



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**DEFORMATSIOONIKINDLUSE JA JÄÄVPOORSUSE
SÕLTUVUS ASFALTSEGU MAHUMASSI
MÄÄRAMISE MEETODIST AC 32 BASE NÄITEL**

**THE RELATIONSHIP BETWEEN THE METHOD OF
DETERMINING BULK DENSITY AND RESISTANCE TO
DEFORMATION AND AIR VOID CONTENT FOR AC 32
BASE MIXTURES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kait Värat

Üliõpilaskood 131779EATI

Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant

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.

"....." 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kait Värat

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Deformatsioonikindluse ja jäävpoorsuse sõltuvus asfaltsegu mahumassi määramise meetodist AC 32 base näitel“, 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.
-

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kait Värat, 131779EATI
Õppekava, peeriala: EATI02/09 – Teedehitus ja geodeesia
Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant, +372 5302 2437

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Deformatsioonikindluse ja jäävpoorsuse sõltuvus asfaltsegu mahumassi määramise meetodist AC 32 base näitel

(inglise keeles) The relationship between the method of determining bulk density and resistance to deformation and air void content for AC 32 base mixtures

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida AC 32 base segu jäävpoorsuse sõltuvust mahumassi meetodi valikust.
2. Uurida AC 32 base segu deformatsioonikindluse sõltuvust mahumassi meetodi valikust.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise osa kirjutamine	27.03.2024
2.	Töö on 75% ulatuses valmis	25.04.2024
3.	Katsetulemuste analüüs	17.05.2024
4.	Töö on valmis	20.05.2024

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05.2024 a

Üliõpilane: Kait Värat 08.01.2024 a
/allkiri/

Juhendaja: Kristjan Lill 08.01.2024 a
/allkiri/

Programmijuht: Mihkel Kask 08.01.2024 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÖNA.....	7
1. SISSEJUHATUS	8
2. TAUSTAINFORMATSIOON	11
2.1 Deformatsioonikindluse määramise meetodid ja nõuded Eestis ning lähiriikides	11
2.1.1 Nõuded ja meetodid Eestis	11
2.1.2 Nõuded ja meetodid Norras	11
2.1.3 Nõuded ja meetodid Lätis	12
2.1.4 Nõuded ja meetodid Leedus	12
2.2 Deformatsioonikindlust mõjutavad tegurid.....	12
2.2.1 Temperatuur	13
2.2.2 Täitematerjali terasuurus ja terastikuline koostis	15
2.2.3 Sideaine sisaldus	16
2.2.4 Koormus.....	18
2.2.5 Asfaltsegu jäävpoorsus	19
3. TEOSTATUD KATSETE KIRJELDUSED	20
3.1 Näiv erimass EVS-EN 12697-5:2018	20
3.2 Mahumass EVS-EN 12697-6:2020	21
3.3 Poorsusnäitajad (jäävpoorsus) EVS-EN 12697-8:2018.....	24
3.4 Rattaroopa katse (meetod B, väike seade) EVS-EN 12697-22:2020	24
3.5 Terastikuline koostis EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019	26
4. KATSETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS.....	27
4.1 Mahumassi määramise meetodi valik AC 32 base segul	27
4.2 Mahumassi standardi EVS-EN 12697-6 meetodi B, C ja D võrdlus AC 32 base segu põhjal ning standardi analüüs	31
4.3 Deformatsioonikindluse tulemuse sõltuvus mahumassi standardi EVS-EN 12697-6 meetodi B ja D erinevusest.....	40
4.3.1 Katsekäigu lühikirjeldus	40
4.3.2 Mahumass güraatoritihendajaga proovikehadel.....	41
4.3.3 Jäävpoorsus güraatoritihendajaga proovikehadel.....	42
4.3.4 Deformatsioonikindluse proovikehade valmistamine	43
4.3.5 Deformatsioonikindluse proovikehade jäävpoorsus	44
4.3.6 Deformatsioonikindluse katse tulemused	49
4.4 Mahumassi meetodi mõju asfaltsegu terastikulisele koostisele	54
4.5 Järeldused	58
4.5.1 Järeldused mahumassi määramise meetodite kohta AC 32 base segu põhjal	58

4.5.2 Järeldused mahumassi määramise meetodi mõju kohta deformatsioonikindlusele	59
4.6 Ettepanekud	59
KOKKUVÕTE	61
SUMMARY	62
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	63

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sündis koostöös TalTechi doktorandi ning TalTechi Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi juhataja Kristjan Lillega. Olime mõlemad juba varasemalt laboratoorsete katsete käigus kokku puutunud AC base segude mahumassi määramise probleemiga ning tuvastanud, et asfaltsegu deformatsioonikindluse ning jäävpoorsuse tulemused võivad sõltuda valitud mahumassi määramise meetodist. Kuna varasemad uuringud nende tähelepanekute kohta Eestis puudusid, siis soovisin magistritööga tehtud tähelepanekutele kinnitust saada.

Soovin tänada magistritöö juhendajat, kes suunas ja aitas iga küsimuse korral ning kes lasi laboris olevaid seadmeid kasutada vajaminevate katsetuste jaoks. Tänuõnad edastan ka ülejäänud labori meeskonnale, kes olid toeks magistritöö kirjutamise vältel.

Täna ka lähedasi, kes toetasid magistritöö kirjutamise ajal ja olid toeks nominaalajast pikemal õpinguperioodil.

Võtmesõnad: teedehitus, asfaltsegud, mahumass, jäävpoorsus, jäävdeformatsioon, deformatsioonikindlus, magistritöö

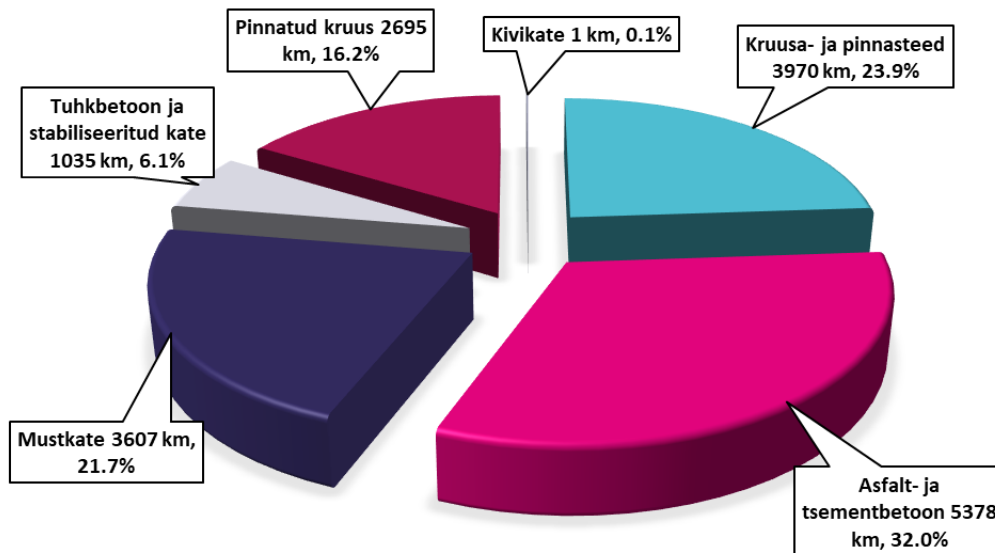
1. SISSEJUHATUS

Maanteed on olulise tähtsusega riigi ja ühiskonna arengus, pakkudes kiiret ühendust riigi eri osade vahel, ning hõlbustades kaupade transporti ja inimeste liikumist. Maanteed on arenenud riikides üks suurimaid taristu liike ning nende kvaliteetne seisukord ja võrgustik on riigi majanduse seisukohalt olulise tähtsusega. Kvaliteetne ja turvaline teede võrgustik suurendab otseselt riigi majanduslikku olukorda, parendades kaupade tarnet ning inimeste liikuvust. [1]

Eesti teedevõrgu kogupikkuseks on 89452 km, millest riigiteid on 1.01.2024 seisuga 16982 km, sealhulgas 296 km kergliiklusteid. Kohalikke teid on 23588 km ja era- ning metsateid on 48882 km. Riigiteede hulka kuuluvate põhimaanteed pikkus on 1603 km. Põhimaanteed ühendavad pealinna teiste suurte linnadega ning loovad ühenduse tähtsamate sadamate, raudteesõlmede ning piiripunktidega. Tugimaanteed ühendavad linnu põhimaanteedega ja nende kogupikkuseks on 2405 km. Alevide, alevikke ja külasid omavahel ühendavate kõrvalmaanteed kogupikkuseks on 12527 km. Nende teede kaudu on eelpool nimetatud asulad ühendatud ka linnade või põhi- ja tugimaanteedega. Lisaks kuulub riigiteede hulka 151 km rampe ja ühendusteid ning 296 km riigi kergliiklusteid. [2]

Riigiteedest TEN-T võrku ehk üleeuroopalisse transpordivõrku kuulub 1289 km teid. TEN-T võrku kuuluvate teede kvaliteet on eriti olulise tähtsusega, kuna need soodustavad üleeuroopalist inimeste ja kaupade transporti ning sujuvaid piiriüleseid liikumisi, mis omakorda elavdavad majandust. Lisaks on TEN-T võrku kuuluvad teed olulise tähtsusega julgeoleku seisukohalt: need kuuluvad ELi sõjaväelise liikuvuse algatuse hulka, mille eesmärgiks on tagada sõjaväelaste, tehnika ja materjalide kiire ning sujuv liikumine riikide vahel ka lühikese etteteatamisajaga. Siinkohal on eelduseks hästi ühendatud, turvaline ja vastupidav teede võrk. [2], [3]

Kuna riigiteid katavad erinevad materjalid, saab neid eristada veel erinevate katteliikide järgi. Joonisel 1.1 on näha, et kõige suurema osakaaluga on asfalt- ja tsementbetoon katted, mida on 5378 km (32,0%) riigiteedest. Teisel ja kolmandal kohal on kruusa- ja pinnasteed ning mustkatted, mida on vastavalt 3970 km (23,9%) ja 3607 km (21,7%). Pinnatud kruusakattega on 2695 km teid (16,2%) ning tuhkbetooni ja stabiliseeritud kattega teid on 1035 km (6,1%). Kivikatet on Eesti riigiteedel 1 km ulatuses (0,1%). Siinkohal on arvestatud vaid riigiteid v.a riigi kergliiklusteid. Kõige suurema liikluskoormuse osaliseks saavad aga just asfaltkattega teed, mille peal toimub suurem osa kogu Eesti liiklusest. [2], [4]



Joonis 1.1 Riigiteede (v.a riigi kergliiklusteed) jaotus katteliikide järgi [2]

Asfalt koosneb neljast põhikomponendist, milleks on bituumen, täitematerjal, filler ning õhk ehk poorid. Poorid näitavad, kui palju on asfaltkatesse õhku sisse jäänud. Üks peamisi asfaltkatte defekte on asfaldi jäävdeformatsioon ehk roobastumine. Roobastumise ärahoidmiseks on üks olulisi komponente asfaltkatte õige tihendamine, mis mõjutab just asfaltkatte poorsust. Liiga väikese poorsusega asfaltkate muutub roobastumisele vastuvõtlikuks ning liiga kõrge poorsusega asfaltkate pole omakorda ilmastikukindel ja see omakorda kiirendab asfaltkatte vananemist. Varasemalt on deformatsioonikindluse osas kirjutatud magistritöö M. Evarti poolt 2016. aastal: võrreldi laboratoorsete katsekehade ning objektilt võetud proovikehade deformatsioonikindluse katsetulemusi. Töö autor jõudis järeldusele, et objektilt võetud kehade halvem deformatsioonikindlus võib tulla asjaolust, et kate pole objektile piisavalt hästi tihendatud. [5], [6]

Käesolev lõputöö käsitleb deformatsioonikindluse katsega seotud nüansse. Deformatsioonikindluse katse lähteandmete jaoks on vaja eelnevalt määrata asfaltsegu mahumassi ja erimassi. Erimassi määratakse alati sama meetodi alusel, kuid mahumassi määramiseks kasutatakse erinevaid meetodeid, mis võivad anda ka kuigivõrd erineva mahumassi väärtuse. Kuna asfaltsegu jäävpoorsus arvutatakse erimassi ja mahumassi alusel, siis laboratoorsete katsete käigus saab oluliseks aspektiks poorsusomaduste määramisel mahumassi meetodi valik. Ka A. Alliku 2023. aastal kirjutatud magistritöös leiti, et mahumassi määramise erinevad meetodid annavad erineva mahumassi väärtuse, mis omakorda mõjutab segu jäävpoorsust. Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida, kuidas mõjutab Eesti laborites kasutatavate kahe enamlevinud mahumassi määramise meetodi valik, EVS-EN 12697-6 meetod B ja meetod D, asfaltsegu

deformatsioonikindlust AC 32 base näitel. Lisaks uuritakse, kui palju erinevad standardi EVS-EN 12697-6 mahumassi määramise meetodid B, C ja D teineteisest AC 32 base asfaltsegu puhul. [7]

2. TAUSTAINFORMATSIOON

2.1 Deformatsioonikindluse määramise meetodid ja nõuded Eestis ning lähiriikides

2.1.1 Nõuded ja meetodid Eestis

Eestis on deformatsioonikindluse osas kehtestatud nõue PRD_{AIR} näitajale ehk suhtelisele roopasügavusele standardi EVS 901-3 põhjal. Deformatsioonikindlust määratakse standardi EVS-EN 12697-22 järgi, väikese seadmega ning B meetodiga õhu keskkonnas. Katse sooritatakse temperatuuril 50°C. AC surf tüüpi, ehk asfaltkatte kulumiskihi, segude puhul on PRD_{AIR} nõue tulenevalt segu margist ja liiklussagedusest vahemikus 9,0% kuni 20,0%. AC bin tüüpi, ehk asfaltkatte siduvkihi, segude PRD_{AIR} nõue jääb vahemikku 7,0% ja 20,0%, olenevalt segu margist ja liiklussagedusest. AC base tüüpi, ehk asfaltkatte kõige alumise kihi, segude PRD_{AIR} nõue oleneb samuti liiklussagedusest ja täpsest segu margist, ning nõue jääb vahemikku 7,0% kuni 9,0%. Kõikide eelnimetatud segude puhul jalgratta-, jalg- ja kõnniteedel ning õuealadel nõue puudub ning PRD_{AIR} on vaid deklareeritav väärtus. Lisaks põhinevad eelnimetatud nõuded eeldusel, et segus kasutatakse teebituumenit margiga 70/100 või modifitseeritud bituumenit margiga PMB 65/105-65. Kasutades teiste markidega bituumenit, tuleb, vastavalt bituumeni margi mõjule deformatsioonikindlusele, korrigeerida deformatsioonikindluse nõuet. Näiteks kasutades pehmemat ehk suurema penetratsiooniga bituumenit, tuleb suurendada PRD_{AIR} kategooriat. Transpordiameti Asfaldist katendikihtide ehitamise juhises on lisaks märgitud, et koos suhtelisele roopasügavusele tuleb katsetada veel ka maksimaalne roobastumiskiirus ehk WTS_{AIR} . Küll aga selle näitaja kohta konkreetset nõudeid puuduvad ning see on deklareeritav väärtus. [8], [9]

2.1.2 Nõuded ja meetodid Norras

Norras määratakse asfaldi deformatsioonikindlust sama standardi järgi nagu Eestiski, EN 12697-22, väikese seadmega ning meetodiga B õhu keskkonnas. Samuti sooritatakse katse 50°C juures. Olgugi, et standard ütleb, et katsekehad tuleb katsetada 48 h kuni 42 päeva jooksul, siis Norra on sisse viinud täpsustuse, et katsekehad katsetatakse minimaalselt 8 ja maksimaalselt 30 päeva jooksul. Teine erinevus Eestiga võrreldes on see, et Norras katsetatakse objektidelt võetud puurkehasid, mitte laboris valmistatud proovikehasid. Deformatsioonikindluse nõude väärtus tuleneb Norras liiklussagedusest – teedel, mille ööpäevane liiklussagedus on 5001 kuni 10000 autot ööpäevas, on PRD_{AIR} nõue maksimaalselt 7% ning teedel, mille ööpäevane

liiklussagedus on üle 10000 auto ööpäevas, on PRD_{AIR} nõue maksimaalselt 5%. Kui liiklussagedus on alla 5001 auto ööpäevas, ei ole deformatsioonikindluse nõude kohta midagi öeldud. [10], [11], [12]

2.1.3 Nõuded ja meetodid Lätis

Lätis määratakse asfaldi deformatsioonikindlust sarnaselt nagu Eestis, kuid teatavate erisustega. Katse sooritatakse standardi EN 12697-22 järgi väikese seadmega ja B meetodiga õhu keskkonnas, kuid 60°C juures ning objektilt võetud puurkehadele, mitte laboratoorsetele proovikehadele. Erinevalt Eestist, ei ole Lätis nõuet PRD_{AIR} kohta. Küll on aga nõue RD_{AIR} kohta, mis võib olla tulenevalt liiklussagedusest 8 kuni 10 mm ning WTS_{AIR} , mis samuti olenevalt liiklussagedusest võib olla 0,10 kuni 1,00 mm 1000 koormustsükli kohta. [13]

2.1.4 Nõuded ja meetodid Leedus

Leedus tihendatakse deformatsioonikindluse katsekehad laboris standardi EN 12697-33 järgi terasrulli sektori meetodiga. Proovikehade katsetamine toimub sama standardi järgi nagu Eestis, EN 12697-22, väikese seadmega B meetodiga õhu keskkonnas, kuid 50°C asemel 60°C juures. Eestiga sarnaselt on Leedus asfaltsegudele PRD_{AIR} nõue, mis olenevalt segu tüübist on kas 5,0%, 7,0%. Osadel segudel nõue puudub või on ainult deklareeritav väärtus. Samuti on ka WTS_{AIR} kas deklareeritav väärtus või siis nõue puudub. [14]

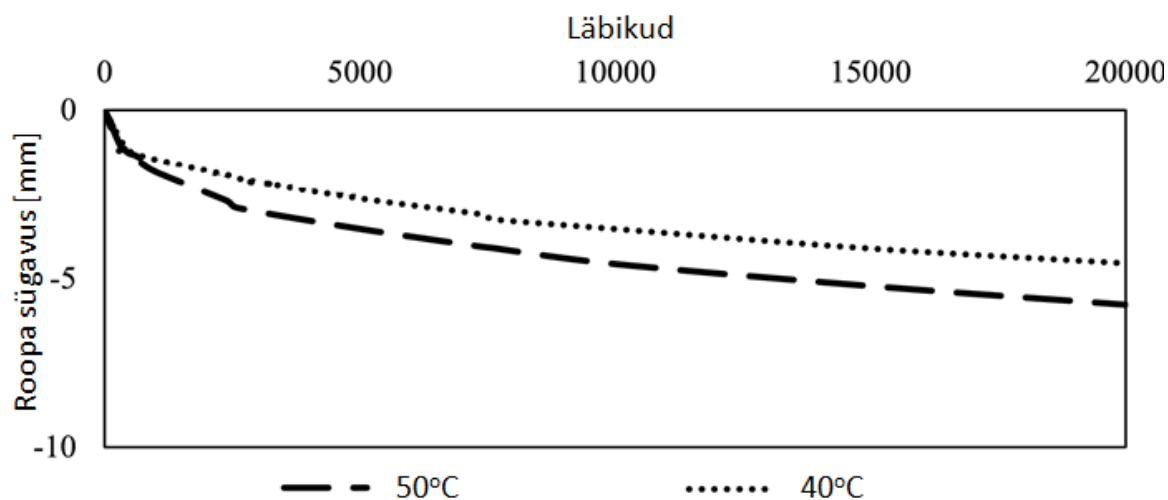
2.2 Deformatsioonikindlust mõjutavad tegurid

Roobastumine on jääv nähtus asfaldi puhul jäävdeformatsiooni tekke tõttu asfaldi pideval koormamisel. Asfaldi deformatsioonikindlust mõjutavad mitmed tegurid. Kõige olulisemateks jäävdeformatsiooni mõjutavateks teguriteks on temperatuur, täitematerjali terasuurus ja terastikuline koostis, sideaine sisaldus ja sideaine mark, koormus ning asfaltsegu jäävpoorsus. Temperatuuri negatiivne mõju esineb kõrgemate temperatuuride puhul - roopad tekivad asfaltkattele enamasti soojemate ilmadega. Segu nõrgem skelett ja peenem terastikuline koostis on jäävdeformatsioonile vastuvõtlikumad. Samuti tekivad roopad kergemini, kui segus on kasutatud pehmemat sideaine marki ning sideaine sisaldus on kõrgem või liiga madal. Oluliseks mõjutajaks on ka koormus: suurema ning raskema liikluskoormusega teedel on rangem deformatsioonikindluse nõue. Viimaseks nimetatud teguriks on segu jäävpoorsus. Liiga madal jäävpoorsus ei anna segule piisavalt tugevat skeletti - see viib halva

deformatsioonikindluseni ning liiga kõrge jäävpoorsuse korral pääseb vesi pooridesse, mis vähendab samuti katte eluiga. [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22]

