeha võtmise skeemile joonis 1 (Transpordiamet, 2021), vaid on võetud ühe sõiduraja ulatuses. Sellega seoses arvutame trahviarvutuse 5 puurkeha keskmise järgi. Kuna soovime saada võrdlust, siis kõigi tulemustega võtame ruutmeetriteks 2000 m² ning ühikhinnaks 10 €/m².

Jäävpoorsuse trahve arvutatakse „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjas“ valemiga:“

$$A = 0,03 \times A' \times H \times F \quad (5.1)$$

kus A - maksumuses vähendamine, €;

A' - maksumuse vähendamine;

$A' = 4p^2$ - AC surf, AC bin ning SMA segust katted; peale

$A' = 2p^2$ - AC base ja MSE tehasesegust katted;

H = katte hind €/m²;

F = prooviga haaratud katte pindala m²;

p =kattekihi lubatud suurima jäävpoorsuse (%) ja tegeliku jäävpoorsuse (%) vahe „(Transpordiamet, 2021, lk 8).

Vastuvõtueeskirjas „kui kattekihi jäävpoorsus on väiksem, kui madalaim lubatud piirväärtus, siis vähendatakse katte maksumust katteprooviga haaratud pindalal summa võrra, mille suurus arvutatakse eelpool toodud valemiga, arvestusega, et p – kattekihi lubatud väiksema jäävpoorsuse (%) ja tegeliku jäävpoorsuse (%) vahe. Tegelik jäävpoorsus mõõdetakse juhises esitatud „Kattest puurkehade võtmise skeem“ kohaselt võetud kahe katteproovi/puurkeha keskmisena või maaradari mõõtefaili põhjal ühe meetri pikkuste lõikude alusel“ (Transpordiamet, 2021, lk 8).

Tihendusteguri trahve arvutatakse antud eeskirjas valemiga:“

$$A = 0,01 \times A' \times H \times F \quad (5.2)$$

kus A - maksumuses vähendamine, €;

A' - maksumuse vähendamine;

$A' = 4p^2$ - AC surf, AC bin ning SMA segust katted; peale;

$A' = 2p^2$ - AC base ja MSE tehasesegust katted;

H = katte hind €/m²;

F = prooviga haaratud katte pindala m²;

p = tihendusteguri piirväärtuse (%) ja piirväärtusest väiksema tegeliku väärtuse (%) vahe" (Transpordiamet, 2021, lk 8-9).

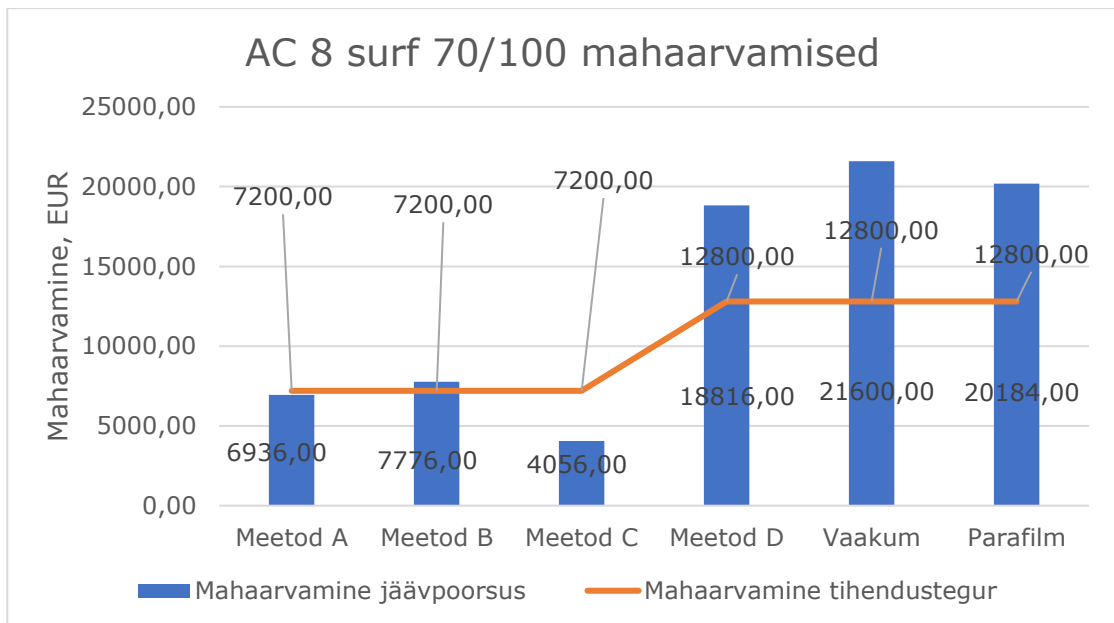
Vastavalt „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirjale" „katseprotokollis ja teetööde dokumentides suhtarvuna väljendatud tihendustegur teisendatakse protsentideks (%). Tihendustegur määratakse juhises esitatud „Kattest puurkehade võtmise skeem" kohaselt võetud kahe katteproovi/puurkeha keskmisena või maaradari mõõtefaili põhjal ühe meetri pikkuste lõikude aluse" (Transpordiamet, 2021, lk 9).