2.2.1 Temperatuur

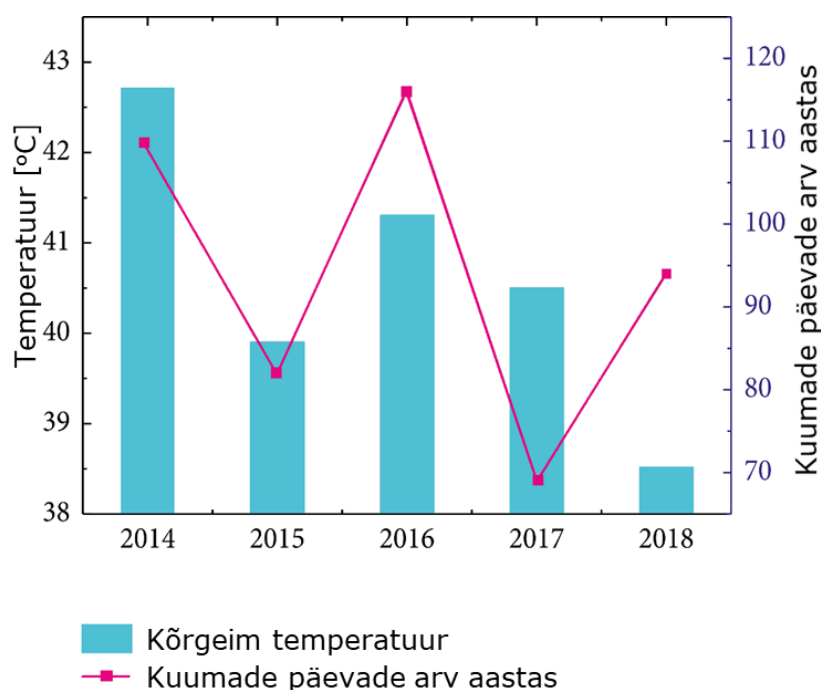
Asfaltsegu koostise tõttu on temperatuur suureks mõjuteguriks segu deformatsioonikindluse osas. Olenevalt segutüübist võib asfalt sisaldada 94-96% täitematerjali ning 4-6% sideainet ehk bituumenit. Olgugi, et bituumeni sisaldus on asfaltsegus väga väike, on sellel oluline roll segu toimivusele. Asfaltsegu temperatuuritundlikkus tuleneb bituumeni omadustest. Bituumen on viskoelastne ja termoplastne materjal: seetõttu temperatuuri tõustes väheneb bituumeni viskoossus ning see viib olukorrani, kus asfaltkate on koormuse olemasolul vastuvõtlikum jäävdeformatsioonile. Samuti tuleb temperatuuri mõju deformatsioonikindlusele välja laboratoorsete katsete käigus. Joonisel 2.1 on näha 2022. aastal tehtud uuringu tulemused, kus katsetati 60 mm paksuseid deformatsioonikindluse plaate erinevatel temperatuuridel. 40°C juures teostatud katse tulemuseks saadi roopa sügavuseks 4,55 mm, kuid 50°C juures teostatud katse tulemuseks saati 5,78 mm. [15], [23], [24], [25]



Joonis 2.1 Roopasügavus deformatsioonikindluse katsel eri temperatuuridel [24]

Ühepäevane kuumalaine või üksikute päevade kõrged temperatuurid ei pruugi asfaltkatte deformatsioonikindlusele veel suurt mõju avaldada. Küll aga tekib probleem, kui kõrged temperatuurid esinevad tihti ja järjestikustel päevadel. Piisavalt paksu ning hästi tihendatud asfaltkatte korral ei pruugi kuumus veel alumistesse kihtidesse levida. Kui aga kuumad päevad on järjestikused või esinevad tihti puudub kattel võimalus vahepeal maha jahtuda ning see võib viia olukorrani, kus kuumus akumuleerub ning levib kattes ka alumistesse kihtidesse. 2014 kuni 2018 aastatel

mõõdeti Hiinas Chongqingi piirkonnas teekatte temperatuuri erinevatel sügavustel. Teekatte pinnal, 2 cm, 7 cm ja 13 cm sügavustel. Samuti võeti Hiina meteoroloogiliste andmete keskusest võrdluseks nimetatud piirkonna iga kuu kõrgeima temperatuuri ning kuumade päevade arv aastas. Kuumadeks päevadeks loeti päevi, kus õhutemperatuur ületas 30°C. Joonisel 2.2 ja tabelis 2.1 on näha, et pikaajased kõrged temperatuurid ning temperatuur sügavamal teekattes on omavahel korrelatsioonis. Mida kõrgem on temperatuur teekattel pinnal, seda kõrgem on see ka katte alumistes kihtides, mis omakorda vähendab alumiste kattekihtide deformatsioonikindlust. [25]



Joonis 2.2 Chongqingi piirkonna kuumade päevade arv aastas ja maksimaalne õhutemperatuur [25]

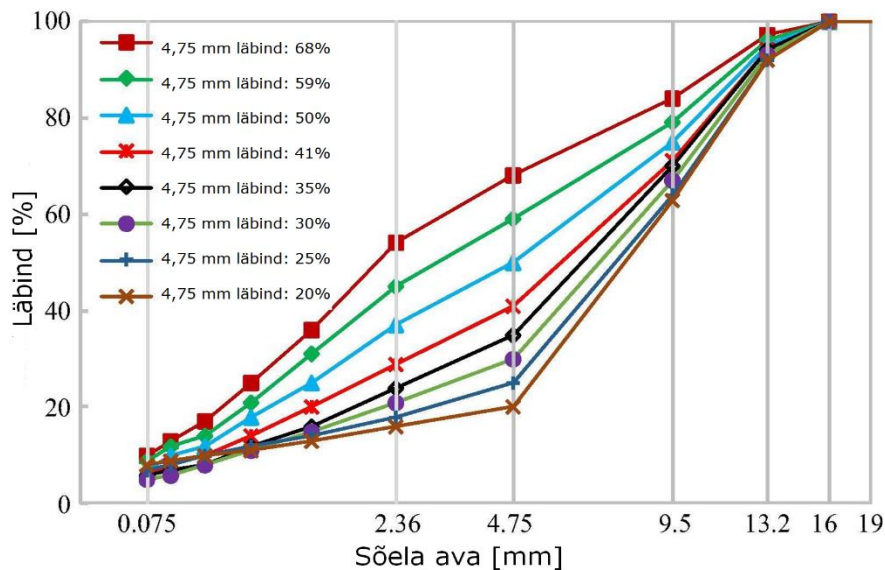
Tabel 2.1 Chongqingi piirkonna teekatte maksimaalsed temperatuurid eri sügavustel [25]

Aasta	Asfaltkatte kõrgeim temperatuur teekatte eri sügavustel Chongqingi piirkonnas Hiinas [°C]			
	0 cm	2 cm	7 cm	13 cm
2014	68.5	64.6	57.4	51.9
2015	65.7	61.9	54.9	49.6
2016	67.1	63.2	56.2	50.7
2017	66.3	62.5	55.5	50.1
2018	64.3	60.6	53.7	48.5

2.2.2 Täitematerjali terasuurus ja terastikuline koostis

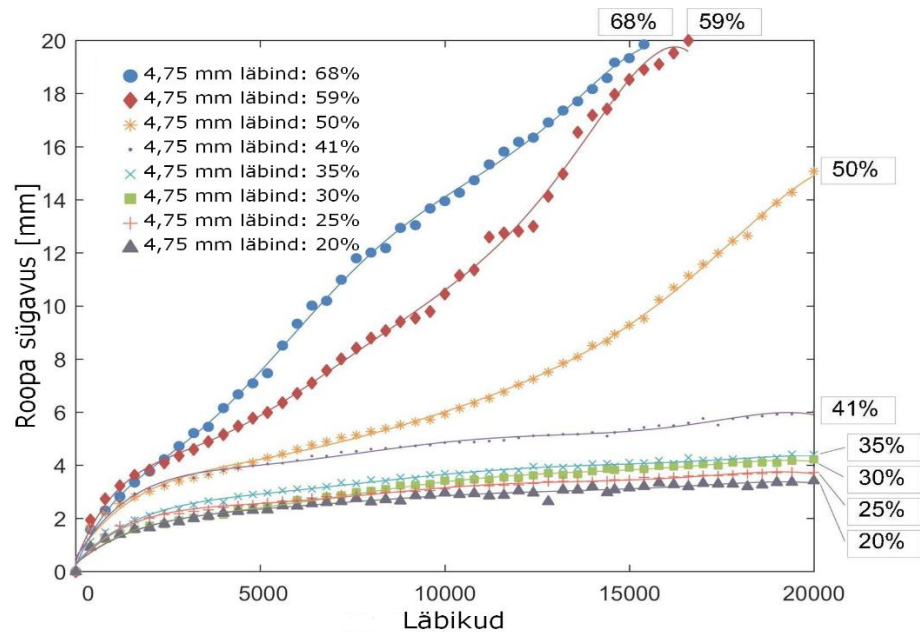
Täitematerjali valik ning õigesti projekteeritud terastikuline koostis on üks asfaltsegu hea deformatsioonikindluse alustest. Täitematerjali ülesandeks on asfaltsegule anda tugev skelett, mis oleks võimeline vastu võtma koormusi ilma liiga suurte deformatsioonideta. Liiga peenikese segu projekteerimise puhul ei pruugi segus olla piisavalt palju jämedaid täitematerjali osakesi, mis lukustuks omavahel tugevaks skeletiks ära. Liikluskoormuse all saavad osakesed kergesti nihkuda – see annab eelduse kehvale deformatsioonikindlusele. [16], [17], [26]

Varasemalt on läbi viidud uuring, mille käigus valmistati kaheksa erineva terastikulise koostisega asfaltsegu jättes sideainesisalduse kõikidel juhtudel samaks, 5% juurde, ning teostati neile deformatsioonikindluse katse. Terastikulise koostise määramisel lähtuti 4,75 mm sõela läbinditest, kuna on arvestatud, et sellest väiksemad osakesed ei anna asfaltsegule skeletti ja tugevust. Segude terastikulised koostised on näha joonisel 2.3. 4,75 mm sõela läbindid jäid vahemikku 20% kuni 68%. [26]



Joonis 2.3 Uuringus katsetatud segude terastikulised koostised [26]

Antud uuringust kajastub, et deformatsioonikindlus on tugevas korrelatsioonis asfaltsegu terastikulise koostisega. Joonisel 2.4 on näha, et mida jämedam on segu, seda parem on deformatsioonikindlus. Kõige parem tulemus oli kui 4,75 mm sõela läbind jäi 20% juurde. Läbindit suurendades 20% juurest 35% juurde, suurenes roobastumine väikesel määral ja ühtlaselt. Suurendades aga 4,75 mm sõela läbindit rohkem kui 35%, hakkas deformatsioonikindlus langema drastiliselt. [26]



Joonis 2.4 Deformatsioonikindluse sõltuvus terastikulisest koostisest [26]

2.2.3 Sideaine sisaldus

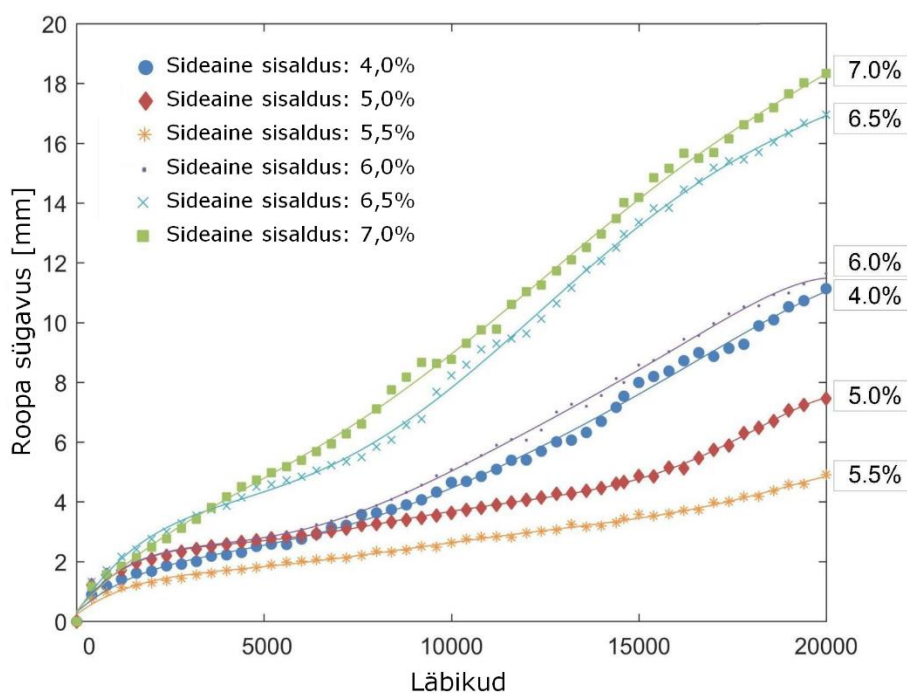
Olgugi, et asfalt koosneb suuremas osas killustikust ning bituumeni sisaldus jääb vahemikku 4% kuni 6%, siis igale segule optimaalne bituumenisaldus on deformatsioonikindluse seisukohalt oluline faktor. Bituumeni ülesanne asfaltsegus on täitematerjali katmine bituumeniga ning selle sidumine omavahel, et tekitada selle abiga asfaltsegule tugev skelett. Optimaalsest madalam sideaine kogus võib viia täitematerjali osakeste ebapiisava katmiseni ja sellest tulenevalt on ka täitematerjali osakeste omavahelised sidemed nõrgemad. See põhjustab aga tee peal asfaltkatte kiirema roobastumise. Vastupidiselt liiga suur sideaine kogus tekitab täitematerjali osakestele liiga paksu sideaine kihi, mis nõrgestab osakeste omavahelisi sidemeid ja pehmemdab segu. Samuti võib liigne sideaine kogus täita asfaltsegu vajalikud õhupoorid mis vähendab omakorda asfaltsegu deformatsioonikindlust. [21], [26]

Järgnevas näites on kasutatud AC 13 tüüpi asfaltsegu ning katsetatud selle deformatsioonikindlust 6 erineva sideainesisalduse juures. Tabelis 2.2 on näha segude sideainesisaldused, mis jäid vahemikku 4% kuni 7%, ning terastikulised koostised, mis on kõikide segude puhkudel samaks jäetud. [26]

Tabel 2.2 AC 13 segu sideainesisaldused ja terastikuline koostis [26]

Sideaine sisaldus [%]	Sõela ava koos läbindiga [%]									
	16	13,2	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
4,00	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6
5,00	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6
5,50	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6
6,00	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6
6,50	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6
7,00	100	95	77	53	37	27	19	14	10	6

Muutes vaid segu sideainesisaldust, oli deformatsioonikindluse katse lõpliku roopasügavuse erinevus kõige kehvemal ja kõige paremal segul üle kolme korra. Joonisel 2.5 kajastub, et kõige kehvemad tulemused olid kolme kõige suurema sideainesisaldusega segudel. Teatud piirist alates sideainet vähendades tulid aga jälle kehvemad deformatsioonikindluse tulemused. Nimetatud AC 13 segu puhul on kõige parema tulemuse andnud 5,5% bituumenisisaldus. [26]



Joonis 2.5 Lõplik roopasügavus erinevate sideaine sisalduste juures [26]

2.2.4 Koormus

Laboratoorsete katsetuste käigus katsetatakse deformatsioonikindlust standardsetel tingimustel, rakendades 50 mm laiuse rattaga 0,7 kN suurusega koormust proovikehale. Küll aga teele paigaldatud asfaltkatele tulenev koormus erineb erinevatel teedel suurel määral ning suur liikluskoormus on ka üheks oluliseks faktoriks asfaltkatte deformeerumisel ekspluatatsiooni käigus. See on ka põhjus, miks deformatsioonikindluse nõue on seoses liiklussagedusega nii Eestis kui ka lähiriikides. Olgugi, et Eesti teedevõrgu pikkus on 89452 km, siis suurema osa liiklussagedusest saavad enda kanda põhi- ja tugimaanteed, mis on enamuses osas asfaltbetoonkattega. 2022. aastal oli põhi- ja tugimaanteed osakaal Eestis 4,5% kogu teedevõrgust, kuid neil teedel toimus 40,7% kogu Eesti liiklusest. Tabelis 2.3 on näha, et 2015 kuni 2022 on Eesti autopargi läbisõit igal aastal kasvavas trendis olnud, v.a 2020 aasta, mille väheneva läbisõidu mõjaks võis olla koroonaviiruse levik Eestis ning liikumiskiirangute kehtestamine, mille esimesed sammud algasid 2020 aasta märtsis. [4], [10], [19], [27]

Tabel 2.3 Eesti autopargi läbisõit (milj. km) [4]

Aasta	Riigiteed				Kohalikud teed		Kokku
	Põhi- maantee	Tugi- Maantee	Kõrval- maantee	Ühendus- tee	Muud teed	Linnad	
2015	2813.1	1300.2	1262.5		522.8	4077.1	9975.8
2016	2956.5	1345.1	1325.2	2.8	521.7	4236.0	10387.3
2017	3092.8	1369.1	1364.4		519.0	4466.0	10811.3
2018	3168.5	1406.1	1414.4		530.4	4678.0	11197.1
2019	3292.1	1457.1	1465.6		543.3	4901.0	11659.1
2020	3177.1	1444.9	1488.9		538.5	4612.0	11251.4
2021	3266.3	1450.5	1496.7		547.6	4806.8	11568.2
2022	3310.2	1450.4	1505.2		552.3	4878.0	11696.1

Liiklussageduse koha pealt on asfaldi deformatsioonikindluse osas oluliseks faktoriks veel raskeliikluse osakaal, avaldades asfaltkatele suuremat mõju kui sõiduautod. Ka standardis EVS 901-3 on AC surf segude PRD_{AIR} nõude juures täpsustus AC 16 surf ja AC 20 surf osas, et kui AKÖL > 1500 on raskeliikluse osakaal > 10%, tuleb valida ühe kategooria võrra rangem nõue. Tabelis 2.4 on näha, et 2015 kuni 2020 aasta statistika kohaselt on Eestis kõik sõidukite liigid olnud kasvavas trendis, kuid protsentuaalselt on kõige rohkem kasvanud just veoautode hulk. Kui kogu autopark on kasvanud 17,0%, siis veoautode osakaal on kasvanud 32,1%. Ehk Eesti teede asfaltkatted peavad üha rohkem koormust vastu võtma aina suurema autostumise ja raskema liikluse tõttu kui ka suurema läbitud kilomeetrite hulga tõttu. [8], [28], [29], [30]

Tabel 2.4 Eesti autopargi kasv aastatel 2015 – 2020 [28], [29]

Aasta	Autosid kokku	Sealhulgas		
		Sõidua autod	Bussid	Veoa autod
2015	626776	544324	3651	78801
2016	644799	557743	3649	83407
2017	662912	571221	3704	87987
2018	677864	581662	3610	92592
2019	728433	621804	3976	102653
2020	733062	625022	3970	104070
Muutus 2020/2015	17.0%	14.8%	8.7%	32.1%

2.2.5 Asfaltsegu jäävpoorsus

Asfaltsegu õige tihendamine aitab pikendada selle eluiga ning vähendada katte probleeme nagu näiteks jäävdeformatsioon. Asfaltkatte optimaalne poorsus on oluliseks aspektiks, kuna see on otseses kokkupuutes sõidukite rehvidega ning saab katendist omale kõige suurema koormuse. Erinevatel asfaltsegudel on ette nähtud kindel poorsus tulenevalt nende kasutusvaldkonnast ning segu tüübist. [5]

Asfaltsegu järeltihendamise tõttu liikluskoormuse all ei tohi poorsus olla liiga väike. Madal poorsus võib viia olukorrani, kus sideaine võib täita allesjäävad poorid asfaltsegu skeleti vahel, mistõttu võib segu käituda liikluskoormuse all justkui ujuv materjal, mis on suureks ohuallikaks jäävdeformatsiooni tekkele. [5], [22], [31]

Teisalt ei tohiks olla asfaltkate ka alatihendatud. Liiga kõrge poorsus suurendab vee ja õhu ligipääsu asfaltkatte sisse, seetõttu on kate vähem ilmastikukindel. Liigne niiskus ja õhu juurdepääs katte pooridesse kiirendavad katte vananemist. [5], [31]

3. TEOSTATUD KATSETE KIRJELDUSED

3.1 Näiv erimass EVS-EN 12697-5:2018

Asfaltsegu erimass ehk mass mahuühiku kohta ilma õhupoorideta määrati standardi EVS-EN 12697-5:2018 mahulise meetodi (meetod A) järgi. Selle jaoks kuivatati ja jagati vähemalt 50 korda suurem kogus täitematerjali suurimate osakeste terasuurusel (AC 32 base 70/100 puhul vähemalt 1600 g) jämedateks osisteks ja aglomeraatideks (osaliselt tompunud peenmassiks). Seejärel kaaluti teadaoleva mahuga (V_p) püknomeeter koos ülaosaga (m_1), kuhu lisati kuiv ja jahutatud katseproov, misjärel kaaluti püknomeeter taas koos ülaosaga (m_2). Püknomeeter täideti õhuvaba veega. Katseproovi poorides olev õhk eemaldati vaakumkambris vibroaluse peal väristades, rakendades 15 ± 1 minut vältel osalist vaakumit – jääkrõhuga 4kPa või vähem. Peale pooridest õhu välja saamist asetati püknomeeter 30 minutiks kindla katsetemperatuuriga veevanni, et viia püknomeetris oleva vee temperatuur samale tasemele veevanni temperatuuriga ($\pm 1,0$ °C). 30 minuti möödudes võeti püknomeeter veevannist välja, kuivavati selle välispind ning määrati selle mass (m_3). Erimass arvutati kindlaksmääratud kuiva massiga kobestatud asfaltsegu mahu järgi püknomeetris vee väljasurve alusel. [32]

Kõigepealt arvutati vee tihedus katsetemperatuuril [32]:

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59 * t - 5,32 * t^2}{10^6} \right) \quad (3.1)$$

kus ρ_w on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3),
 t on vee temperatuur kraadides Celsiuse järgi (°C).

Peale seda arvutati asfaltsegu mahulise meetodi erimass ρ_{mv} [32]:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 * V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w} \quad (3.2)$$

kus ρ_{mv} on mahulise meetodiga määratud asfaltsegu näiv erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3), ümardatuna lähima 0,001 Mg/m^3 ,
 m_1 on püknomeetri ja ülaosa ühismass grammides (g),
 m_2 on püknomeetri, ülaosa ja katseproovi ühismass grammides (g),

- m_3 on püknomeetri, ülaosa, katseproovi ja vee ühismass grammides (g),
 V_p on mõõtemärgini täidetud püknomeetri maht kuupmeetrites (m^3),
 ρ_w on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3).

3.2 Mahumass EVS-EN 12697-6:2020

Asfaltsegu mahumassi määramiseks ning deformatsioonikindluse proovikehade lähteandmete saamiseks valmistati kõigepealt güraatortihendajaga proovikehad. Proovikehad valmistati standardi EVS-EN 12697-31:2019 järgi. Proovikehade mass (M) arvutati varasemalt määratud sama asfaltsegu erimassi ($\rho_{mv} = \rho_M$), proovikeha minimaalse kõrguse (h_{min}) ning kasutatava silindrilise vormi siseläbimõõdu (D) alusel (AC 32 base 70/100 puhul 150 mm) [33]:

$$M = 10^{-3} * \pi * \frac{D^2}{4} * h_{min} * \rho_M \quad (3.3)$$

- kus M on vormi sisestatava kuiva segu mass grammides (g),
 D on vormi siseläbimõõt millimeetrites (mm),
 h_{min} on tihendatud proovikeha minimaalne kõrgus mis vastab nullpoorsusele millimeetrites (mm),
 ρ_M on segu erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3).

Väljaarvutatud kogus soojendatud asfaltsegu lisati metallist silindrilisse vormi. Tihendamise temperatuur sõltub kasutatavast sideaine margist – sideaine puhul, mille penetratsioonimark on 70/100, on tihendamise temperatuur standardi EVS-EN 12697-35:2016 kohaselt 145°C. Tihendamine saavutatakse staatilise surve ja nihkedeformatsiooni samaaegsel mõjumisel. Tihendamise energia sõltub edasiste katsete vajadusest – poorsusomaduste määramiseks on standardi EVS 901-3:2021 kohaselt tihendamisenergia güraatortihendamise korral AC 32 base 70/100 60 pööret. [8], [33], [34]

Proovikeha mahumass ehk poore sisaldava proovikeha mass mahuühiku kohta määrati kolme erineva meetodiga massi ja mahu põhjal. Kõigi meetodite puhul määrati see standardi EVS-EN 12697-6:2020 järgi.

Immutatud ja kuivatatud pinnaga (SSD) mahumassi ehk meetodi B puhul määrati proovikeha kuiv kaal (m_1), asetati proovikeha vette veega küllastumiseks 30 minutiks ning määrati küllastunud proovikeha mass vees (m_2). Peale seda võeti proovikeha veest

välja, kuivatati proovikeha pealispind ning määrati immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikeha mass (m_3). Teades vee temperatuuri ning vee tihedust katsetemperatuuril (ρ_w) arvutati proovikeha mahumass (ρ_{bssd}) [35]:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (3.4)$$

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).

Teise mahumassi leidmise meetodina kasutati meetodit D ehk mõõtmete põhist mahumassi meetodit (ρ_{bdim}). Selle puhul kaaluti kuiv proovikeha (m_1) ning vastavalt standardile EVS-EN 12697-29:2020 määrati proovikeha mõõtmed. Silindrilise proovikeha ehk güratortihendajaga valmistatud proovikeha puhul määrati kõrgus neljast eri kohast ning arvutati välja nende keskmine (h). Seejärel mõõdeti proovikeha diameeter proovikeha mõlemas otsas ja keskel kahel teineteisega risti oleval suunal. Saadud tulemuste põhjal arvutati proovikeha keskmine diameeter (d). Ristkülikukujulise proovikeha ehk deformatsioonikindluse katse proovikeha mõõtmete jaoks tehti proovikeha igas suunas [pikkus (l), laius (w), kõrgus (h)] neli mõõtmist võrdsete vahedega mööda iga proovikeha perimeetrit ning võeti iga perimeetri keskmine. [35], [36] Silindrilise proovikeha mõõtmepõhiseks mahumassiks kasutati valemit [35]:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^3 \quad (3.5)$$

kus ρ_{bdim} on mõõtmepõhine 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).

Ristkülikukujulise proovikeha mahumass arvutati valemiga [35]:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{h * l * w} * 10^3 \quad (3.6)$$

- kus ρ_{bdim} on mõõtmepõhine proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3),
 m_1 on kuiva proovikeha mass grammides (g),
 h on proovikeha kõrgus millimeetrites (mm),
 l on proovikeha pikkus millimeetrites (mm),
 w on proovikeha laius millimeetrites (mm).

Kolmandaks mahumassi leidmise meetodiks kasutati meetodit C ehk mahumass hermetiseeritud proovikehaga. Kõigepealt määrati proovikeha mass (m_1). Seejärel hermetiseeriti proovikeha parafiinvahaga kuni see oli saavutanud ühtlase parafiinvaha kihi, mis kattis kogu proovikeha. Määrati hermetiseeritud proovikeha mass (m_2). Seejärel riputati proovikeha kindla temperatuuriga veevanni ning määrati hermetiseeritud proovikeha mass vee all (m_3). [35] Hermetiseeritud proovikeha mahumassiks kasutati valemit [35]:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3)/\rho_w - (m_2 - m_1)/\rho_{sm}} \quad (3.7)$$

- 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).

3.3 Poorsusnäitajad (jäävpoorsus) EVS-EN 12697-8:2018

Poorsus ehk jäävpoorsus on pooride maht asfaldist proovikehas, väljendatuna protsendina proovikeha üldmahust ning leitakse vastavalt standardile EVS-EN 12697-8:2018. Segu erimassi (ρ_m) ja proovikeha mahumassi (ρ_b) alusel arvutati proovikeha poorsus (V_a) valemiga [37]:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100 \quad (3.8)$$

kus V_a on asfaldist proovikeha poorsus mahu järgi, täpsusega 0,1 protsenti (%),
 ρ_m on segu erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3),
 ρ_b on proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3).

3.4 Rattaroopa katse (meetod B, väike seade) EVS-EN 12697-22:2020

Rattaroopa katse proovikehad valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022 kasutades terasrulli sektori meetodit. Katsekogus proovikehade valmistamiseks (M) arvutati varasemalt määratud segu erimassi (ρ_m), proovikehade poorsuse (v) ning segu suurimale teramõõdule vastava nimipaksuse järgi (e). Nimipaksus tuleb standardist EVS-EN 12697-22:2020 ning AC 32 base 70/100 segu puhul on see 80 mm. [10], [38]

Koguse arvutamiseks kasutati valemit [38]:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \left(\frac{100 - v}{100} \right) \quad (3.9)$$

kus M on tihendamisevormi sisestatav segu mass kilogrammides (kg),
 L on vormi sisepikkus millimeetrites (mm),
 l on vormi sisepaksus millimeetrites (mm),
 e on tihendatava proovikeha nimipaksus (mm),
 ρ_m on segu erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m^3),
 v on segu jäävpoorsus protsentides (%).

Väljaarvutatud vormi sisestatav katsekogus kuumutati 145°C kraadi juurde ning asetati seejärel kindlate mõõtudega katsevormidesse, mis omakorda asetati rulltihendajasse, kus proovikehad tihendati. Protseduur sooritati 5 minuti jooksul peale vormide täitmist. Ühe deformatsioonkindluse katse jaoks valmistati 2 proovikeha – enne edasist deformatsioonikindluse katset lasti kehadel taheneda vähemalt 48 tundi toatemperatuuril (alla 25°C). [10], [38], [34]

Deformatsioonikindluse katse sooritati standardi EVS-EN 12697-22:2020 järgi B meetodil ehk väikese seadmega õhu keskkonnas. Enne katsetamist määrati proovikehadele mahumass nii B kui ka D meetodiga ning kontrolliti proovikehade nimipaksust. Seejärel asetati proovikehad rattarooma seadmesse ning viidi katsetemperatuuri juurde (50°C juurde), enne katsetamist hoiti proovikehi nimetatud temperatuuril 6 tundi. Peale seda koormati proovikehi korduvate läbikutega samal temperatuuril kas 10000 koormustsükli või kuni roobas saavutas sügavuse 20 mm. [10]

Katse lõpus saadi keskmine roopasügavus RD_{AIR} õhus, mis on katsetatava proovi kahe (või enama) proovikeha keskmine roopasügavus, täpsusega $\pm 0,1$ mm. [10]

Lisaks sai välja arvutatud keskmine roobastumise tõus õhus – keskmine roobastumise tõus õhus (WTS_{AIR}) on kahe proovikeha keskmine roobastumise tõus väljendatuna lähima 0,01 millimeetrini 1000 koormustsükli kohta. Iga proovikeha roobastumise tõus arvutati järgneva valemiga [10]:

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (3.10)$$

kus WTS_{AIR} on roobastumise tõus millimeetrites 1000 koormustsükli kohta,
 d_{5000} on vertikaalne paigutus pärast 5000 koormustsükli millimeetrites (mm),
 d_{10000} on vertikaalne paigutus pärast 10000 koormustsükli millimeetrites (mm).

Samuti sai välja arvatud keskmine suhteline roopasügavus (PRD_{AIR}), mis on materjali roopasügavus n tsükli juures väljendatuna kahe (või enama) proovikeha suhtelise roopasügavuse keskmisena väljendatuna $\pm 0,1\%$ täpsusega. Iga proovikeha suhteline roopasügavus (PRD_{AIR}) arvutati valemiga [10]:

$$PRD_{AIR} = 100 * \frac{d_n - d_0}{h} \% \quad (3.11)$$

kus PRD_{AIR} on i -nda paralleelproovi suhteline roopasügavus, protsentides (%),
 d_n on vertikaalne paigutus pärast n koormustsüklit millimeetrites (mm),
 d_0 on algne vertikaalne paigutus millimeetrites (mm),
 h on proovikeha paksus millimeetrites (mm).

3.5 Terastikuline koostis EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019

Asfaltsegu ekstraheeriti, misjärel määrati terastikuline koostis standardi EVS-EN 12697-2 põhjal. Ekstraheerimise käigus eraldati asfaltsegust lahustuv sideaine metüleenkloriidiga, peale mida kuivatati sideainest puhtaks pestud täitematerjal. Seejärel kuivatatud täitematerjal kaaluti ning sõeluti. Sõelkõver saadi sõelumise käigus kaalutud vastavate sõelte läbindite põhjal ning seejärel on neid tulemusi võrreldud standardi EVS 901-3 alusel kehtestatud asfaltsegu minimaalsete ja maksimaalsete sõelte läbindite nõuetega. [39]

4. KATSETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS

4.1 Mahumassi määramise meetodi valik AC 32 base segul

Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhises on kirjas, et objektilt võetud proovile tuleb määrata deformatsioonikindlus standardi EVS-EN 12697-22 põhjal. Lisaks on mainitud, et katseprotokollile tuleb ka märkida jäävpoorsus, mahumass ja erimass ning segu erimassi ja mahumassi määramise protseduuri valikul tuleb juhendada standardis EVS-EN 13108-20 olevatest nõuetest. Samuti tuleb mahumassi määramisel juhendada katsestandardist EVS-EN 12697-6. [9]

Valides Eesti laborites kõige enamlevinuma meetodi ehk meetodi B ning jõudes katsekäigu lõppu, kus tuleb kaaluda immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikeha mass õhus, ütleb standard, et kui proovikehast nõrgub vett välja, tuleb katkestada mõõtmine B meetodi järgi ning jätkata mõõtmist meetodiga C või sobivuse korral meetodiga D. AC 32 base puhul on see tavapärane, et proovikeha pooridest nõrgub peale pealispinna kuivatamist jätkuvalt vett välja. Valides esimese soovitusena ehk meetodi C ütleb standard, et katse käigus tuleb määrata kas kuiva proovikeha mass või niiskete proovikehade puhul jätta see protseduur viimaseks. Teise variandi puhul tekib aga vastuolu – C meetodi puhul ei ole võimalik jätta kuiva proovikeha massi määramist protseduuri lõppu, kuna proovikeha hermetiseeritakse ja kaetakse parafiinvahaga. Võimalus on veel lasta proovikehal enne C meetodiga jätkamist kuivada püsiva massini – standardi kohaselt on püsiv mass siis, kui kuivatamisel vähemalt ühetunnise vahega sooritatud järjestikused kaalumised ei erine rohkem kui 0,1%. Arvestades AC 32 base proovikehade massi, siis siin võib tekkida olukord, kus standardi järgi on proovikeha saavutanud püsiva massi ning ühetunnise vahega järjestikused kaalumised ei erine rohkem kui 0,1%, kuid tegelikkuses on proovikehas jätkuvalt vesi sees. Jätkates sellise proovikeha katsetamist, kus on poorides jätkuvalt vesi sees, ei anna see õiglast tulemust. Lisaks täielikult vee väljasaamine AC 32 base proovikehade puhul võib aega võtta mitu nädalat. [9], [35]

Jätkates C meetodiga, tuleb kuiv proovikeha täielikult hermetiseerida parafiinvahaga nii, et vette sukeldumisel oleks proovikeha veekindel. Hermetiseerides tuleb vältida parafiinvaha proovikeha koostise hulka loetavatesse proovikeha sisemistesse pooridesse tungimist ning sooritada protseduur nii, et parafiinvaha jääks katma vaid proovikeha välispinda. See protseduur ei ole aga mitte kuidagi kontrollitav – määrares kuiva hermetiseeritud proovikeha massi, ei saa teada kui palju parafiinvaha jääb

proovikeha pealispinnale tegelikult ning kui palju on tunginud proovikeha sisemistesse pooridesse. Lisaks ütleb standardi EVS-EN 12697-6 lisa A.3 juhise, et mõned isoleermaterjalid, näiteks parafiinvaha, võivad tungida proovikeha sisemistesse pooridesse, mis viib mahumassi ülehindamiseni ja poorsuse alahindamiseni. Samuti ütleb see sama lisa A.3 B meetodi kohta, et vee liigne väljavool proovikeha pindkuiva kaalumise ajal viib mahumassi ülehindamiseni ja proovikeha jäävpoorsuse alahindamiseni. Seega, nii meetodi B kui ka C puhul on oht, et AC 32 base proovikehade puhul ülehinnatakse mahumass. [35]

Minnes tagasi Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhise juurde, ütleb see, et mahumassi ja erimassi määramisel tuleb juhinduda standardi EVS-EN 13108-20 esitatud nõuetest. Tabelis 4.1 on näha segu omadus, mille alusel tuleb standardi EVS-EN 13108-20 järgi valida segu mahumassi määramise meetod – juhinduda tuleb segu maksimaalsest poorsusest V_{max} . [9], [40]

Tabel 4.1 Mahumassi meetodi valiku kriteerium sõltuvalt segu omadusest [40]

Asfaltbetooni katsete tüübid	
Omadus	Katsemeetod
Poorsus, sh pooride bituumeniga täidetud (VFB) ja skeletipoorsus (VMA), kui $V_{max} \leq 7 \%$	EN 12697-8 Kasutades mahumassi määramisel standardi EN 12697-6 protseduuri B, immutatud ja kuiva pinnaga proovikeha mahumass. Kasutades erimassi määramisel standardi EN 12697-5 protseduuri A vees.
Poorsus, sh pooride bituumeniga täidetud (VFB) ja skeletipoorsus (VMA), kui $7 < V_{max} < 10 \%$	EN 12697-8 Kasutades mahumassi määramisel standardi EN 12697-6 protseduuri C, hermetiseeritud proovikeha. Kasutades erimassi määramisel standardi EN 12697-5 protseduuri A vees.
Poorsus, sh pooride bituumeniga täidetud (VFB) ja skeletipoorsus (VMA), kui $V_{max} \geq 10 \%$	EN 12697-8 Kasutades mahumassi määramisel standardi EN 12697-6 protseduuri D, mõõtmepõhine mahumass. Kasutades erimassi määramisel standardi EN 12697-5 protseduuri A vees.

Samuti on Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhises kirjas, et asfaltsegude all mõistetakse EVS 901-3 nõuetele vastavaid asfaltbetoonseguisid.

Standardis EVS 901-3 on kirjas igale asfaltbetoonsegule esitatavad nõuded nii minimaalse kui ka maksimaalse poorsuse osas ehk V_{\min} ja V_{\max} . Tabelis 4.2 on näha, et kõikide AC base tüüpi segude minimaalseks poorsuseks on 4,0% ja maksimaalseks on 10,0%. [8], [9]

Tabel 4.2 AC base tüüpi segude poorsusnõuded standardis EVS 901-3 [8]

Parameeter	Segu mark		
	AC 16 base	AC 20 base	AC 32 base
Minimaalne poorsus, V_{\max}	4,0	4,0	4,0
Maksimaalne poorsus, V_{\max}	10,0	10,0	10,0

Kui jälgida Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhist ning kõiki eelnimetatud standardeid samm sammult, tuleks AC 32 base segu mahumasse määrata standardi EVS-EN 12697-6 meetodi D ehk mõõtmete põhise mahumassi järgi. Õige meetodi valik on oluline, et ei tekiks mahumassi ülehindamist ja poorsuse alahindamist mitte sobiva meetodi kasutamise tõttu. Lisaks on mahumass olulisel kohal deformatsioonikindluse lähteandmete hulgas – sellest oleneb deformatsioonikindluse katse proovikeha kogus. Õige kogus on oluline, et ei tekiks deformatsioonikindluse proovikeha valmistamisel selle ületihendamist võrreldes mahumassi proovikehadega, mis omakorda võib viia deformatsioonikindluse ülehindamiseni. [8], [9], [38], [35]

Asfaltsegu mahumassi mõju deformatsioonikindlusele esineb laboratoorsete katsetuste käigus. Nimelt tuleb deformatsioonikindluse katseks vajaminev kogus arvutada standardi EVS-EN 12697-33 järgi erimassi ja poorsuse alusel. Küll aga valemite vaadeldes, arvestades, et poorsus oleneb erimassist ja mahumassist, taanduvad koguse arvutamisel erimass ja poorsus ära ning vajalik on vaid mahumassi väärtus. [38]

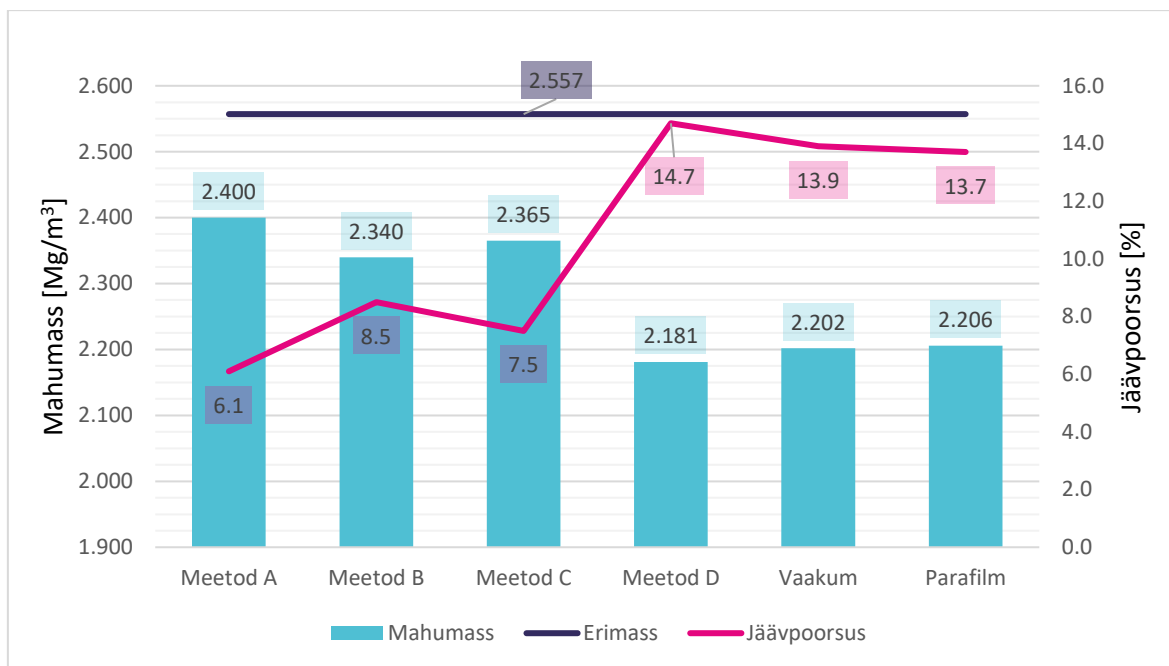
Deformatsioonikindluse katsekehade koguse arvutamiseks kasutatakse valemit (3.9) standardist EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022 ning segu jäävpoorsus (V) arvutatakse valemiga (3.8) standardist EVS-EN 12697-8:2018. Kui viime poorsuse valemisse sisse deformatsioonikindluse katsekoguse arvutamise valemisse, saame [37], [38]:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \left(\frac{100 - \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100}{100} \right) \quad (4.1)$$

Taandades valemit selgubki, et erimass taandub välja ning koguse arvutamisel saab otsustavaks faktoriks vaid segu mahumass:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_b \quad (4.2)$$

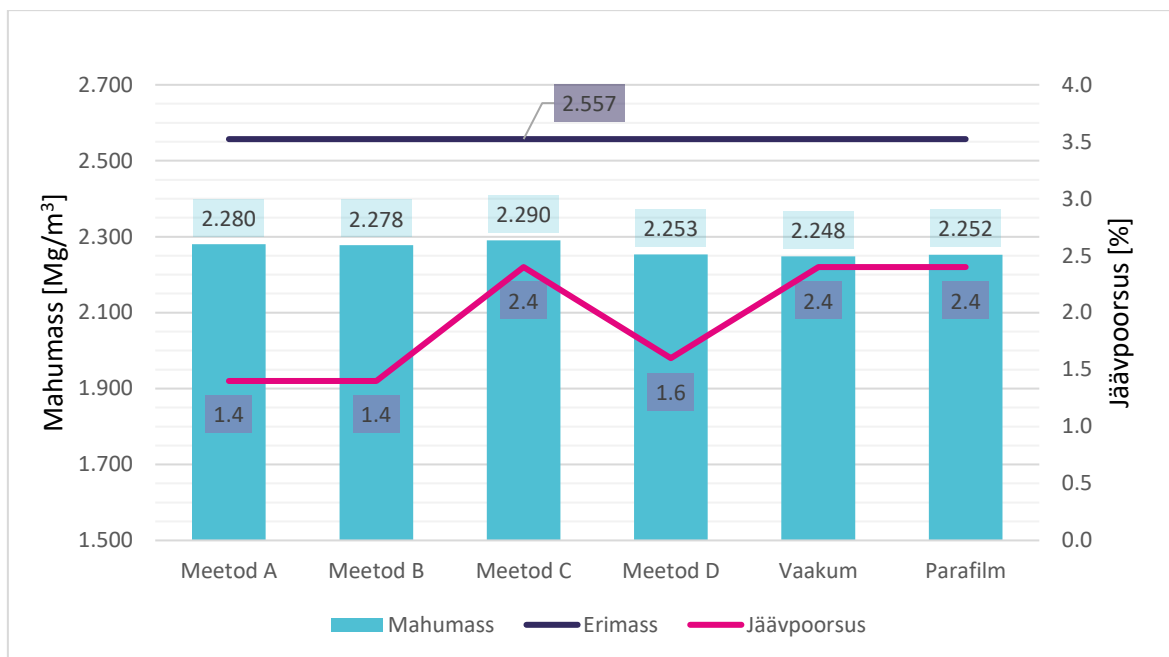
Jäävpoorsuse määramiseks kasutatakse erimassi määramisel alati sama meetodit, kuid valides eri meetodeid mahumassi määramiseks, siis selgub, et mahumass võib olenevalt segu tüübist ja mahumassi määramise meetodist erineda vähemal või rohkemal määral. See omakorda tähendab seda, et mahumassi määramise meetodi valiku mõju tuleb sisse ka jäävpoorsuse tulemuse osas. Joonisel 4.1 on näha 2023. aastal koostatud Alver Alliku magistritöö AC 32 base (GR) segu mahumassid eri meetoditega määramisel ning nende baasil saadud jäävpoorsused. Nimetatud töös uuriti mahumassi määramise erinevaid meetodikaid ja nende mõju segu jäävpoorsusele. Sama segu mahumassid saadi eri meetoditega vahemikus 2,181 Mg/m³ kuni 2,400 Mg/m³ ning jäävpoorsused olid vahemikus 6,1% kuni 14,7%. Jäävpoorsuse erinevus samale segule võib olla lausa 141%. Lisaks tuleb välja tuua, et eelnevalt mainitud valemis (4.2) koguse arvutamisel on teoreetiliselt korrutatud proovikeha mõõtmed segu mahumassiga. See tähendab, et deformatsioonikindluse proovikehad tihendatakse mõõtmete järgi, mis omakorda annab alust eeldada, et kõige lähedasema mahumassi ja jäävpoorsuse annab deformatsioonikindluse proovikehale kui alusandmeteks valmistatud proovikeha mahumass on samuti määratud mõõtmete põhised. Teisalt, valides erinevaid mahumassi meetodeid, saab tulemuseks erineva mahumassi, mille tõttu saab deformatsioonikindluse katseks vajamineva koguse ka erineva. See aga tihendatakse olenemata kogusest, siiski sama paksuse juurde. Erinev kogus segu sama ruumala juures mõjutab kindlasti poorsust, mis omakorda mõjutab deformatsioonikindlust. Antud nähtus võib viia selleni, et valides erinevaid mahumassi määramise meetodeid, võib laboratoorselt katsetades saada kas parema või halvema deformatsioonikindluse väärtuse kui segul, mis on objektile paigaldatud. [22], [41], [7]