Kattekihi tiheduse ja jäävpoorsuse nõuded on eeskirjas järgmised:

Seguliik EVS 901-3	Katteproovi keskmine		Vuugiproov	
	Tihendustegur	Jäävpoorsus, %	Tihendustegur	Jäävpoorsus, %
* MSE 16 MSE 20 MSE 32	≥ 0,96	5,0 - 10,0	≥ 0,90	≤ 14,0
AC 16 base AC 20 base AC 32 base	≥ 0,97	4,0 - 10,0	≥ 0,92	≤ 13,0
AC 8 bin AC 12 bin	≥ 0,97	1,5-5,0	≥ 0,94	≤ 8,0
AC 16 bin AC 20 bin	≥ 0,97	2,0 -5,0	≥ 0,94	≤ 8,0
AC 8surf	≥0,98	1,0- 5,0	≥ 0,94	≤ 8,0
AC 12 surf AC 16 surf AC 20 surf	≥0,98	1,5- 5,0	≥ 0,94	≤ 8,0
SMA 8 SMA 12 SMA 16	≥ 0,98	1,5 - 5,0 1,5 -5,0 1,5 -5,0	≥ 0,94	≤ 8,0

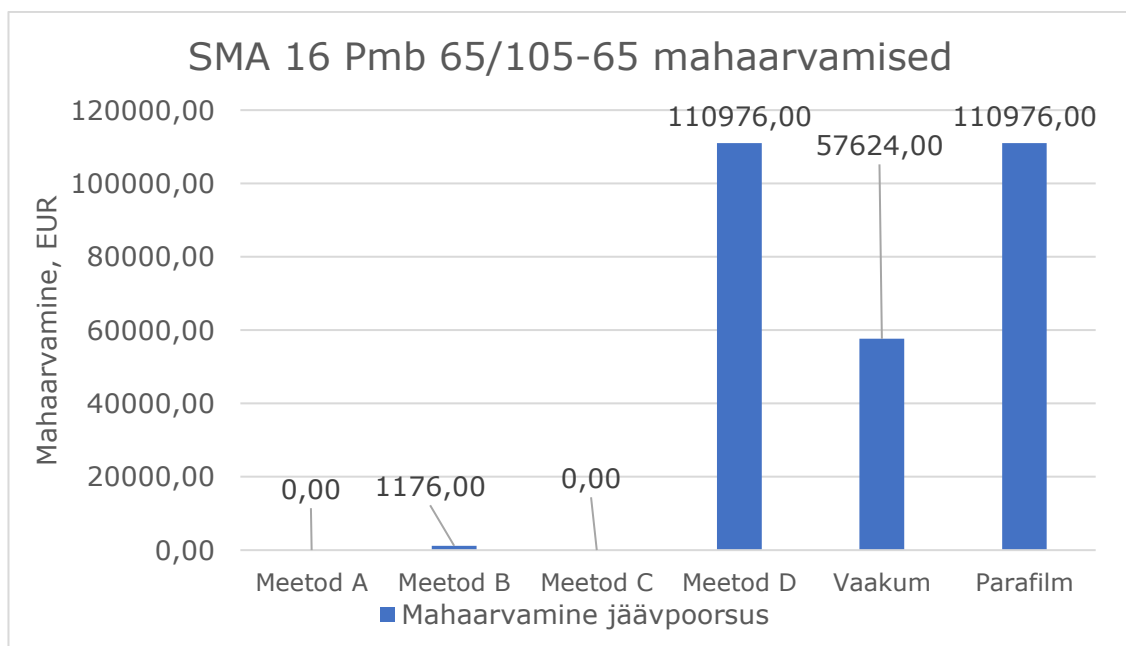
Joonis 5.22 Kattekihi tihendusteguri ja jäävpoorsuse nõuded (Tanspordiamet, 2021, lk 19)