Joonis 4.1 AC 32 base 70/100 (GR) mahumass ja jäävpoorsus A. Alliku magistratöös [7]

4.2 Mahumassi standardi EVS-EN 12697-6 meetodi B, C ja D võrdlus AC 32 base segu põhjal ning standardi analüüs

Ilmestamiseks, miks on oluline valida iga asfaltsegu puhul õige standardijärgne mahumassi määramise meetod vastavalt segu omadustele, määrati AC 32 base segule neljal erineval meetodil mahumass, peale mida võrreldi jäävpoorsuseid. Esmalt tuleks välja tuua, et õige mahumassi meetodi valik on oluline just poorsemate asfaltsegude puhul. Nagu peatükis 4.1 joonisel 4.1 on näha, võib A. Alliku magistratöö põhjal AC 32 base segu jäävpoorsus olla samal segul vahemikus 6,1% kuni 14,7%. Sama töö raames määrati ka AC 8 surf segule mahumassid ja jäävpoorsused eri meetoditega. Joonisel 4.2 on näha, et tihedatel segudel ei mõjuta jäävpoorsust mahumassi meetodi valik niivõrd palju – jäävpoorsused jäid vahemikku 1,4% kuni 2,4%. [7]



Joonis 4.2 AC 8 surf 70/100 mahumass ja jäävpoorsus A. Alliku magistritöös [7]

Kuna A. Alliku magistritöö C meetodi tulemuste osas tundus ebakõlasid olevat, määrati käesoleva magistritöö raames AC 32 base proovikehadele C meetodiga mahumass kahel erineval viisil – ühele seeriale määrati see järgides täpselt standardijärgset protseduuri ning teisele seeriale koos juhendajaga välja töötatud protseduuri järgi, mis erineb veidi standardist. Lisaks määrati mahumassid ka standardi EVS-EN 12697-6 meetodite B ja D järgi. Võrdlus tehti kahele erinevale AC 32 base segule – esimene oli 100% pae täitematerjaliga segu, teise asfaltsegu täitematerjali osas oli kasutatud pae ja graniidi segu. Mõlemale segule määrati kolm seeriat proovikehasid. Esimesele seeriale määrati mahumass D meetodiga ning seejärel B meetodiga. Teisele ja kolmandale seeriale määrati mahumass vastavalt standardijärgse C meetodiga ja juhendajaga välja töötatud C meetodiga.

Esmalt määrati mahumassid standardi EVS-EN 12697-6 meetodi D järgi ehk mõõtmete põhiselt, sest D meetodi puhul ei muutu proovikeha omadused kuidagi, s.t proovikehad ei saa märjaks nagu B meetodi puhul ning proovikehasid ei kaeta parafiinvahaga nagu C meetodi puhul. Mahumasside alusel saadud jäävpoorsused olid paega ning pae ja graniidiga segudel vastavalt 14,5% ja 14,7%.

Samadele seeriatele määrati seejärel mahumassid EVS-EN 12697-6 B meetodi järgi. Jäävpoorsused nende mahumasside põhjal saadi pae- ning pae- ja graniidisegul vastavalt 9,8% ja 9,2%. Siinkohal tuleb välja tuua, et proovikehasid veest välja võttes ning hakates määrama kuivatatud ja immutatud proovikeha massi, nõrgus proovikehast

vett välja, mida on näha joonisel 4.3. Kuna vesi hakkab proovikehast välja nõrguma peale selle veest välja võtmist veel enne, kui jõuti proovikeha pealispinda kuivatama hakata, ei ole võimalik fikseerida korrektset immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikeha kaalu. Antud nähtus on AC 32 base segude puhul B meetodiga mahumassi määramisel tavapärane. Järgides standardit, tuleks möötmine katkestada ning minna üle C meetodile. Ehk siis B meetodiga tulemust ei saaks standardi järgi õigeks lugeda.



Joonis 4.3 Immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikehast vee väljanõrgumine EVS-EN 12697-6 B meetodi kaalumise protsessis

Standardi EVS-EN 12697-6 järgi C meetodile üle minnes tuleks määrata esmalt kuiva proovikeha mass või teha see viimase sammuna. Kuna aga C meetodi puhul kaetakse proovikeha mass parafiinvahaga, ei ole võimalik seda sammu protseduuri lõppu jätta, seega tuleks proovikehad kuivatada. Lisaks ütleb standard, et proovikehad peavad olema kuivad, teadaoleva veesisaldusega või lastud kuivada püsiva massini. Kuigi standard mainib teadaoleva veesisaldusega proovikehasid, siis ei ole antud standardis juhtnööre, kuidas teadaolevat veesisaldust arvutustes arvestada ning seda ei kajastata üheski valemis. Püsiv mass on siis, kui kuivatamisel vähemalt ühetunnise vahega sooritatud järjestikused kaalumised ei erine rohkem kui 0,1%. Samas ei ütle standard midagi kuivatamise kohta, mis tingimustel ja kuidas seda tegema peaks. Ainult proovi käitlemise osas on öeldud, et proovikehasid tuleb hoiustada jahedas kohas temperatuuril alla 25°C. Järgides standardit jäeti proovikehad lauale kuivama. Esimesel

päeval kaaluti iga tunni aja tagant 8 tunni vältel ja edaspidi korra päevas. Tabelis 4.3 on näha, et laual seistes oli püsiv mass saavutatud juba peale teist tundi, kuigi proovikehas oli keskmiselt veel 54,0 g vett sees. Kui lugeda see püsiv mass kuivaks massiks, siis sel juhul uuesti B meetodiga määrates, tuleks jäävpoorsuseks 9,2% asemel 8,1%. Asetades proovikehad ventilaatori alla, oli massimuutus suurem ning püsiv mass saavutati alles 5 tunni pärast. Isegi siis oli proovikehas keskmiselt 38,2 g vett sees ja selle mahumassi põhjal tuli uueks jäävpoorsuseks 8,5%. Käesoleva magistritöö raames katsetatud segu puhul mõjutaks veesisaldusega proovikeha lugemine kuivaks massiks C meetodiga määrates mahumassi. Tabeli 4.3 viimases veerus on näha, mis oleks jäävpoorsus esialgse 9,2% (9,23%) asemel, kui lugeda veesisaldusega proovikeha mass kuivaks massiks. Tabelis olevad arvutused on tehtud B meetodi baasil. Proovikehade kuivaks saamine nii, et see enam jäävpoorsust ei mõjutanud, võttis aega 20 päeva, samal ajal oli proovikehades jätkuvalt keskmiselt 3,8 g vett sees. Kokku kaaluti proovikehasid kuu aja vältel ning viimase 3 päeva jooksul enam veekadu proovikehades ei olnud. Keskmiselt jäi proovikehadesse ikka 2,7 g vett sisse, mis annab jäävpoorsuse erinevuse esialgsega võrreldes 0,05%. Esimese tunni suurem veekadu proovikehast, 76,2 g juurest 58,2 g juurde, on tingitud asjaolust, et proovikehasid lauale asetades jätkus vee väljanõrgumine. [35]

Tabel 4.3 Vee väljanõrgumise kiirus peale EVS-EN 12697-6 B meetodi mahumassi

			Võttes veesisaldusega massi kuivaks massiks	
			Mahumass [Mg/m ³]	Jäävpoorsus [%]
			Keskmine	
	Vett sees [g]	Muutus tunnis/päevas		
	Keskmine	Keskmine		
Esiälgne	76.2	-	2.338	7.7
1h	58.2	0.40%	2.329	8.0
2h	54.0	0.09%	2.327	8.1 (8.13)
3h	45.7	0.18%	2.323	8.3
4h	41.0	0.10%	2.320	8.4
5h	38.2	0.06%	2.319	8.5 (8.45)
6h	35.4	0.06%	2.317	8.5
7h	33.4	0.04%	2.316	8.6
8h	31.6	0.04%	2.315	8.6
1 päev	25.8	0.13%	2.312	8.7
2 päev	20.0	0.13%	2.309	8.8
3 päev	16.5	0.08%	2.308	8.9

Tabel 4.3 järg 1 Vee väljanõrgumise kiirus peale EVS-EN 12697-6 B meetodi mahumassi

			Võttes veesisaldusega massi kuivaks massiks	
	Vett sees [g]	Muutus tunnis/päevas	Mahumass [Mg/m ³]	Jäävpoorsus [%]
	Keskmine	Keskmine	Keskmine	
4 päev	15.3	0.03%	2.307	8.9
5 päev	13.0	0.05%	2.306	9.0
6 päev	11.6	0.03%	2.305	9.0
7 päev	10.4	0.03%	2.305	9.0
8 päev	9.4	0.02%	2.304	9.0
9 päev	8.6	0.02%	2.304	9.1
10 päev	7.8	0.02%	2.303	9.1
11 päev	7.3	0.01%	2.303	9.1
12 päev	6.8	0.01%	2.303	9.1
13 päev	6.3	0.01%	2.302	9.1
14 päev	5.8	0.01%	2.302	9.1
15 päev	5.5	0.01%	2.302	9.1
16 päev	5.0	0.01%	2.302	9.1
17 päev	4.7	0.01%	2.302	9.1
18 päev	4.5	0.00%	2.302	9.1
19 päev	4.2	0.01%	2.301	9.1
20 päev	3.8	0.01%	2.301	9.2 (9.15)
21 päev	3.6	0.01%	2.301	9.2
22 päev	3.4	0.00%	2.301	9.2
23 päev	3.3	0.00%	2.301	9.2
24 päev	3.1	0.00%	2.301	9.2
25 päev	3.0	0.00%	2.301	9.2
26 päev	3.0	0.00%	2.301	9.2
27 päev	2.9	0.00%	2.301	9.2
28 päev	2.8	0.00%	2.301	9.2
29 päev	2.7	0.00%	2.301	9.2
30 päev	2.7	0.00%	2.301	9.2
31 päev	2.7	0.00%	2.301	9.2 (9.18)

Muutus
päevas

Teisele proovikehade seeriale määrati mahumass standardi EVS-EN 12697-6 C meetodi järgi. Mahumasside alusel saadud poorsused saadi pae ning pae ja graniidi segule

vastavalt 9,0% ja 7,8%. Mõlema segu jäävpoorsused on B meetodi mahumassiga saadud jäävpoorsustest väiksemad, vastavalt 0,8% ja 1,4%. Samuti on joonisel 4.1 näha, et A. Alliku magistritöös tuli suurusjärgus sama erinevus, C meetodi alusel tuli 1,0% väiksem jäävpoorsus. C ja B meetodi võrdlusele tekib aga vastuolu. Kuna B meetodiga määramisel nõrgus vett pooridest välja, mis viis jäävpoorsuse alahindamiseni, siis C meetodiga peaks teoreetiliselt standardijärgse protseduuriga tulema suurem jäävpoorsus. C meetodi puhul kaetakse proovikeha parafiinvahaga ning see peaks katma ja võtma arvesse ka need poorid, kust B meetodi puhul nõrgus vesi välja. Siinkohal võib järeldada nähtust, mille eest ka standardi EVS-EN 12697-6 Lisa A hoiatab, et C meetodi puhul, võib parafiinvaha sattuda ka proovikeha sisemistesse pooridesse, mis viib proovikeha jäävpoorsuse alahindamiseni. Selleks, et näha, mis juhtub proovikeha sees peale parafiinvahaga katmist lisati parafiinvaha hulka punast pigmenti ning peale mahumassi määramist saeti proovikeha pooleks. Joonisel 4.4 on näha parafiinvahaga kaetud ja katmata proovikehad. [35]



Joonis 4.4 Parafiinvahaga katmata ja kaetud AC 32 base proovikeha

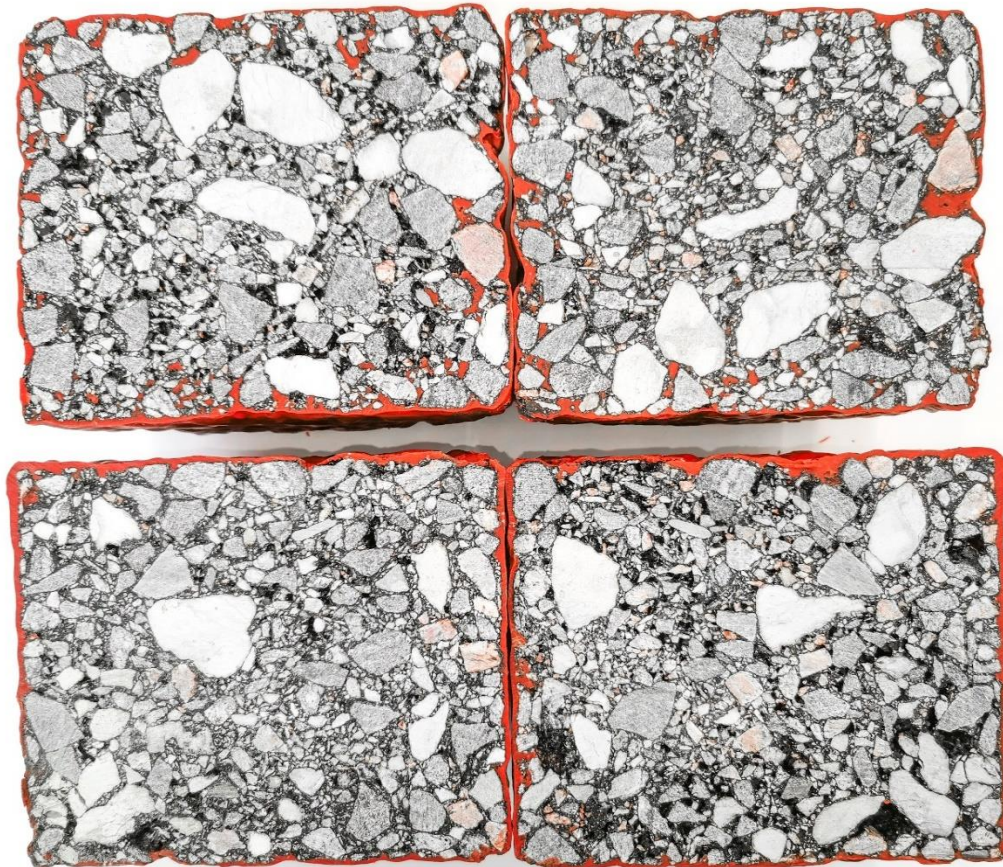
Viimaste proovikehade seeriade puhul kaeti proovikehad parafiinvahaga mitte standardijärgse C meetodiga. Meetod sai välja töötatud koos juhendajaga käesoleva magistritöö raames. Selle meetodi puhul ei kastetud ega ergutatud proovikehasid parafiinvaha sisse nagu standard nõuab, vaid kasteti napilt vaid proovikeha pealispind parafiinvaha sisse. Jäävpoorsuse tulemused tulid paega- ning pae- ja graniidiga proovikehadel vastavalt 10,7% ja 9,6%. Mõlema segu puhul on sarnane erinevus standardijärgse C meetodiga – jäävpoorsus on suurem vastavalt 1,7% ja 1,8% ning B meetodist on suuremad 0,9% ja 0,4%. Ka selle meetodi puhul kasutati punase

pigmendiga parafiinvaha ning peale mahumassi määramist vaadati, mis on juhtunud proovikeha sees. See on näha joonisel 4.5. Käesoleva magistritöö raames välja töötatud meetodi puhul on oht, et AC 32 base proovikehadel võivad olla sügavad pinnapoorid ning kastes parafiinvaha sisse vaid proovikeha pealispinna, ei pruugi vaha sügavamaid pinnapoore ära katta. See aga võib viia ohuni, kus vees kaaludes pääseb vesi katmata pooridest proovikeha sisse. See on ohuks juhul kui kasutada standardijärgset mahumassi C meetodi valemit (3.7). Et see oht elimineerida, sai juhendaja Kristjan Lille suure abiga välja töötatud valem, mis suudaks proovikehasse imunud vee maha arvestada. Valemeid (3.6) ja (3.7) kombineerides sai välja töötatud järgnev valem:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_4 - m_3)/\rho_w - (m_2 - m_1)/\rho_{sm}} \quad (4.3)$$

- 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),
- m_4 on hermetiseeritud proovikeha mass grammides peale vees kaalumist (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).

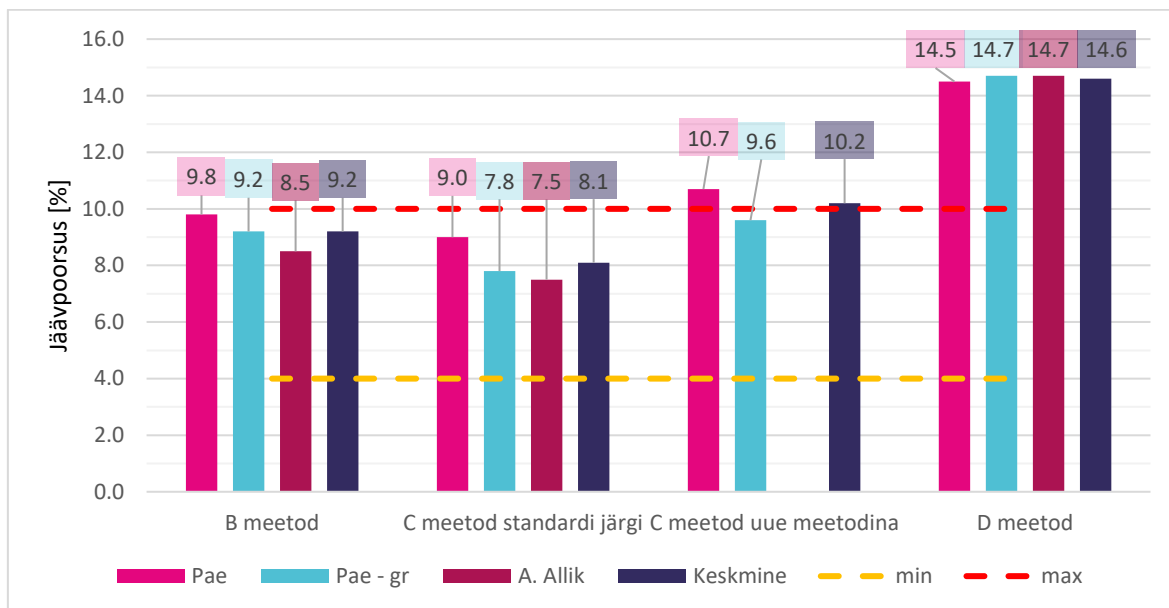
Ära tuleb märkida, et nimetatud valem toimib sel juhul, kui proovikehasse jääb mõni avatud pinnapoor ning kõik sisse imunud vesi jääb proovikehasse ka peale selle veest välja võtmist, s.t et ei hakka toimuma vee väljanõrgumist. Välja töötatud valem (4.3) on universaalne ka selles osas, et kui proovikeha ei ima vett sisse ja kõik pinnapoorid saavad kaetud, siis m_4 on sama väärtusega nagu m_2 ja valem annab sama tulemuse nagu standardijärgne mahumassi C meetodi valem (3.7).



Joonis 4.5 EVS-EN 12697 standardijärgse C meetodiga proovikeha (ülemine) ning mittestandardijärgse meetodiga (alumine) proovikeha

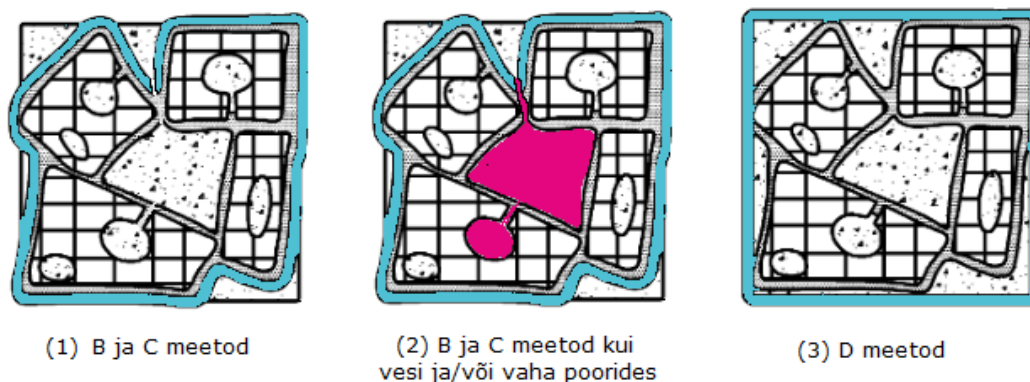
Joonisel 4.5 on ülemine proovikeha kaetud parafiinvahaga järgides täpselt standardi EVS-EN 12697-6 C meetodit ning alumine proovikeha on kaetud nii, et sisse on kastetud napilt vaid proovikeha pealispind. Standardijärgse meetodiga kastmise puhul on selgelt näha olukord, mille eest ka standard ise hoiatab, et parafiinvaha on sattunud sisemistesse pooridesse. Antud mahumassi meetodiga saadud jäävpoorsust ei saaks selles olukorras kindlasti korrektseks lugeda, kuna pooride osana ei arvestata seda osa, kus joonisel 4.5 on näha punast parafiinvaha. Joonisel 4.5 alumise proovikeha sees on punast parafiinvaha aga näha üksikutes kohtades ning antud tulemuse saab kindlasti korrektsemaks lugeda.