Kõik trahviarvutused on arvutatud kindlate parameetritega. Ühikhinnaks on kõigil kihtidel 10 € ning paigalduse ruutmeetriteks 2000 m² ehk iga kihi hinnaks tuleb 20 000 €. Kõigil trahviarvutustel on võetud aluseks puurkehadest saadud tulemused.

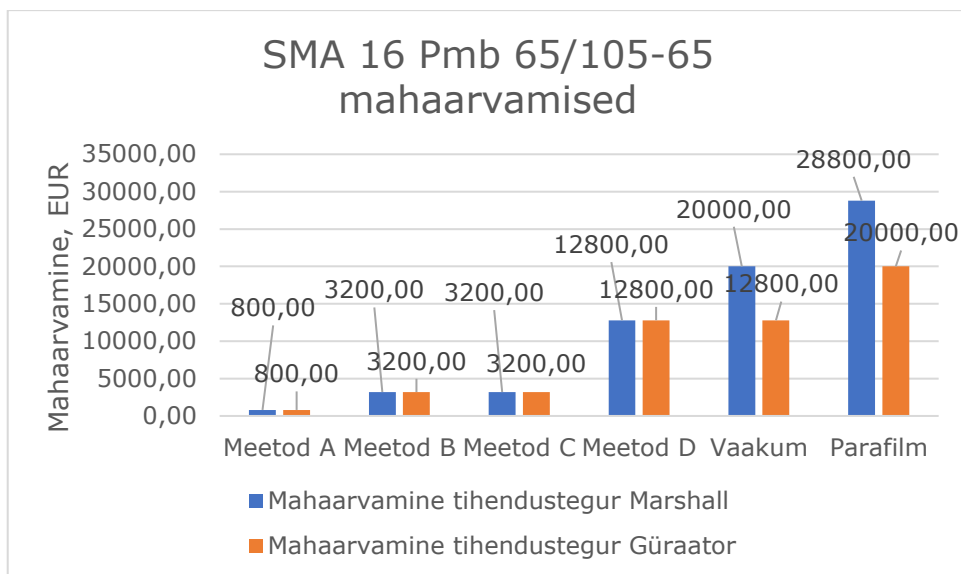


Joonis 5.23 AC 8 surf 70/100 mahaarvamised

Antud graafikutes on välja toodud Transpordiameti trahviarvutuse tulemused. Tulemusi vaadates eristub sama muster nagu eelnevalt jäävpoorsuse ja mahumassi graafikutes, kus saab jagada kahte lahtrisse. Meetod D, vaakum ja parafilm annavad sarnase tulemuse ning meetod A, B ja C omavahel sarnase tulemuse. Peene fraktsiooniga asfaltsegude puhul on mõistlik kasutada meetod C-d. Meetod A ja B on küll tihendusteguri trahvi arvutuse summa poolest samad, kuid jäävpoorsuse trahv on nende meetoditega suurem (joonis 5.22 ja joonis 5.23).