Kõikide meetodite jäävpoorsuste andmed koos A. Alliku magistritöö AC 32 base jäävpoorsustega ning EVS 901-3 minimaalse ja maksimaalse jäävpoorsuse nõudega on joonisel 4.6. Jooniselt on näha, et kõikide segude D meetod on üle standardis lubatud maksimaalse piiri.



Joonis 4.6 AC 32 base proovikehade jäävpoorsused eri mahumassi meetodite alusel

D meetodi alusel oluliselt üle maksimaalse piiri saadud jäävpoorsus on tingitud asjaolust, et EVS 901-3 jäävpoorsuse nõuded on ajalooliselt lähtunud mahumassi B meetodist ning ei ole arvestatud, et teatud tüüpi segudele määratakse mahumass mõne teise meetodiga. Saamaks aru, miks tuleb D meetodiga võrreldes teistega niivõrd palju suurem jäävpoorsus, on oluline vaadata standardi EVS-EN 12697-6 lisa A, mis selgitab proovikeha mõõdetud mahu piire eri meetoditega.



Joonis 4.7 Proovikeha mõõdetud mahu piirid [35]

Joonisel 4.7 on näha, kuidas arvestatakse proovikeha mahu piire eri mahumassi meetoditega standardi EVS-EN 12697-6 järgi. Joonisel 4.7 (1) on näidatud mahumassi B ja C meetodiga saadud proovikeha mahu piirid. Sel juhul ei võeta arvesse proovikeha pinnapoore. Küll Aga AC 32 base segu puhul on poori käigud niivõrd sügavad, et vee

väljanõrgumine toimub mahumassi B meetodi puhul ka sisemistest pooridest, s.t et võib tekkida olukord, kus joonisel 4.7 (2) ei arvestata ka roosa alaga märgitud poori proovikeha poori osana, kuna vesi on välja nõrgunud sealt. Sarnane nähtus on ka mahumassi C meetodiga, s.t sealt kust, B meetodiga nõrgub vesi välja, saab ka C meetodiga parafiinvaha sisse tungida ning jällegi ei arvestata neid pooridena. Parafiinvaha proovikeha sissetungimist on näha ka joonisel 4.5. Joonisel 4.7 (3) on näha, kuidas standardi EVS-EN 12697-6 meetodi D järgi arvestatakse proovikeha piire. Lisaks sellele, et võetakse arvesse kõik proovikeha sisemised poorid, arvestatakse proovikeha mahu sisse ka proovikeha pinnapoorid. See on ka põhjus, miks mahumassi D meetodi alusel saadud jäävpoorsused on niivõrd palju suuremad teiste meetoditega võrreldes. Et mahumassi D meetodit laborites rakendada hakata, tuleks ka EVS 901-3 jäävpoorsuse nõuded ümber korrigeerida vastavalt mahumassi määramise meetodist.

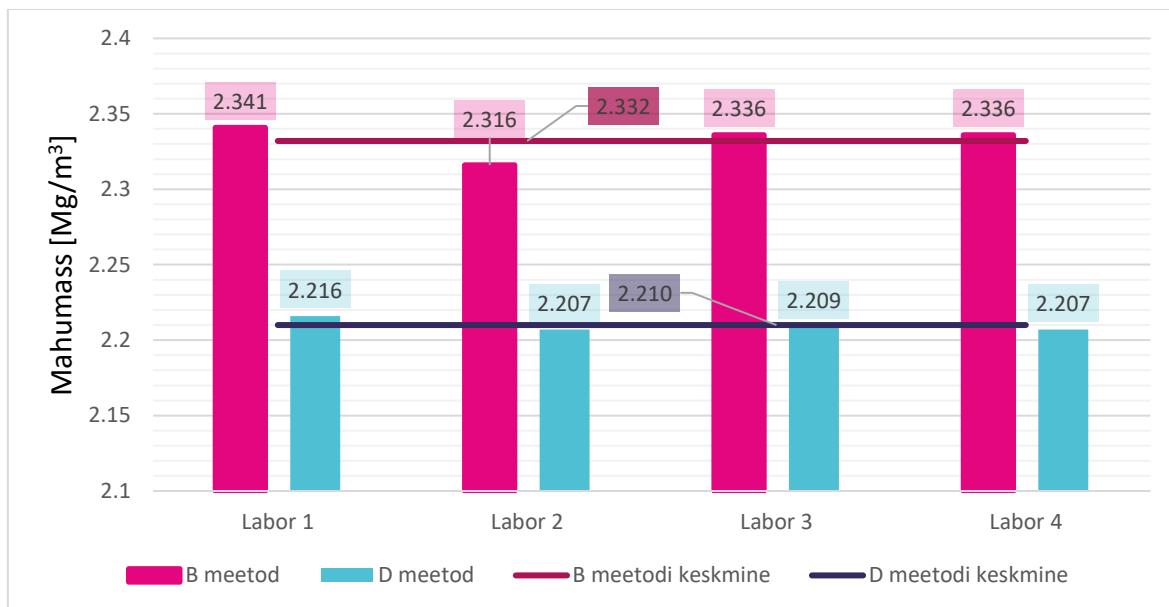
4.3 Deformatsioonikindluse tulemuse sõltuvus mahumassi standardi EVS-EN 12697-6 meetodi B ja D erinevusest

4.3.1 Katsekäigu lühikirjeldus

Uurimaks, kuidas mõjutab deformatsioonikindluse tulemust ettevalmistava katse standardi EVS-EN 12697-6 erineva meetodi valik, kasutati nelja Eestis asuva labori võrdlust. Esimese asjana määrati Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis asfaltsegu erimass standardi EVS-EN 12697-5 meetodi A järgi, mille väärtus anti kõigile neljale laborile. Selle põhjal sai arvutada mahumassi määramiseks vajalike proovikehade valmistamise koguse standardi EVS-EN 12697-31 järgi. Proovikehad valmistas iga labor ise güraatortihendajaga ning 60 pöördega. Edasi määrasid kõik laborid proovikehade mahumassid standardi EVS-EN 12697-6 nii meetodi B kui ka D järgi. Nende põhjal sai arvutada deformatsioonikindluse katseks vajalike proovikehade tihendamiseks vajamineva koguse standardi EVS-EN 12697-33 järgi. Kogused arvutati nii B kui ka D meetodi järgi saadud mahumasside alusel. Kolm laborit valmistasid kaks komplekti deformatsioonikindluse katse proovikehasid. Labor 4 valmistas proovikehad vaid meetodi D mahumassi alusel, kuna see labor teostab juba praegu AC 32 base segude deformatsioonikindlust võttes aluseks D meetodi mahumassi. Seejärel määrati deformatsioonikindluse proovikehadele mahumass standardi EVS-EN 12697-6 B ja D meetodi järgi. Viimaseks määrasid laborid deformatsioonikindluse standardi EVS-EN 12697-22 B meetodi väikese seadmega 50°C juures. Lisaks arvutati kõikidele katsekehadele poorsused standardi EVS-EN 12697-8 järgi.

4.3.2 Mahumass güraatoritihendajaga proovikehadel

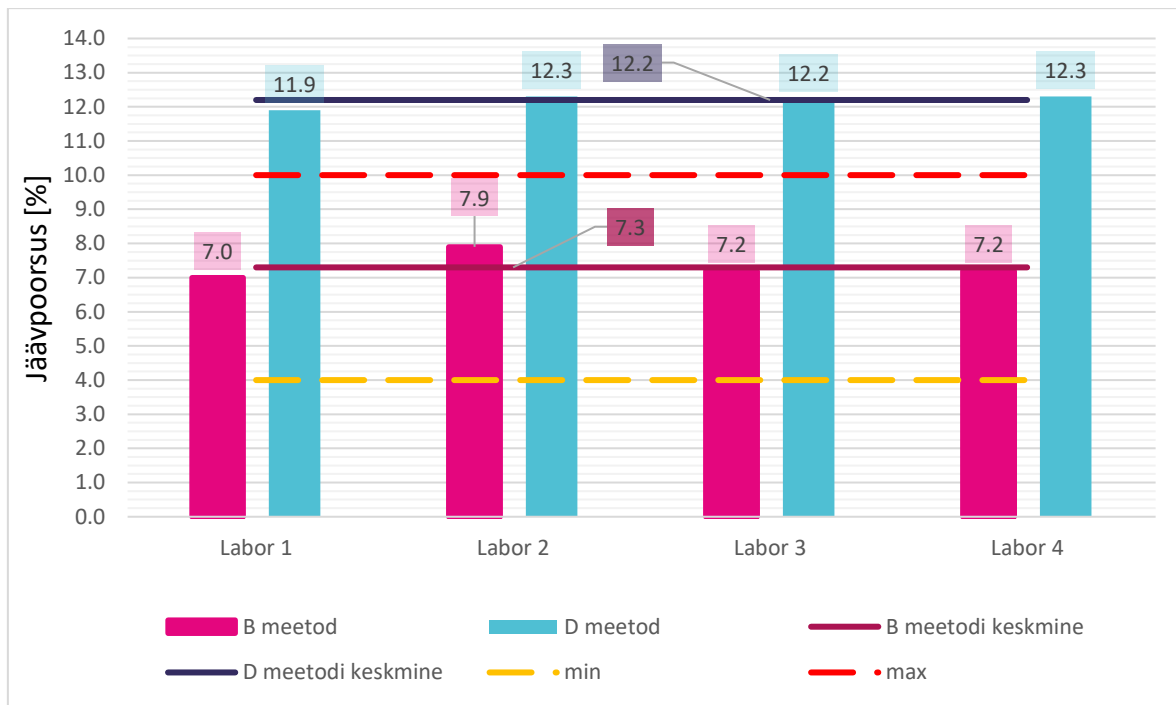
Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis määratud erimassi tulemuseks saadi 2,514 Mg/m³. Kõik laborid said selle põhjal arvutada güraatoritihendajaga proovikeha tihendamiseks vajamineva koguse ning valemi (3.3) järgi tuli see 4442,6 g.



Joonis 4.8 Güraatoritihendajaga valmistatud proovikehade mahumassid

Joonisel 4.8 on näha kõigi nelja labori mahumasside võrdlus. Graafikut vaadeldes on näha, et sama meetodiga määratud mahumassid on erinevates laborites üsna sarnased tulnud. EVS-EN 12697-6 meetodiga B määratud mahumassid jäävad vahemikku 2,316 Mg/m³ kuni 2,341 Mg/m³. Kõige rohkem erineb laboris 2 määratud mahumass, milleks on 2,316 Mg/m³ ja mis erineb keskmisest 0,016 Mg/m³. Teiste laborite erinevused keskmisega jäävad piiridesse 0,004 Mg/m³ kuni 0,009 Mg/m³. Meetodiga D määratud mahumassid on laborite vahel veel ühtlasemad. Tulemused jäävad vahemikku 2,207 Mg/m³ kuni 2,216 Mg/m³ ning laborite keskmine on 2,210 Mg/m³. Kõige suurem erinevus on tulnud laboris 1, kus tulemus on saadud 0,006 Mg/m³ keskmisest suurem. Teiste laborite erinevused keskmisega on 0,001 Mg/m³ kuni 0,002 Mg/m³.

4.3.3 Jäävpoorsus güraatoritihendajaga proovikehadel



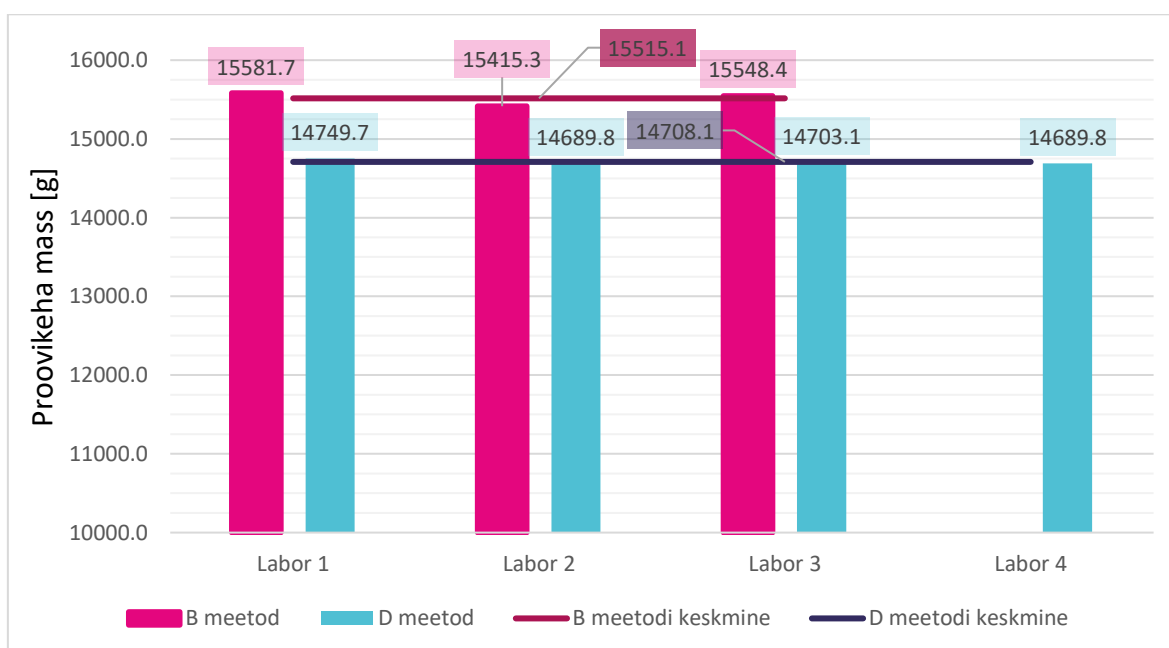
Joonis 4.9 Güraatoritihendajaga valmistatud proovikehade jäävpoorsused koos standardis EVS 901-3 olevate nõuetega

Joonisel 4.9 on etteantud erimassi ning kõigist laboritest saadud mahumasside põhjal arvutatud jäävpoorsused nii mahumassi B kui ka D meetodi põhjal standardi EVS-EN 12697-8 alusel valemiga (3.8). Kuna jäävpoorsus on sõltuvuses mahumassist, on laborite vaheline sarnasuse tendents jäävpoorsuse osas sama nagu oli mahumasside puhul. D meetodi põhiste mahumasside alusel saadud jäävpoorsused on ühtlasemad ning jäävad vahemikku 11,9% kuni 12,3%, keskmine on 12,2%. B meetodi põhiste mahumasside alusel saadud jäävpoorsused on suurema erinevusega ning kõige kõrgema ja madalama väärtuse erinevus on 0,9 protsendipunkti ehk 12,8%. Madalaim tulemus on 7,0% ja kõrgeim on 7,9% - keskmine on 7,3%. Laborite võrdlusel sama meetodi osas ei ole väga suuri erinevusi, kuid meetodite omavahelisel võrdlusel on päris suur erinevus. B ja D meetodite keskmiste vahe on 4,9 protsendipunkti ehk 67,1%.

Lisaks on joonisele lisatud AC 32 base segu minimaalne ja maksimaalne jäävpoorsuse nõue standardist EVS 901-3. Minimaalne on 4,0% ja maksimaalne on 10,0%. Jooniselt on näha, et kõikidest laboritest D meetoditega määratud mahumassi alusel proovikehade jäävpoorsused on üle standardis lubatud maksimumi. Teisalt mahumassi B meetodi alusel saadud proovikehade jäävpoorsused jäävad nõuete piiridesse. Siinkohal tuleb välja tuua B meetodi puhul esinev nähtus, mis on näidatud joonisel 4.3: immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikehadest nõrgus ka kaaludes vett välja. Antud

nähtus viib standardi EVS-EN 12697-6 lisa A põhjal proovikeha mahumassi ülehindamiseni ning proovikeha jäävpoorsuse alahindamiseni. Standardi järgi oleks tulnud selles olukorras katkestada mõõtmine B meetodi alusel ning valida sobivam meetod. See võib olla ka põhjus miks B meetodi tulemused on ebaühtlasemad – mahumass olenes asjaolust, kui palju iga labor sisemistest pooridest vett välja nõrguda lasi ning mis hetkel immutatud ja kuivatatud proovikeha mass täpselt fikseeriti. [8], [35]

4.3.4 Deformatsioonikindluse proovikehade valmistamine



Joonis 4.10 Deformatsioonikindluse katseks vajalike katsekehade kogused

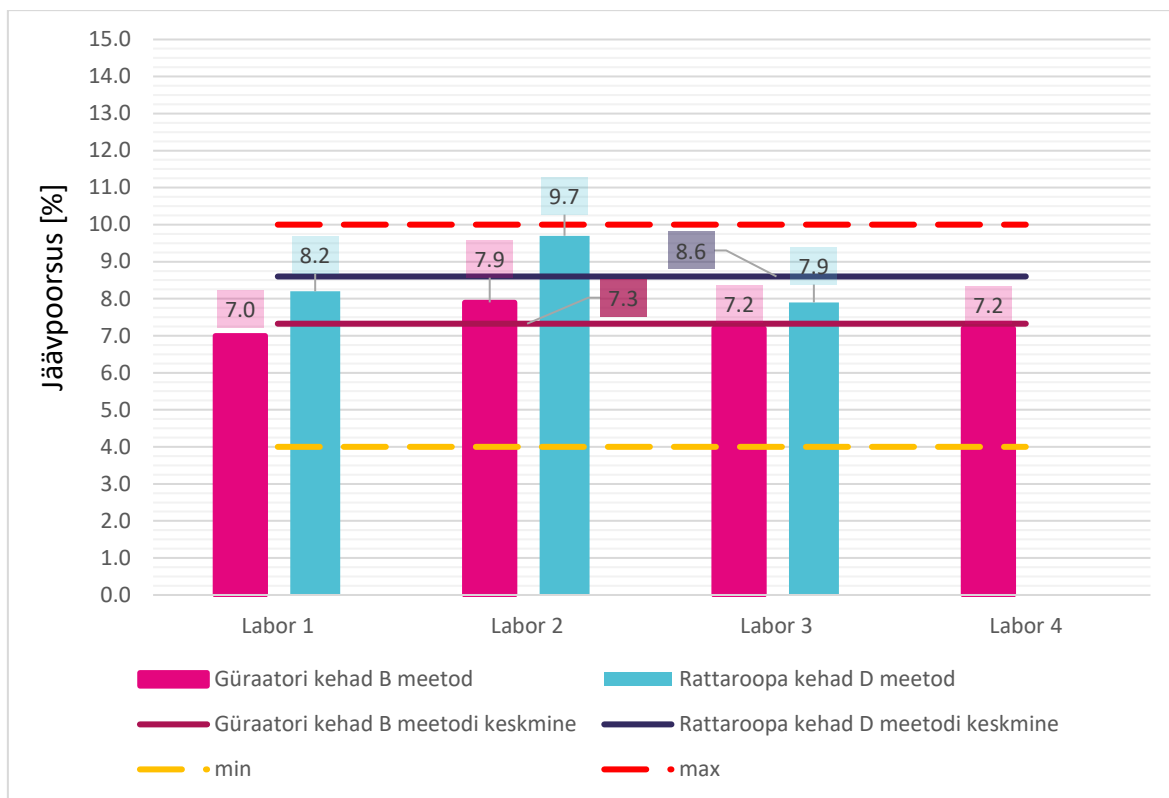
Joonisel 4.10 on näha, et võttes aluseks mahumassi B meetodi, tuleb katsekogus suurem kui D meetodiga. Võttes aluseks B meetodi, oli keskmine proovikeha valmistamise mass valemiga (3.9) 15515,1 g ning D meetodi puhul 14708,1 g. B meetodiga tihendati keskmiselt sama ruumala juurde 807 g ehk 5,5% rohkem asfaltsegu. Joonisel 4.11 on visuaalselt näha kogus, mis kasutades B meetodit, täidab ära ruumala proovikehas, mis D meetodi puhul jääks pooride osaks.



Joonis 4.11 Deformatsioonikindluse katsekehade massierinevus võttes aluseks eri meetodite mahumassid

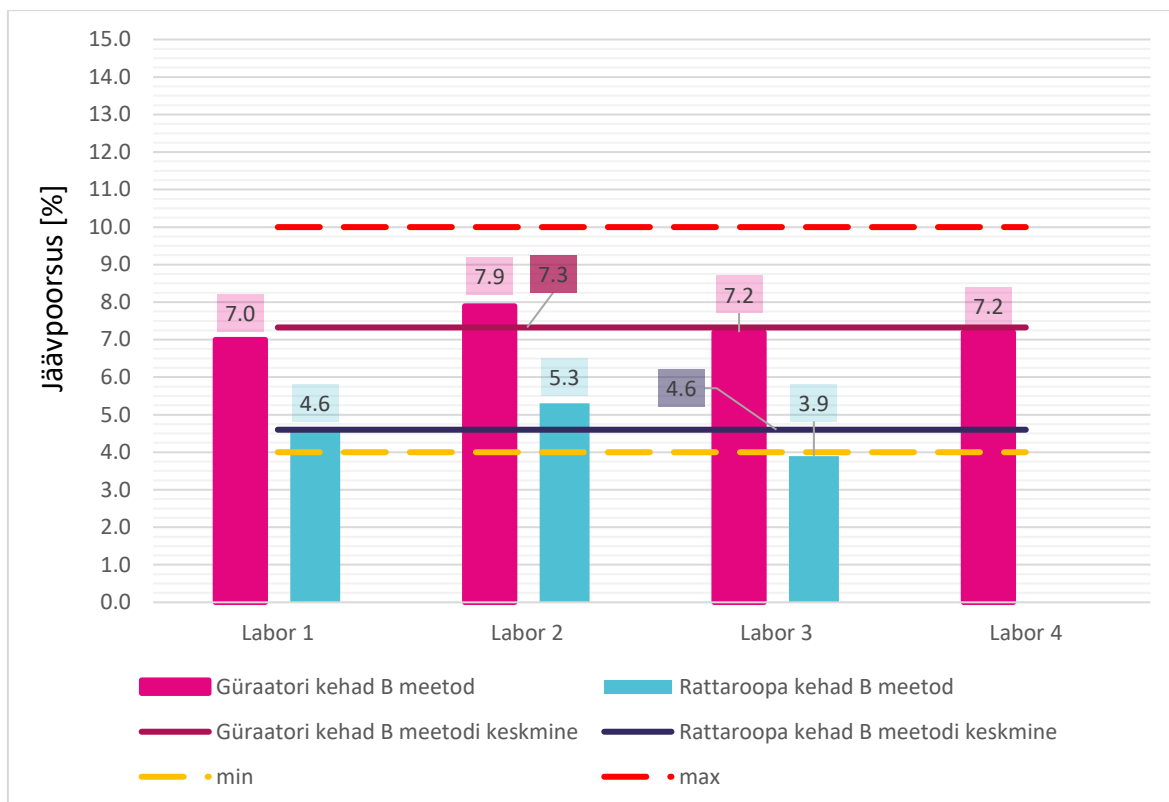
4.3.5 Deformatsioonikindluse proovikehade jäävpoorsus

Peale deformatsioonikindluse proovikehade valmistamist määrati neile mahumassid. D meetodi ehk mõõtmepõhise mahumassi määrasid kõik neli laborit ise enne deformatsioonikindluse katset. Kuna B meetodi puhul saavad proovikehad märjaks, siis B meetodi järgne mahumass määrati peale deformatsioonikindluse katset ning see määrati kõikide laborite proovikehadele Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Eesmärk peaks olema saada deformatsioonikindluse katseks tihendatavad proovikehad võimalikult sarnase jäävpoorsuse juurde kui algandmeteks vajaminevatel güraatoriga tihendatud proovikehadel on saadud. Järgnevalt on võrreldud deformatsioonikindluse proovikehade jäävpoorsusi güraatoriga tihendatud proovikehade jäävpoorsustega.



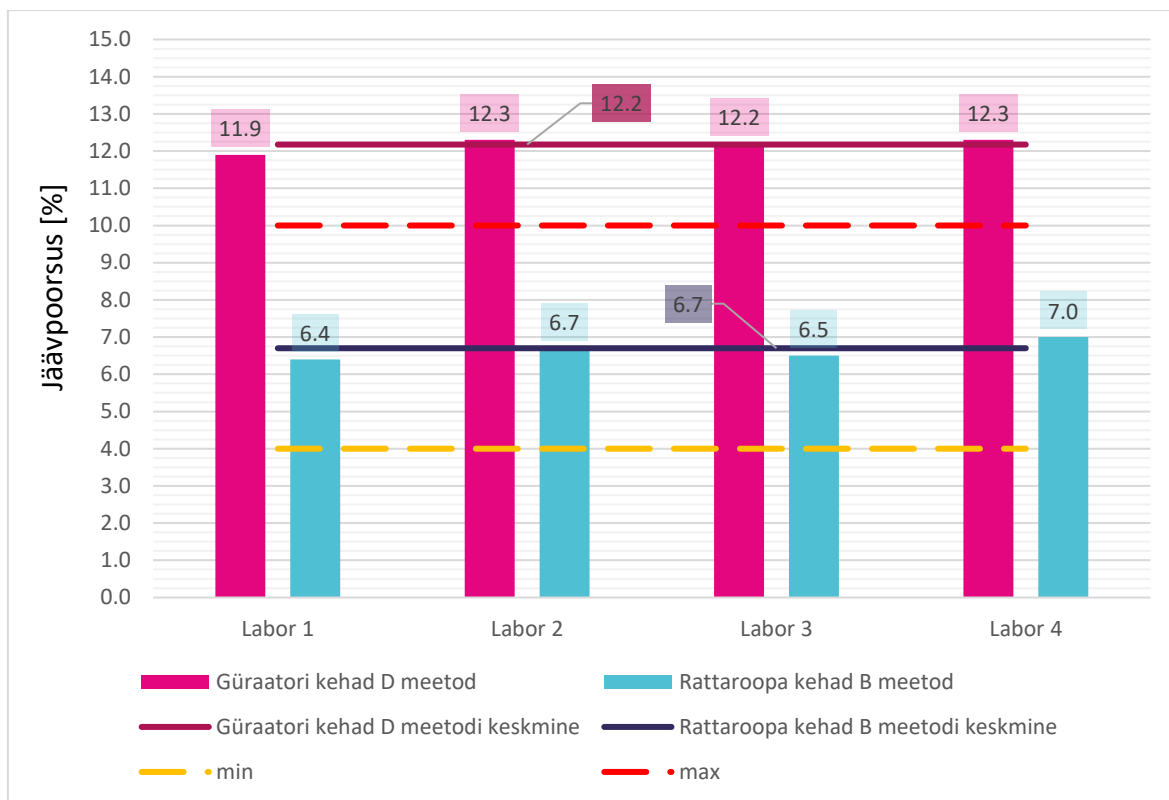
Joonis 4.12 Deformatsioonikindluse kehade D meetodi mahumassiga jäävpoorsused tihendatuna güraatori kehade B meetodi mahumassi alusel koos standardi EVS 901-3 olevate jäävpoorsuste nõuetega

Esimesena on välja toodud praegu kõige tavapärasema katsekäigu näide, kus güraatoriga valmistatud kehadele määratakse B meetodiga mahumass ning see võetakse aluseks deformatsioonikindluse kehade valmistamisel. Deformatsioonikindluse kehadele määratakse mahumass D meetodiga. Joonisel 4.12 on näha justkui deformatsioonikindluse katse proovikehad jäävad poorsemad kui güraatoriga valmistatud proovikehad. Güraatoriga valmistatud proovikehade keskmine jäävpoorsus on 7,3% ja deformatsioonikindluse kehade keskmine jäävpoorsus on 8,6%. Erinevus on 17,8%. Nagu mainitud peatüki 4.3.1 alguses, siis labor 4 ei valmistanud güraatori kehade B meetodi mahumassi alusandmetega deformatsioonikindluse katsekehasid. Tulemuste paremaks võrdluseks, tuleks vaadelda sama meetodiga määratud mahumasse ehk ka deformatsioonikindluse kehadele määrata mahumass B meetodiga.



Joonis 4.13 Deformatsioonikindluse kehade B meetodi mahumassiga jäävpoorsused tihendatuna güraatori kehade B meetodi mahumassi alusel koos standardi EVS 901-3 olevate jäävpoorsuste nõuetega

Joonisel 4.13 on kajastatud samad katsekehad, kuid deformatsioonikindluse kehadele on mahumass määratud D meetodi asemel B meetodiga. Keskmiselt on tulemuseks 46,5% võrra madalam jäävpoorsus, 8,6% asemel 4,6%, ning on näha, et labori 3 katsekeha jääb isegi standardis nõutud miinimum poorsusest alla. Miinimum nõue AC 32 base segule on 4,0% ja labor 3 on saanud 3,9%. Güraatoriga tihendatud ja deformatsioonikindluse katsekehade jäävpoorsuse erinevus on 37,0%. Kui D meetodi puhul olid deformatsioonikindluse katsekehad D meetodiga määratud mahumassi alusel poorsemad kui güraatoriga tihendatud kehad, siis B meetodiga on see vastupidi: güraatoriga tihendatud kehad kajastuvad poorsematena. Alla miinimumnõude saadud jäävpoorsus on märk segu ületihendamisest. [8]



Joonis 4.14 Deformatsioonikindluse kehad D meetodi mahumassiga jäävpoorsused tihendatuna güraatori kehad B meetodi mahumassi alusel koos standardi EVS 901-3 olevate jäävpoorsuste nõuetega

Teise võrdlusemomendi puhul määrati güraatoriga tihendatud proovikehadele mahumass D meetodiga ning võeti see aluseks deformatsioonikindluse katsekehade valmistamisel. Joonisel 4.14 on näha, et güraatoriga tihendatud kehad jäävpoorsus on nüüd 12,2% varasema 7,3% asemel. See on näha joonisel 4.12 ja joonisel 4.13. Deformatsioonikindluse katsekehade keskmine mahumass B meetodiga on 6,7%. Güraatoriga tihendatud ja deformatsioonikindluse katsekehade jäävpoorsuse erinevus on 45,1%. Tulemuste võrdlemiseks tuleks vaadelda sama meetodiga määratud mahumasse ehk ka deformatsioonikindluse kehasid mahumassi D meetodi baasil.



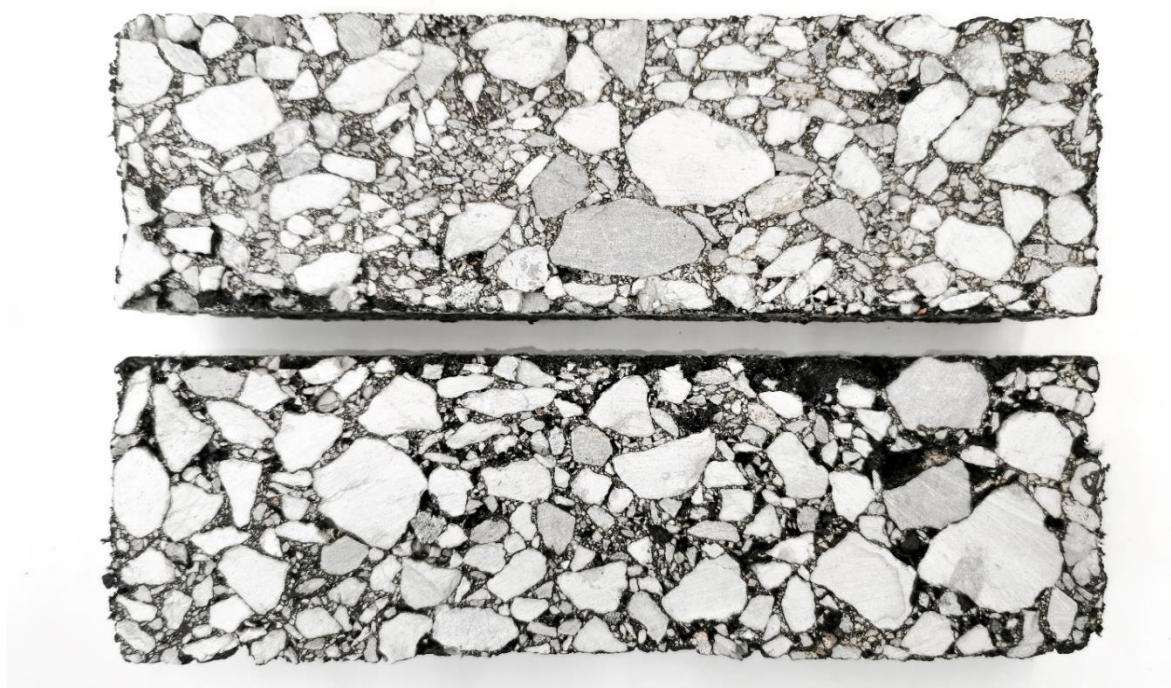
Joonis 4.15 Deformatsioonikindluse kehade D meetodi mahumassiga jäävpoorsused tihendatuna güraatori kehade D meetodi mahumassi alusel koos standardi EVS 901-3 olevate jäävpoorsuste nõuetega

Joonisel 4.15 on jäävpoorsused, kus güraatoriga tihendatud kehadele on mahumass määratud D meetodiga ja see on aluseks võetud deformatsioonikindluse kehade valmistamisel. Deformatsioonikindluse kehadele määrati mahumass sama meetodiga ehk D meetodiga. Güraatori kehade jäävpoorsus on 12,2% ning deformatsioonikindluse kehade jäävpoorsus on 12,7%. Erinevus jäävpoorsuse osas on vaid 0,5 protsendipunkti. Kui varasema kolme võrdluse baasil olid güraatoriga tihendatud ja deformatsioonikindluse katsekehade jäävpoorsuse erinevused vastavalt 17,8%, 37,0% ja 45,1%, siis viimase võrdluse baasil on erinevus vaid 4,1%. Antud meetod on nende nelja võrdlusmomendi baasil kõige ühtlasem: deformatsioonikindluse kehadele on saavutatud ligilähedaselt sarnane poorsusomadus nagu on güraatoriga tihendatud kehadel ning see on ka eesmärk. Labor 1 on saavutanud nii güraatoriga tihendatud kehadele kui ka deformatsioonikindluse katsekehadele identse jäävpoorsuse – mõlemal juhul on see 11,9%.

Üheks saavutatud sarnaste jäävpoorsuste põhjuseks võib välja tuua deformatsioonikindluse proovikeha koguse arvutusvalemi (3.9) ja deformatsioonikindluse katsekehade tihendamise protseduuri. Kuna valemis (3.9) on arvutustes sees proovikeha pikkus, laius ja paksus, siis see tähendab seda, et

tihendamine toimub mõõtmete põhiselt tihendusvormis, s.t eelduslikult peabki kõige lähedasema tulemuse andma mõõtetepõhiselt määratud mahumassi alusandmed. Teise aspektina saab välja tuua mahumassi meetodite B ja D erinevused, mida on pikemalt analüüsitud peatükis 4.2 ning mille erinevused on näha joonisel 4.7.

Samuti tuleb deformatsioonikindluse katsekehade poorsuse erinevus esile ilmekalt visuaalsel vaatlusel. Laboris 1 saeti nii B kui ka D meetodi mahumassi alusandmetega tihendatud deformatsioonikindluse katsekehadest välja ristlõiked peale nende tihendamist. Joonisel 4.16 ülemine ristlõige on deformatsioonikindluse kehadest, mille alusandmeteks on võetud B meetodi mahumass, ja alumisel D meetodi mahumass. Ülemisel ristlõikel leiab visuaalselt väga vähe poore, mis ei ole AC 32 base segu puhul tavapärane, samal ajal kui alumisel on poorid selgelt näha. Ülemise puhul on materjal juba nii kokku surutud, et ei lase enam materjali osakestel liikuda ja ümber paigutada. See annab katsekehale potentsiaalselt parema deformatsioonikindluse, kuid mis seejuures ei pruugi olla võrreldav objektile paigaldatud asfaltkatte deformatsioonikindlusega.

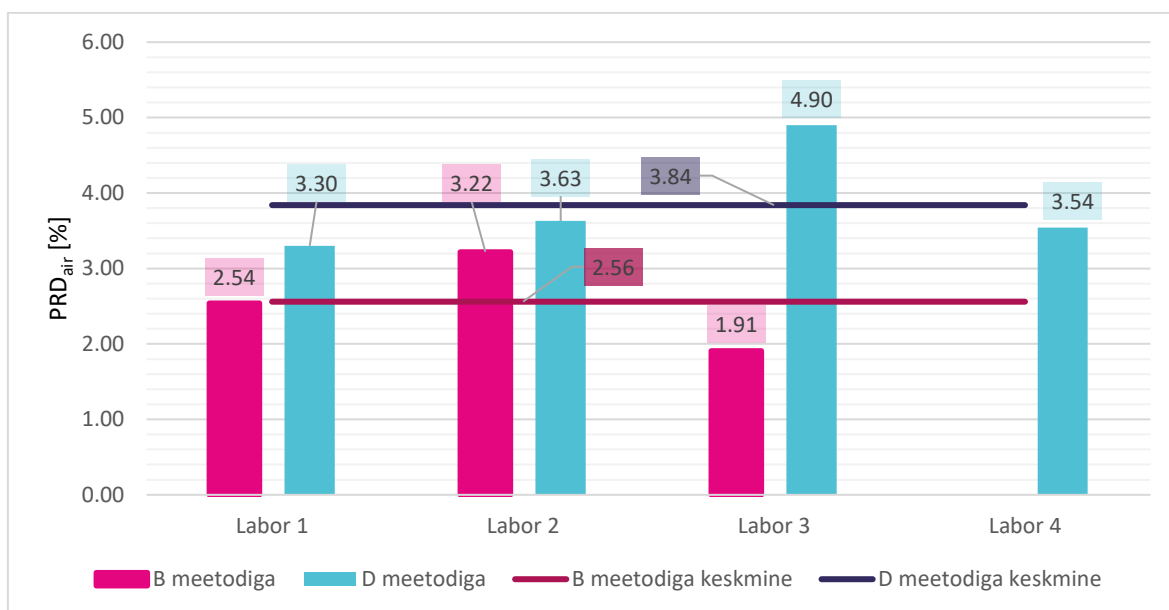


Joonis 4.16 Deformatsioonikindluse katsekehade ristlõiked tihendatuna B (ülemine) ja D (alumine) meetodi mahumassi alusandmetega

4.3.6 Deformatsioonikindluse katse tulemused

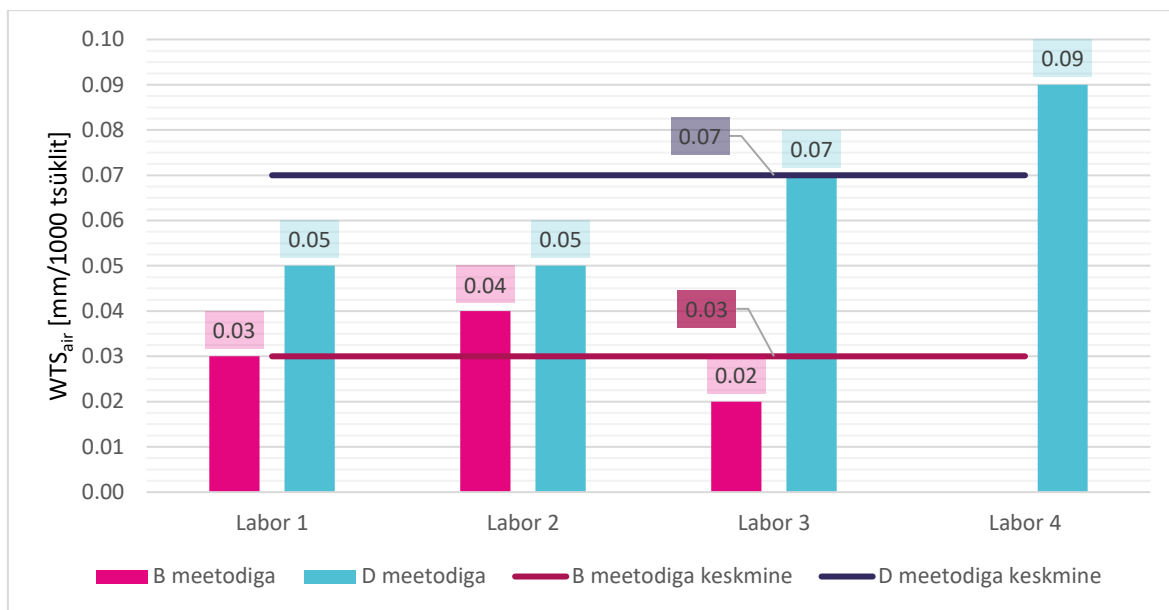
Deformatsioonikindluse katse tulemuste osas olid vaatluse all PRD_{AIR} ehk suhtelise roopasügavuse tulemused ning WTS_{AIR} ehk roobastumise tõus millimeetrites 1000 koormustsükli kohta. Mahumassi B meetodi alusandmetega tihendatud

deformatsioonikindluse katse osas on võrdluses laborite 1 kuni 3 tulemused ja D meetodi mahumassi alusandmete meetodiga lisaks ka labori 4 tulemus. Joonisel 4.17 on näha PRD_{AIR} tulemused mõlema mahumassi meetodi alusandmetega. B meetodiga on keskmine PRD_{AIR} tulemus 2,56% ning D meetodiga on keskmine tulemus 3,84%. Keskmisi vaadates ei pruugi tulemus esmapilgul tunduda väga suur, protsendipunktides on erinevus 1,28, kuid tegelikkuses on D meetodi alusel tihendatud kehade PRD_{AIR} näitaja poole suurem, ehk erinevus on lausa 50%. Kui aga vaadata labori 3 tulemust, 1,91% ja 4,90%, on erinevus lausa 156%.



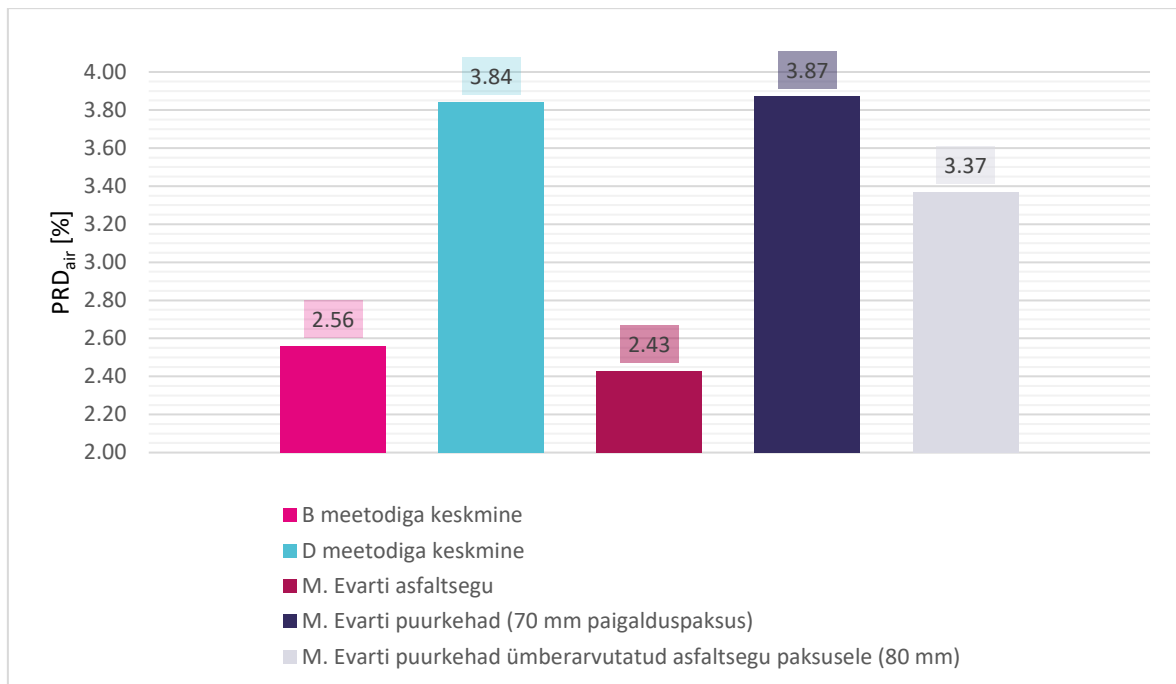
Joonis 4.17 PRD_{AIR} katsetulemused mahumassi eri meetoditega

Teisena vaadeldi deformatsioonikindluse WTS_{AIR} tulemusi. Joonisel 4.18 on näha, et tulemuste osas on jälle suur erinevus. Mahumassi B meetodi alusandmetega tihendatud deformatsioonikindluse katse WTS_{AIR} keskmine tulemus on 0,03 mm/1000 tsükli kohta ning D meetodi alusel tihendatud kehade WTS_{AIR} näitaja on 0,07. Erinevus on 133%. Taas on labori 3 erinevus erinevate meetodite vahel kõige suurem, B meetodi mahumassi alusel tihendatud ja D meetodi mahumassi alusel tihendatud kehade WTS_{AIR} tulemused on vastavalt 0,02 ja 0,07 mm/1000 tsükli kohta. Erinevus on 250%.