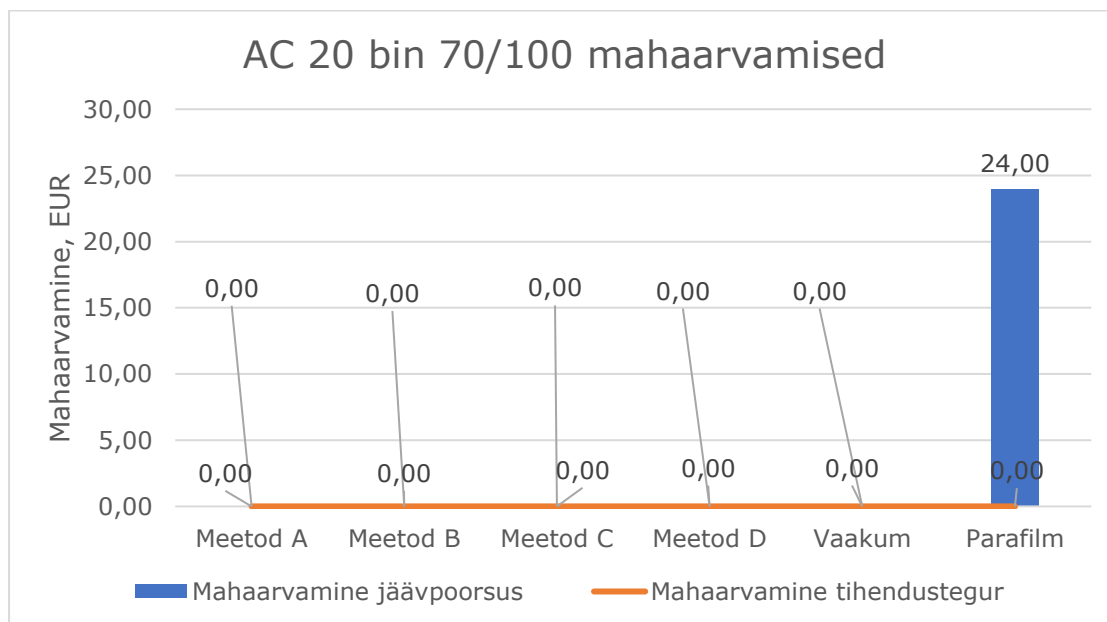


Joonis 5.24 SMA 16 Pmb 65/105-65 mahaarvamised jäävpoorsus



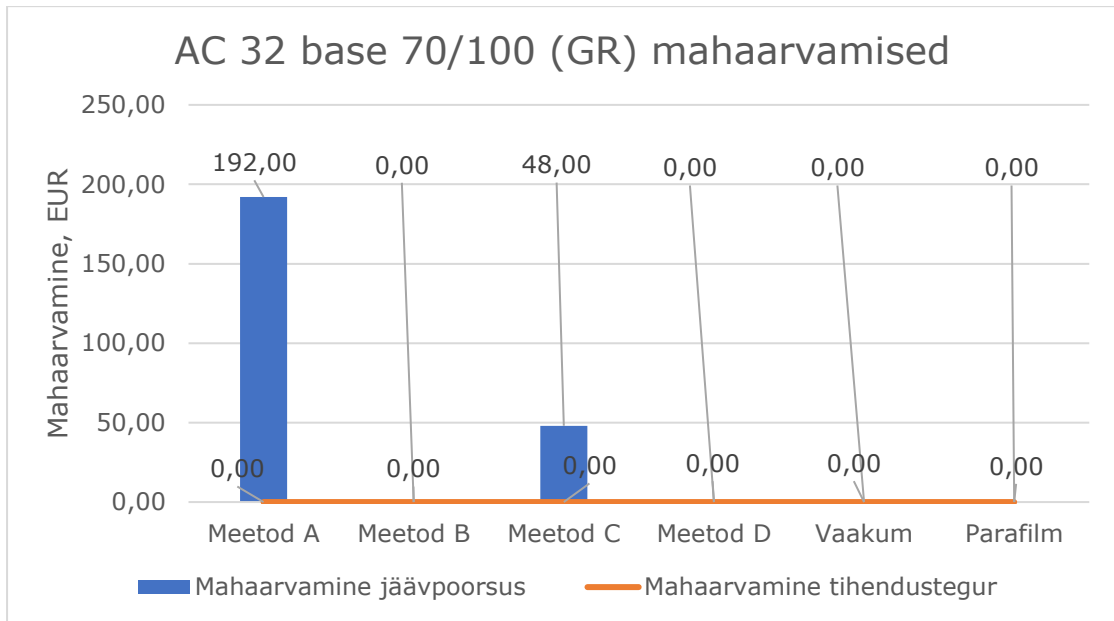
Joonis 5.25 SMA 16 Pmb 65/105-65 mahaarvamised tihendustegur

Kuna SMA 16 suurkehad võrreldes proovikehadega olid üpriski poorsed, siis oleks kõige mõistlikum neid katsetada meetod D, vaakumi või parafilmiga, mis EVSi järgi sobib poorsete kehade kohta. Antud hetkel on meetod A-ga kõige väiksemad trahvid, kuid kuna suurkehad olid liiga poorsed siis antud meetod ei ole õige nii poorsete kehade katsetamiseks. Mõõtmete põhine meetod, parafilmi meetod ja vakumeerimine on kõige suurema trahviga (joonis 5.24 ja joonis 5.25).



Joonis 5.26 AC 20 bin 70/100 mahaarvamised

AC 20 bini puhul saab trahvi ainult parafilmi meetodiga. Kõige väiksema jäävpoorsuse andis meetod A ning järgmine oli meetod C (joonis 5.26).



Joonis 5.27 AC 32 base 70/100 (GR) mahaarvamised

Transpordiameti trahviarvutustes on võimalik saada trahvi ka üle tihendamise eest. AC 32 base puhul juhtus see kahe meetodiga – A ja C (joonis 5.27).

6 KOKKUVÕTE

Antud magistritöö on jaotatud erinevatesse etappidesse. Esimeses etapis on välja toodud taustainfo, mis meetodeid mujal maailmas jäävpoorsuse hindamiseks kasutatakse, mis meetodeid on proovitud ning erinevad jäävpoorsuse mõõtmise tehnoloogiad, mis ei nõua füüsiliste puurkehade võtmist. Samas sai tehtud lühiülevaade antud magistritöö teemaga seotud Transpordiameti „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirja“ (2021) trahviarvutustest.

Praktilises osas teostati esimesena iga segu kohta erimassi katsed vastavalt EVS-EN 12697-5 (Asfaltsegud. Katsemeetodid, 2018), selle põhjal hakati läbi viima teisi katseid. Katsetati erineva fraktsiooni, bituumeni sisalduse ja täitematerjalidega proovikehi ning puurkehi. Töö tulemusena saadi kõigi EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) mahumassi määramise meetodite kohta erinevaid ja kohati ka sarnaseid tulemusi, mida analüüsiti hilisemas etapis. Lisaks katsetati kahte uut mahumassi määramise meetodit, lootuses, et antud meetodeid on oluliselt lihtsam läbi viia, nad on kiiremad ja täpsemad. Katsemeetodite valikul oli oma kindel järjekord, kuna peale parafiini vahaga katmist ei olnud enam võimalik katsekehi ja puurkehi kasutada. Selle tulemusena tuli see meetod jätta viimaseks.

Tulemustes jõuti järeldusele, et kaks uut meetodit: parafilmiga katmine ja vaakumseadmega vakumeerimine annavad adekvaatseid andmeid väga poorsete kehade puhul. Antud meetodeid saaks kasutada meetod D asendusena. Iga segu margiga jooksis praktiliselt välja ühine joon, kus meetod A, meetod B ja meetod C on ühes suurusjärgus ning meetod D, vakumeerimine ja parafilm teises suurusjärgus. Tulemuste põhjal on soovituslik kasutada tihedate segude puhul esimest kolme meetodit ning väga poorsete segude puhul vakumeerimist, parafilmiga katmist ja meetod D-d.

Magistritöö teise praktilise osana sai teostatud Transpordiameti „Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskirja“ (2021) järgi trahviarvutused kindlate parameetritega, et näha, missugused trahvisummad antud puurkehadega tulevad. Trahviarvutustes on näha, kus iga meetodiga on võimalik saada täiesti erinevaid trahvi suuruseid. Edasiste uuringute käigus tuleks kindlasti uurida vakumeerimise tehnoloogiat ning sisse tuua parand, et oleks sisse arvestatud vaakumkoti venivus. Kuna antud laboritöö raames kasutasime kodukasutuses kasutatavat vaakumseaded siis tuleks teostada katseid tööstusliku vaakumseadmega. Samas väärriks uurimist ka kompuutertomograafiaga mahumassi määramine, kuna eelnevalt on selle meetodiga Hiinas katseid läbi viidud ning saadud adekvaatseid tulemusi.

7 SUMMARY

This Master's thesis is divided into different stages. In the first stage there is given the background information about different methods to measure void content that use core drilling, there is information about methods that are used nowadays and about methods that were tried in the past, also there is an overview about the technologies that do not require taking core drillings. Also is added a short overview about penalty calculation used by the Traspordiamet's Acceptance Regulations for National Road Construction Works (2021).