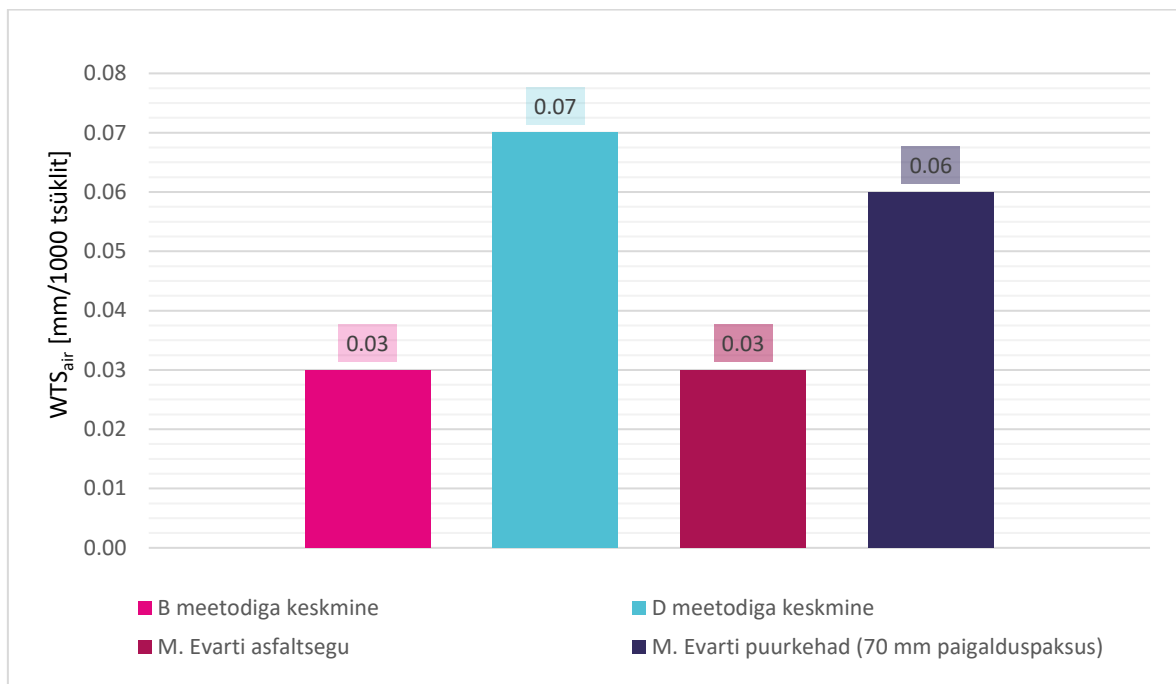
Joonis 4.18 WTS_{AIR} katsetulemused mahumassi eri meetoditega

Peatüki 4.3.5 põhjal saab järeldada, et õigem mahumassi määramise meetod oleks AC 32 base segudele meetod D, kuid et deformatsioonikindluse katse tulemusi rohkem võrrelda objektil toimuvaga, sai võrdluseks võetud Margus Evarti 2016. aastal koostatud magistritöö. M. Evarti magistritöös uuriti objektilt võetud puurkehade ja laboris valmistatud proovikehade deformatsioonikindluse tulemusi erinevate segude põhjal, k.a AC 32 base põhjal. Joonisel 4.19 on näha käesoleva magistritöö AC 32 base PRD_{AIR} keskmised tulemused nii D meetodi mahumassi alusandmetega kui ka B meetodi mahumassi alusandmetega ning M. Evarti magistritöös AC 32 base segu laboratoorselt valmistatud katsekehade kui ka objektilt võetud puurkehade PRD_{AIR} tulemused. Tulemuste sarnasus on märkimisväärne ning segud on omavahel võrreldavad – selle töö B meetodi alusel tihendatud kehade PRD_{AIR} tulemuste keskmine on 2,56% ning M. Evarti laboratoorsete katsekehade tulemus on 2,43%. Lisaks ilmneb ka sarnasus selle töö raames D meetodi alusel tihendatud kehade ja M. Evarti puurkehade tulemuste osas - PRD_{AIR} keskmised tulemused on vastavalt 3,84% ja 3,87%. Tuleb välja tuua, et puurkehade paigalduspaksus oli 70 mm ning laboratoorsed proovikehad 80 mm. Puurkehade PRD_{AIR} väärtus proportsionaalselt ümber arvutatuna 80 mm juurde tuleks 3,37%, mis on rohkem sarnane D meetodi alusel tihendatud proovikehadega kui B meetodi alusandmetega. [6]



Joonis 4.19 PRD_{AIR} tulemused võrrelduna M. Evarti magistritöö AC 32 base tulemustega [6]

Lisaks võeti võrdlusmomendina vaatluse alla ka deformatsioonikindluse katse WTS_{AIR} tulemused. Võrdluses on samamoodi B ja D mahumassi meetodite alusel tihendatud deformatsioonikindluse katsekehade WTS_{AIR} kui ka M. Evarti magistritöö laboratoorsete kehade ning suurkehade WTS_{AIR} näitajad. Joonisel 4.20 esineb samasugune sarnasus nagu oli PRD_{AIR} tulemuste puhul. Kui antud töö segude puhul on B ja D meetodi alusel tihendatud deformatsioonikindluse katse WTS_{AIR} tulemused vastavalt 0,03 ja 0,07 mm/1000 tsükli kohta ehk erinevus on 133%, siis sarnane suur erinevus on M. Evarti magistritöös laboratoorsete proovikehade ja objektilt võetud suurkehade vahel. WTS_{AIR} tulemused on vastavalt 0,03 ja 0,06 mm/1000 tsükli kohta ehk erinevus on 100%. Teisalt saab välja tuua sarnasuse nende kahe magistritöö osas – nii selle töö mahumassi B meetodi alusandmetega kui ka M. Evarti laboratoorsete proovikehade WTS_{AIR} tulemused on üks ühele samad, 0,03 mm/1000 tsükli kohta. Lisaks on ka väga lähedased tulemused selle töö D meetodi alusandmete ja M. Evarti suurkehade WTS_{AIR} näitajaid – tulemused olid vastavalt 0,07 ja 0,06 mm/1000 tsükli kohta. Taas on näha, et objektile olev olukord deformatsioonikindluse osas on rohkem võrreldav kui võtta laboris aluseks mahumassi D meetod deformatsioonikindluse katsekehade valmistamisel. [6]



Joonis 4.20 WTS_{AIR} tulemused võrrelduna M. Evarti magistritöö AC 32 base tulemustega [6]

Kui M. Evart tõi enda magistritöös välja potentsiaalseks erinevuste põhjuseks asjaolu, et objektile olev kate võib olla kehvemini tihendatud, siis joonise 4.19 ja joonise 4.20 põhjal võib järeldada, et laboris tihendatakse deformatsioonikindluse proovikehad üle mitte sobiliku mahumassi meetodi valimisel algandmete saamiseks. Joonise 4.17 ja joonise 4.19 põhjal võib väita, et mahumassi erinevad meetodid mõjutavad olulisel määral AC 32 base segu puhul deformatsioonikindlust ning objektile kajastuva lähedasema tulemuse saab laboris, kui kasutada D meetodi mahumassi algandmete osas. Lisaks saab joonise 4.19 põhjal välja tuua veel olulise aspekti proovikehade kihipaksuse osas. On näha, et sama RD_{AIR} tulemus annab 70 mm juures PRD_{AIR} väärtuseks 3,87%, kuid laboratoorse katsetuse käigus annaks sama RD_{AIR} tulemus PRD_{AIR} tulemuseks 3,37% kuna katsetatakse proovikeha paksusega 80 mm. [6]

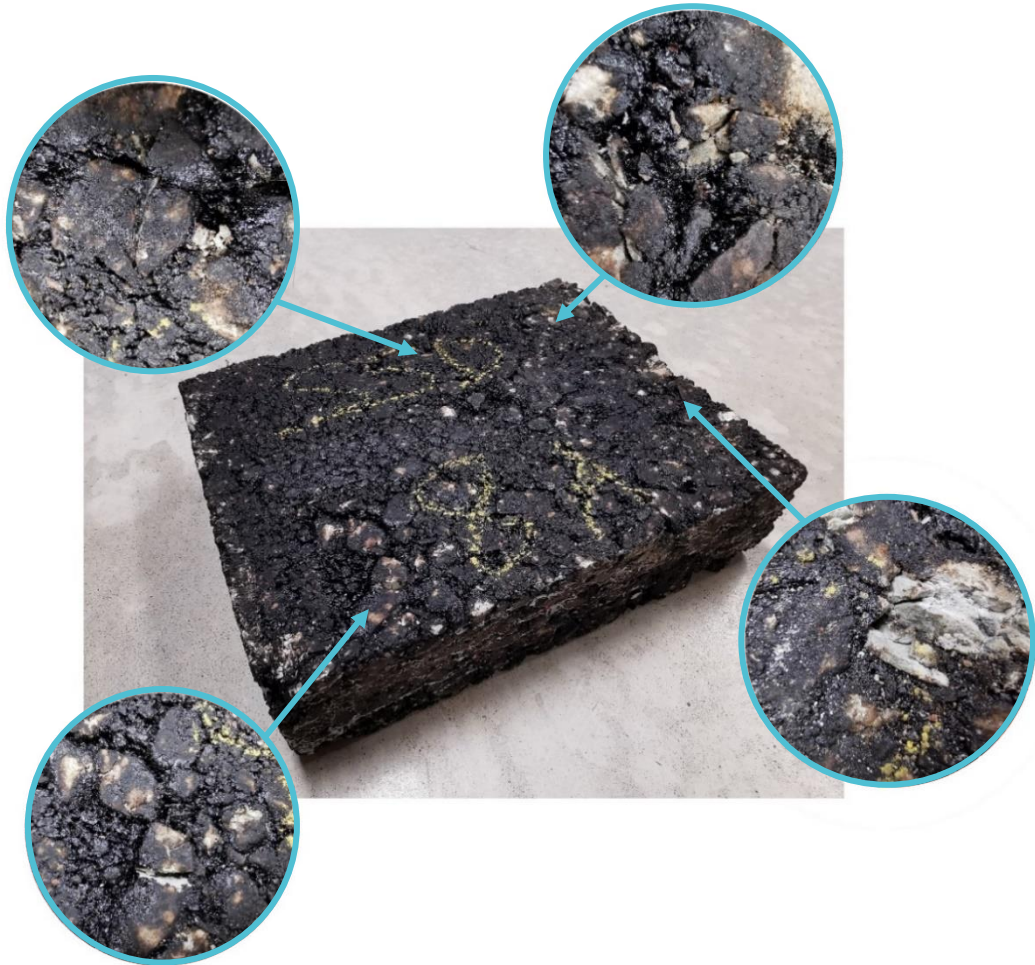
Proovikeha ja asfaltkatte kihipaksuse aspekt on deformatsioonikindluse osas oluline tegur arvutusliku poole pealt suhtelise roopasügavuse ehk PRD_{AIR} osas. Nimelt on Eestis kehtestatud nõue PRD_{AIR} suhtes, mis on seoses paigaldatud kihi paksusega. Nimelt on standardis EVS-EN 12697-22 kirjas, et katsetades deformatsioonikindlust väikeste seadmetega, peab proovikeha nimipaksus olema see, millega segu laotatakse teele. Juhul kui segud on projekteeritud paigaldada paksuste vahemikena, valitakse vastavalt segu suurima teramõõdu alusel standardis etteantud paksuste põhjal, millele peab vastama paigaldatavate paksuste lähim väärtus. Paraku lähtutakse Eesti teedelaborites

rohkem teisest osast, mis tähendab, et tihti katsetatakse ka paksemaid proovikehasid, kui on laotatud kihi paksus objektile. s.t et isegi sama roopa sügavuse juures tuleb suhteline roopasügavuse tulemus parem. [9], [10]

Võttes näite aluseks ainult arvutusliku mõju, siis näiteks AC 16 surf, mille PRD_{AIR} nõue on EVS-901-3 põhjal $AKÖL \geq 12\ 000$ puhul 9,0%. AC 16 surf keskmine projekteeritud paigalduspaksus objektile on teeregistri andmetel 08.04.2024 seisuga 4,55 mm. Nimetatud paksus on saadud võttes arvesse riigiteede asfaltkattega teid, mille kohta olid adekvaatsed andmed saadaval 4 101 km kohta, millest omakorda moodustasid AC 16 surf seguga katted 2 270 km. Saades sellise proovi tulemuseks näiteks 4,70 mm, tuleks PRD_{AIR} väärtus valemiga (3.11) 10,33%. Objektile paigaldatud kihipaksusega proovikehadega läheks näites toodud tulemus nõuetest üle. Kui aga sama proovi paksus valida standardi EVS-EN 12697-22 järgi suurima teramõõdu põhjal, mis AC 16 surfi puhul on 60 mm, tuleks PRD_{AIR} väärtus valemiga (3.11) 7,83%. Antud tulemus oleks juba standardiga kooskõlas. [8], [10], [42]

4.4 Mahumassi meetodi mõju asfaltsegu terastikulisele koostisele

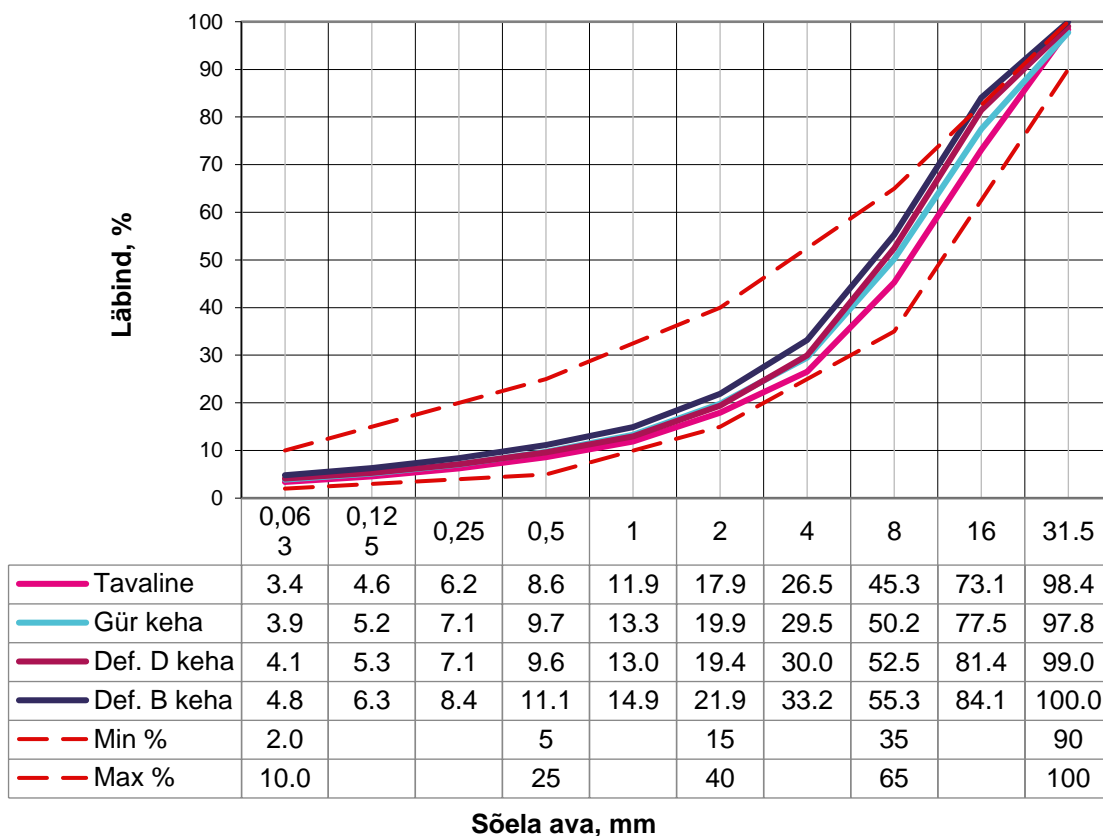
Vaadates deformatsioonikindluse katse proovikehasid peale tihendamist, on ka visuaalselt näha märke segu ületihendamisest. Peatükis 4.3.5 joonisel 4.13 näidatud tulemustest oli näha, et güraaatoriga tihendatud kehadel oli jäävpoorsus B meetodiga 7,3% ning deformatsioonikindluse katsekehadel sama meetodiga 4,6%. Nimetatud meetodiga tihendatud kehadel oli peale tihendamist näha hulga purunenud kive, mis viitab sellele, et poorsus on juba läinud nii madalaks ning jõud nii suureks, et täitematerjali osad lähevad katki. Joonisel 4.21 on näidatud purunenud täitematerjali osad peale tihendamist B meetodi mahumassi alusandmete põhjal. Võttes aluseks D meetodi mahumassi, siis sel juhul oli purunemisi täitematerjali osas vaid üksikuid. Samuti ei ole sellist täitematerjali purunemist näha tavapäraselt AC 32 base segude objektilt võetud puurkehade puhul.



Joonis 4.21 Deformatsioonikindluse katsekeha B meetodi mahumassi alusandmetega peale tihendamist

Lisaks tuleks ära mainida eri mahumassi meetodite puhul deformatsioonikindluse katsekehade tihendamiseks saavutatud maksimaalne jõud. Kui B meetodi mahumassi puhul oli laboris 1 kahe proovikeha maksimaalne jõud tihendamisel vastavalt 34,233 kN ja 36,113 kN, keskmine oli 35,173 kN, siis D meetodi puhul olid need vaid 17,904 kN ja 15,964 kN, keskmine oli 16,934 kN. Tihendamiseks vajalik maksimaalne jõud on B meetodi puhul rohkem kui kahekordne D meetodiga vajalikest. Sellega seoses tuleks ära täheldada ka seadmed millega, on võimalik tihendada standardi EVS-EN 12697-33 proovikehasid. Euroopa turul kolm levinuimat tootjat on Saksamaa ettevõtte Infratest ja kaks Itaalia ettevõtet – Controls ja Matest. Lisaks on Euroopast saada veel Suurbritannia ettevõtte Cooperi seadmed. Hiinast võib soetada saada ettevõtte Tianpeng seadmeid ja Ameerika Ühendriikidest Humboldti seadmeid. Tähelepanuväärne on aga fakt, et kõikide nende tootjate seadmetest vaid üks suudab tihendamisel saavutada suuremat kui 30 kN suurust vertikaalset jõudu. Maksimaalseks jõuks kõikidel seadmetel on märgitud 30kN, välja arvatud Matesti omal, millel on 40 kN. [43], [44], [45], [46], [47], [48]

Vaatlemaks, kui palju oli erinevate meetodite puhul purunenud täitematerjali, määrati proovikehadele peale tihendamist ka terastikuline koostis ekstraheerimise teel standardi EVS-EN 12697-2 järgi. Kokku määrati neljal erineval juhul terastikuline koostis – tavalisele asfaltsegule, güratoriga tihendatud proovikehale ning nii B kui ka D meetodi mahumasside alusandmetega tihendatud deformatsioonikindluse proovikehadele.

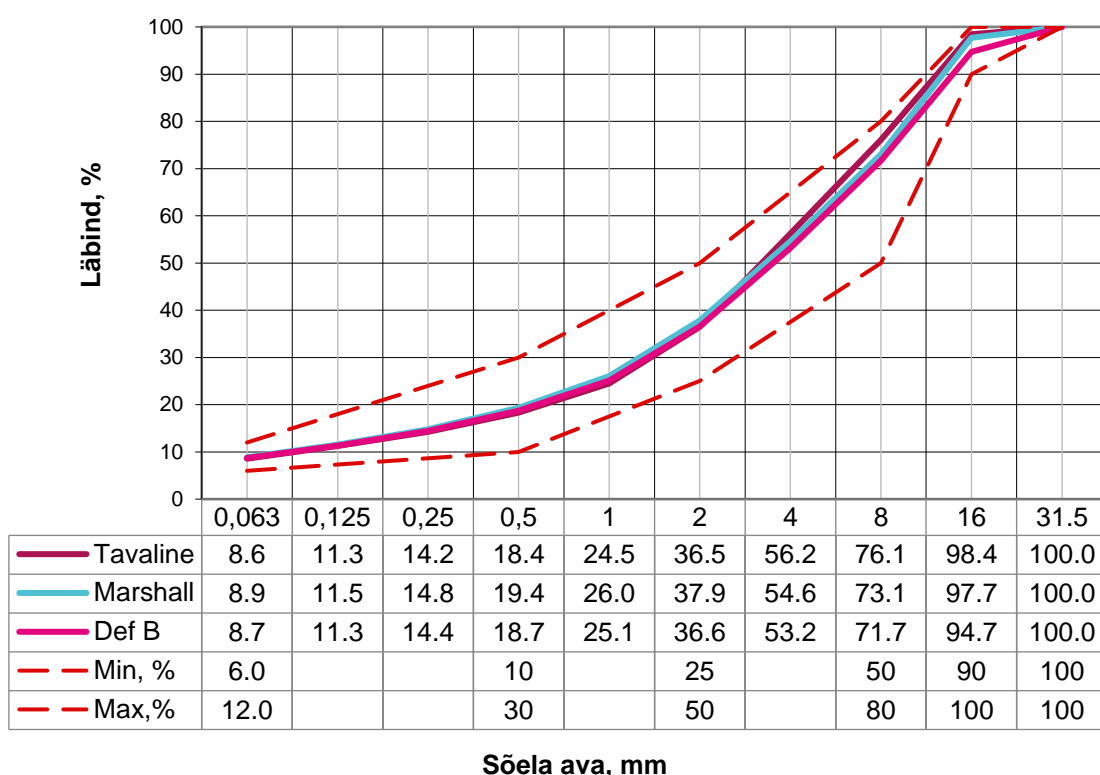


Joonis 4.22 AC 32 base segude terastikulised koostised koos EVS 901-3 nõutud piiridega

Joonisel 4.22 on näha, et iga tihendamise puhul toimub mingil määral täitematerjali purunemine ja peenenemine. Jooniselt selgub, et purunemise tendents güratoriga tihendatud proovikehal ja D meetodi mahumassi alusandmetega tihendatud deformatsioonikindluse proovikehal on sarnane. Peenenemine toimub jämedamal täitematerjali osakestel. Nende omavahelisel võrdlusel on keskmise sõela läbindi erinevus 1,4% ning alla 12,5 mm sõela läbindate keskmine erinevus on 0,4%. Kui võrrelda B meetodi mahumassi alusandmetega tihendatud deformatsioonikindluse proovikeha güratoriga tihendatud proovikehaga, on erinevus tunduvalt suurem. Keskmise sõela läbindi erinevus on 3,1% ning alla 12,5 mm sõela läbind on 2,5%. See

tähendab, et selle meetodi puhul toimub peenenemine ka peenemate täitematerjali osakeste puhul. Tekib ka tolm, mille osakaal on güraatoriga tihendatud proovikehast 0,9% võrra suurem ning esialgselt terastikulisest koostisest 1,4% suurem. Lisaks ei mahuks B meetodi mahumassi alusel tihendatud deformatsioonikindluse proovikeha terastikuline koostis enam EVS 901-3 nõutud piiridesse.

Võrdluseks sooritati sarnane võrdlus ka AC 16 surf segule, kinnistamaks, et peenenemise nähtus on pigem jämedamatel segudel. Samuti määrati tavaline terastikuline koostis EVS-EN 12697-2 järgi, lisaks terastikuline koostis marshaliga tihendatud proovikehale ja kolmandaks ka deformatsioonikindluse proovikehale.



Joonis 4.23 AC 16 surf segude terastikulised koostised koos EVS 901-3 nõutud piiridega

Joonisel 4.23 on näha AC 16 surf segu terastikulised koostised kolmel erineval juhul. Sellist purunemise nähtust nagu AC 32 base segu puhul, ei ole näha AC 16 surf segul. Marshaliga tihendatud proovikeha ning deformatsioonikindluse proovikehade keskmine sõelte läbindite erinevus oli vastavalt 0,6% ja 1,4%. Nimetatud erinevus võib tulla ka asfaltsegu jagamise protseduurist, kuna tavaline terastikuline koostis on selle võrdluse puhul kolmest erinevast juhust kõige peenem.

4.5 Järeldused

4.5.1 Järeldused mahumassi määramise meetodite kohta AC 32 base segu põhjal

Standardite analüüsi peatükkidele 4.1 ja 4.2 tuginedes saab järeldada, et juba praegu tuleks AC 32 base segude mahumasse määrata standardi EVS-EN 12697-6 meetodi D järgi. Küll aga ei ole sellega arvestatud standardis EVS 901-3, kus on välja toodud minimaalsed ja maksimaalsed jäävpoorsuse nõuded. Kuna ajalooliselt on Eestis kasutatud enamjaolt ainult B meetodit mahumassi määramiseks, võib ka eeldada, et nõuded on selle meetodi baasil koostatud, ning käesoleva lõputöö raames katsetatud segudest ei annaks D meetodiga mahumassi määramises mitte ühegi segu jäävpoorsus nõuetekohast tulemust.

Lisaks saab järeldada, et standardi EVS-EN 12697-6 meetod B ja C ei sobiks mahumassi määramiseks käesoleva magistritöö raames katsetatud AC 32 base segude puhul. Mõlema meetodi puhul ilmnisid nähtused, mille eest ka standard hoiatab: mõõtmine tuleb katkestada ja valida sobivam meetod, või mille puhul ütleb standard, et antud nähtus viib mahumassi ja jäävpoorsuse valesti hindamiseni. Joonisel 4.3 on näha kuidas proovikehast nõrgub vett välja, mille puhul käsib standard mõõtmise lõpetada, ja joonisel 4.5 on näha kuidas C meetodi puhul tungib parafiinvaha sisemistesse pooridesse, mis viib mahumassi ülehindamiseni ja jäävpoorsuse alahindamiseni.

Standardit EVS-EN 12697-6 ja katsetulemusi analüüsidest saab veel öelda, et nimetatud standardis on mitmeid puudujäike ja vastuolusid. Standard räägib teadaolevast veesisaldusest, kuid ei anna mitte ühtegi juhtnööri, kuidas seda teadaolevat veesisaldust kasutada ning ei kajasta seda mitte üheski valemis. Lisaks ei ole juhtnööre proovikehade kuivatamise kohta. C meetodi puhul ei ole standardijärgse protseduuriga võimalik saavutada olukorda, kus parafiinvaha ei tungiks proovikeha sisemistesse pooridesse. Juhendajaga välja töötatud meetodi järgi oli see võimalik, s.t et sissetung sisemistesse pooridesse parafiinvaha poolt oli minimaalne. Visuaalne võrdlus on näha joonisel 4.5. Samuti on C meetodi protseduuri osas ebakõlasid – standard lubab selle protseduuri puhul proovikeha kuiva massi määramise jätta protseduuri lõppu, samas ei ole see võimalik kuna proovikeha kaetakse parafiinvahaga.

4.5.2 Järeldused mahumassi määramise meetodi mõju kohta deformatsioonikindlusele

Deformatsioonikindluse katsetulemustest saab järeldada, et lähteandmete mahumass on deformatsioonikindluse katsel olulisel kohal ning see mõjutab olulisel määral PRD_{AIR} väärtust. B meetodi mahumassi lähteandmetega tihendatakse oluliselt suurem katsekogus sama ruumala juurde, käesoleva magistritöö raames katsetatud segul 5,5% suurem kogus, mis mõjutab ka valmistatud proovikeha poorsusomadusi. Kõige lähedasema jäävpoorsuse võrreldes güraatoriga valmistatud proovikehaga saab deformatsioonikindluse katsekehale, kui lähteandmeteks võtta güraatoriga proovikehale määratud D meetodiga mahumass.

Lisaks saab käesoleva magistritöö katsetulemustest järeldada, et hetkel Eestis kasutatav protseduur, kus mahumassi lähteandmed määratakse B meetodiga, mõjutab ka segu teisi omadusi. Deformatsioonikindluse proovikehade tihendamise käigus puruneb osa täitematerjalist ja terastikuline koostis on peale tihendamist peenem. Visuaalne purunemine on näha joonisel 4.21 ning graafiline võrdlus esialgse terastikulise koostisega joonisel 4.22. Samuti saab esile tuua hüpoteesi, et laboriseadmeid tootvad tootjad ei ole arvestanud, et proovikehade tihendamisel võetakse alusandmeteks B meetodiga määratud mahumass. Käesoleva magistritöö raames katsetatud segul suudab B meetodi mahumassi lähteandmetega deformatsioonikindluse proovikeha ära tihendada suurematest seadmete tootjatest vaid üks kuuest. Teiste tootjate seadmete maksimaalne vertikaalne jõud jääb oluliselt alla tihendamisel vajaminevast jõust.

4.6 Ettepanekud

Autorina toaksin välja ettepanekud, mida lähtuvalt käesoleva magistritöö katsetulemuste ja järelduste põhjal muuta ning edasi uurida.

Autori nägemusel tuleks AC 32 base segu jäävpoorsuse saamiseks mahumassi määramise puhul rakendada hakata mahumassi määramise standardi EVS-EN 12697-6 meetodit D. Selle rakendamiseks tuleks standardis EVS 901-3 välja töötada uued minimaalsed ja maksimaalsed jäävpoorsuse nõuded, mis arvestaks mahumassi D meetodit. Hetkel kehtivad nõuded lähtuvad eeldatavasti B meetodist.

Deformatsioonikindluse katse mahumassi lähteandmetena AC 32 base segu puhul oleks ettepanek hakata kasutama standardi EVS-EN 12697-6 meetodit D. Seda tuleks juba

praegu teha kui lähtuda standarditest ja Transpordiameti enda juhendist, Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise. Juhendis on veel eraldi välja toodud, et segu mahumassi määramise protseduuri valikul tuleb juhinduda standardi EVS-EN 13108-20 esitatud nõuetest. Eeldatavasti ei kontrolli tänasel päeval seda mitte keegi, kas katse on teostatud õige meetodi järgi või mitte. Sisuliselt võib hetkel sama standardi mistahes meetodi valida ning see oleks aktsepteeritud. Teen ettepaneku Transpordiameti ja järelevalvete vastutavatele töötajatele ning tööde vastuvõtjatele hakata jälgima lisaks standardinumbrile ka protseduuri valikut tellitud katsetele.

Deformatsioonikindluse katse tulemuse PRD_{AIR} väärtuse osas on oluliseks faktoriks ka kihi paksus. Hetkel on enamjaolt paigaldatava katte kihi paksus objektile väiksem kui laboris katsetatavatel proovikehadel. Näiteks AC 16 surfi keskmine paigaldatud kihipaksus teeregistri järgi on 4,55 cm, kuid laboris katsetatakse 32% paksemaid ehk 6,00 cm paksuseid proovikehasid. Ettepanek on laboratoorsete katsete puhul kasutama hakata objektile paigaldatavat kihipaksust või hoopis nõue määrata RD_{AIR} tulemusele, mida ei saa kihipaksusega niivõrd palju mõjutada nagu PRD_{AIR} väärtust saab. Nimetatud ettepanekud tegi ka M. Evert juba oma 2016. aastal koostatud magistritöös. [6]

Standardi EVS-EN 12697-6 osas on autori ettepanek välja töötada märgade proovikehade kuivatamise tingimused, et kõik laborid teeksid seda ühtemoodi. Katsetulemustest oli näha, et lauade kuivamine jätmise ning 0,1% massimuutuse jälgimine ei päde, kuna proovikehal, mida oleks käesoleva töö raames olnud lubatud edasi katsetada ehk kui massimuutus tunnis oli vähem kui 0,1%, oleks andnud 1,1% erineva jäävpoorsuse esialgsest. Lisaks oli jätkuvalt proovikehas 54,0 g vett sees. Nimetatud standardi osas oleks veel ettepanek A, B ja C meetoditele välja töötada valemid, mis arvestaks veesisaldusega. Hetkel ütleb standard, et proovikeha võib olla teadaoleva veesisaldusega, kuid ei anna juhiseid, mida sellega edasi teha. Lisaks, käesoleva magistritöö katsetulemuste põhjal ei anna nimetatud standardi C meetod korrektset tulemust. Ettepanek on ka selle osas muudatused sisse viia – näiteks peatükis 4.2 kirjeldatud meetodi puhul, mis sai välja töötatud koos juhendajaga, ei tunginud parafiinvaha olulisel määral proovikeha sisemistesse pooridesse nagu see juhtus standardijärgse protseduuri käigus. Lisaks võiks C meetodi mahumassi arvutamise valemi (3.7) asendada valemiga (4.3), mis sai väljatöötatud koos juhendaja Kristjan Lillega.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti mahumassi määramise meetodi valiku mõju AC 32 base puhul segu jäävpoorsusele. Teise suure teemana uuriti, kuidas mõjutab mahumassi meetodi määramise valik asfaltsegu deformatsioonikindlust AC 32 base näitel laboratoorsete katsetuste käigus.

Magistritöös anti sissevaatav ülevaade Eesti teedevõrgust ning miks peaks deformatsioonikindluse omadusele pöörama olulist tähelepanu. Taustainfos toodi välja deformatsioonikindluse nõuded ja määramise meetodid Eestis ning lähiriikides ehk Lätis, Leedus ja Norras. Lisaks anti ülevaade peamistest olulistest teguritest, mis mõjutavad deformatsioonikindlust – temperatuur, terastikuline koostis, sideaine sisaldus, koormus ja jäävpoorsus. Lühidalt kirjeldati ka lõputöö käigus sooritatavaid standardijärgseid laboratoorseid katseid.

Katsetuste käigus selgus, et AC 32 base segu mahumassi määramisel on oluline õige mahumassi meetodi valik. Katsekäigu jooksul ilmnisid nähtused, mille korral võib standardi EVS-EN 12697-6 meetodi B ja C tulemused lugeda AC 32 base segu korral ebatäpseks. Õige oleks määrata AC 32 base segu mahumass standardi EVS-EN 12697-6 meetodi D järgi. Samuti tuleb käesoleva magistritöö raames välja, et standardis EVS-EN 12697-6 on palju ebakõlasid ja puudujääke, mis vajaksid parandamist ja täiendamist.

Laboratoorsete katsetuste osas tuleb välja veel, et deformatsioonikindluse lähteandmete osas mängib olulist rolli mahumassi meetodi määramise valik. Võrreldi deformatsioonikindluse tulemusi, kui lähteandmeteks oli võetud standardi EVS 12697-6 meetodi B ja meetodi D järgi määratud mahumass. Autori hinnangul annab korrektsema deformatsioonikindluse tulemuse, kui lähteandmeteks võtta D meetodi järgi määratud mahumass.

SUMMARY

In this Master's thesis, the effect of the method of determining bulk density on the air void content of the AC 32 base mixtures was studied. Another major topic studied was how the method of determining bulk density affects the resistance to deformation of the asphalt concrete mixtures, using the AC 32 base as an example in laboratory tests.

The Master's thesis provided a brief overview of the Estonian road network and why resistance to deformation characteristics should be given significant attention. In the background information, the requirements for resistance to deformation and the methods of determination in Estonia and neighboring countries such as Latvia, Lithuania, and Norway were presented. An overview of the main important factors affecting resistance to deformation, including temperature, particle size distribution, binder content, load, and air void content, was also given. The standard laboratory tests performed during the thesis were also briefly described.

During the testing, it was found that it is important to choose the correct method to determine the bulk density of AC 32 base asphalt mixtures. Upon testing, there were circumstances, that indicated that the results of methods B and C of the EVS-EN 12697-6 standard can be considered inaccurate for the AC 32 base mixture. It would be correct to determine the bulk density of the AC 32 base mixture according to method D of the EVS-EN 12697-6 standard. Furthermore, this Master's thesis found that there are many inconsistencies and deficiencies in the standard EVS-EN 12697-6 that need correction and supplementation

Moreover, it was found, that the source data used for resistance to deformation test is significantly impacted by the method used to determine bulk density. The results of resistance to deformation were compared using the bulk density obtained by methods B and D of the EVS-EN 12697-6 standard as the starting data. The author suggests that taking the bulk density determined by method D as the baseline data gives a more accurate resistance to deformation result.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Martin, "Highway Engineering," Blackwell Publishing, 2003.
- [2] Transpordiamet, Eesti teedevõrk, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.transpordiamet.ee/eesti-teedevork> [Kasutatud 25.03.2024].
- [3] European Commission, Trans-European Transport Network (TEN-T), [Võrgumaterjal]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en?etransnolive=1 [Kasutatud 25.03.2024].
- [4] Autopargi läbisõit 2022, Transpordiamet.
- [5] A. M. Zaltuom, "A review study of the effect of air voids on asphalt pavement life," in Proceedings of First Conference for Engineering Sciences and Technology, vol. 2, pp. 618–625, AIJR Publisher, 2018.
- [6] M. Evert, „Asfaltsegude deformatsiooni- ja kulumiskindluse laboratoorselt valmistatud proovikehade ning asfaltkattest võetud suurkehade katsetulemuste analüüs,“ magistritöö. Teedeinstituut, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2016.
- [7] A. Allik, „Mahumassi määramise erinevad meetodid, nende mõju jäävpoorsusele ja tihendustegurile Tartu läänepoolse ümbersõidu II ehitusala näitel,“ magistritöö, Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2022.
- [8] EVS 901-3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud.
- [9] Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised, Transpordiamet, 2021.
- [10] EVS-EN 12697-22:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 22: Rattaroopa katse.
- [11] Vegdirektoraat, Vegnormal N200 Vegbygging, Norra: Vegdirektoraat, 2022.
- [12] Vegdirektoraat, Retningslinje laboratorieundersøkelser håndbok R210, Norra: Vegdirektoraat, 2014.
- [13] Autoceļu būvdarbu specifikācijas ABS 2023/1, Lāti: VSIA "Latvijas Valsts ceļi", 2022.
- [14] Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas, Leedu: AB Lietuvos automobilių kelių direkcijos, 2024.
- [15] U. Isacsson and X. Lu, "Properties of bitumens modified with elastomers and plastomers," in 2nd Euroasphalt & Eurobitumen Congress, Barcelona, 2000.
- [16] S. L. Weissman, "The Mechanics of Permanent Deformation in Asphalt Aggregate Mixtures: A Guide to Laboratory Test Selection," Symplistic Engineering Corp, p. 55, 1997.

- [17] J. A. Scherocman, "Guidelines for Compacting Asphalt Concrete Pavement," *Better Roads*, vol. 54, no. 3, pp. 12-17.
- [18] L. K. a. C. F. M. D. Beer, "Towards Improved Mechanistic Design of Thin Asphaltic Layer surfacing based on Actual Type/Pavement Contact stress - In - Motion (SIM) Data in South Africa," in *7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*, 1997.
- [19] Y. Yildirim, "Polymer Modified Asphalt Binders," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 66-72, 2007.
- [20] H. U. Bahia, D. I. Hanson, M. Zeng, H. Zhai, M. A. Khatri and R. M. Anderson, "Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design," NCHRP Report 459, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001.
- [21] H. U. Bahia, "Critical Evaluation of Asphalt Modification Using the SHRP Concepts," *Transportation Research Record* 1488, pp. 82-88, 1995.
- [22] A. Papacostas and C. Simpson, "Air voids in asphalt," *PAVERTREND*, 2016 [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.pavertrend.com.au/asphalt/air-voids-in-asphalt> [Kasutatud 25.03.2024].
- [23] K. L. A. A. Karli Kontson, "Superpave Pavement Design Temperatures in Estonia", *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 18. 190-204, 2023.
- [24] Susanto, H.A., Yang, SH., Kao, CT. et al., "Effect of Viscoelastic Material in Hot Mix Asphalt Rutting Performance Correlation Using Different Wheel-Tracking Test", *Int. J. Pavement Res. Technol.* 15, 693–705, 2022.
- [25] Y. J. S. W. Y. G. Xiongwei Dai, „Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus Test,“ *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, Article ID 9525179, 15 pages, 2020.
- [26] W. H. M. Z. H. S. Y. Z. C. Y. Quan Lv, „Influence of gradation on asphalt mix rutting resistance measured by Hamburg Wheel Tracking test,“ *Construction and Building Materials*, Volume 238, 2020.
- [27] X. H. Z. Q. a. J. Z. Y. Gao, „Performance Modeling and Evaluation of Pavement Systems and Materials,“ *GeoHunan International Conference*, 2009.
- [28] *Liiklusloenduse tulemused 2020. aastal*, Teede Tehnokeskus, 2021.
- [29] *Liiklusloenduse tulemused 2019. aastal*, Teede Tehnokeskus, 2020.
- [30] S. Song ja C. Yoem, „Reduction of plastic deformation in heavy traffic intersections in urban areas,“ *Sustainability* 2021, 13, 4002.
- [31] J. A. Epps, B. M. Gallaway, W. J. Harper, W. W. Scott and J. W. Seay "Compaction of Asphalt Concrete Pavements," *Research Report 90-2F*, Texas Transportation Institute, Texas A&M University College Station, Texas. July 1969.
- [32] *EVS-EN 12697-5:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine.*

- [33] EVS-EN 12697-31:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 31: Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega.
- [34] EVS-EN 12697-35:2016 Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing.
- [35] EVS-EN 12697-6:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine.
- [36] EVS-EN 12697-29:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 29: Asfaltsegust proovikeha mõõtmete määramine.
- [37] EVS-EN 12697-8:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine.
- [38] EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022 Bituminous mixtures - Test methods - Part 33: Specimen prepared by roller compactor.
- [39] EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: terastikulise koostise määramine.
- [40] EVS-EN 13108-20:2016 Asfaltsegud. Materjalide spetsifikatsioonid. Osa 20: Tüübikatsetus.
- [41] L. P.-S. S. C. R. L. Dinis Gardete, „Asphalt mix design: Discussion on the bulk specific gravity procedure influence on the results obtained from empirical, volumetric, and performance-based methods,“ Construction and Building Materials, Volume 342, Part B, 2022.
- [42] Teeregister, Transpordiamet, [Vörgumaterjal]. Available: <https://teeregister.mnt.ee/reet/home>. [Kasutatud 08.04.2024].
- [43] Infratest, [Vörgumaterjal]. Available: <https://infratest.net/en/produkt/roller-sector-compactor-30-kn-320x260-mm/>. [Kasutatud 09.04.2024].
- [44] Matest, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.matest.com/en/product/b039-arc-asphalt-roller-compactor>. [Kasutatud 09.04.2024].
- [45] Controls, [Vörgumaterjal]. Available: <https://controls-group.com/product/advanced-asphalt-slab-roller-compactor/>. [Kasutatud 09.04.2024].
- [46] Cooper, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.cooper.co.uk/shop/asphalt-testing/asphalt-compaction/hydraulic-standard-roller-compactor-dual-size/>. [Kasutatud 09.04.2024].
- [47] Humboldt, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.humboldtmfg.com/steel-roller-compactor.html>. [Kasutatud 09.04.2024].
- [48] Tianpeng, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.testmould.com/compaction/asphalt-slab-roller-compactor.html>. [Kasutatud 09.04.2024].