In the practical part at first there were made experiments to get maximum density for each asphalt according to EVS-EN 12697-5 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2018) based on that other experiments were conducted. Laboratory samples and core drillings with different fraction, bituumen content and aggregate were tested. As a result different and partly alike outcomes were had by using all EVS-EN 12697-6 (Asfaltsegud. Katsemeetodid., 2020) bulk density measurement methods, in the later stages the results were analysed. In addition two new bulk density measurement methods were tested, hoping that the methods are easier to conduct, faster and more precise. Methods were conducted in the specific order, because after covering the laboratory samples or core drillings with paraffin wax, you can not use them for other methods and because of that we experimented with this method last.

In the conclusion after the analysis it was realized that the two new methods: covering with parafilm and vacuuming with vacuum device give adequate data about very porous core drillings and laboratory samples. These methods could be used as a replacement for method D. With every bituminous mixture it was concluded that methods A, B and C give similar results and method D, vacuuming and covering with parafilm give a similar result. According to the conclusion first three methods are good to use to evaluate dense-graded mixture and to evaluate very porous mixtures method D, vacuuming and covering with parafilm are the most adequate.

In the second practical stage of this Master's thesis penalty calculations with certain parameters were made according to the regulations of the Traspordiamet's Acceptance Regulations for National Road Construction Works (2021) to calculate the penalties with given drilling cores. In the penalty calculations it was concluded that with each method you can get totally different price deduction. In the future research should include vacuuming technology and correction of the stretchability of the vacuum bag. While conducting this laboratory experiment home use vacuum sealer was used but further research should be conducted by using the industrial vacuum sealre. It would also be

advisalbe to continue the research to measure bulk density by using the computed tomography as it has been used before in China and they had adequate results.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Eesti standard. (2022). *Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 36: Asfaltkatte paksuse määramine* (EVS-EN 12697-36:2022). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-36-2022>
- Eesti standard. (2020). *Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovkehade mahumassi määramine* (EVS-EN 12697-6:2020). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-6-2020>
- Eesti standard. (2018). *Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine* (EVS-EN 12697-8:2018). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-8-2018>
- Eesti standard. (2018). *Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine* (EVS-EN 12697-5:2018). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-5-2018>
- Eesti standard. (2018). *Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktiarendajaga* (EVS-EN 12697-30:2018). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-30-2018>
- Eesti standard. (2021). *Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud* (EVS 901-3:2021). EVS.
<https://www.evs.ee/et/evs-901-3-2021>
- Eesti Taristusehituse Liit. (2022). *Asfalt arvudes 2021* [faktileht].
https://www.taristuehitus.ee/files/filemanager/files/Asfalt_Arvudes_21.pdf
- Hall, K. D., Griffith., F. T., & Williams, S. G. (2001). Examination of operator variability for selected methods for measuring bulk specific gravity of hot-mix asphalt concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1761(1), 81-85.
- Lill, K. (2020) *Tee-ehitusmaterjalid. Asfalt- ja stabiliseeritud segude katsetamine*. [PowerPoint slaidid]. Tallinna Tehnikaülikool.
- Maanteeamet. (2016). *Riigiteede pealiskatete vastuvõtukatsetel teostavate teekatete omaduste mõõtmise metoodika ning mõõteseadmetele esitatavad*

nõuded.

<https://transpordiamet.ee/media/2746/download>

[Non Nuclear Pavement Density Gauge Pqi 380]. Indiamart.

<https://www.indiamart.com/proddetail/non-nuclear-pavement-density-gauge-pqi-380-23509320912.html>

Parafilm. Merck KGaA veebileht.

<https://www.sigmaaldrich.com/EE/en/product/sigma/p7668>

Zhang, Y., Leng, Z., Dong, Z., Liu, Z. & Zhang, Z. (2018). Performance verification of various bulk density measurement methods for open- and gap-graded asphalt mixtures using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 158, 855-863.

Teedeprojekt OÜ. (2020). *Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala. Ehituse põhiprojekt*. (Töö nr: T01520).

<https://pilv.mkm.ee/s/TQiDWi42BRhLjda>

Transpordiamet. (2021). *Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised*.

<https://transpordiamet.ee/media/2718/download>

Transpordiamet. (2021). *Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri*.

<https://www.transpordiamet.ee/riigiteede-juhendid#toode-vastuvotmine-j>

White, G. (2019). Evaluation of a non-nuclear density gauge as an alternate to destructive coring for airport asphalt acceptance testing. *SN Applied Sciences*, 1, artikkel 92.

Xie, H., & Watson D. E. (2004). Determining air voids content of compacted stone matrix asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1891(1), 203-211.