



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

BIOBITUUMENI KASUTUSVÕIMALUSED EESTIS

POSSIBILITIES OF USING BIOBITUMEN IN ESTONIA

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl-Kristjan Smitt

Üliõpilaskood: 221591EAXM

Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant

Kaasjuhendaja: Sven Sillamäe, projektijuht

Tallinn 2024

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.

"....." 20.....

Autor: Karl-Kristjan Smitt

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: Kristjan Lill

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Karl-Kristjan Smitt

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Biobituumeni kasutusvõimalused Eestis“

mille juhendaja on Kristjan Lill ja kaasjuhendaja Sven Sillamäe

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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karl-Kristjan Smitt, 221591EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/22 Teede- ja sillaehitus
Juhendaja(d): Doktorant, Kristjan Lill, +372 5302 2437
Projektijuht, Sven Sillamäe, +372 5302 5265

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Biobituumeni kasutusvõimalused Eestis

(inglise keeles) Possibilities of Using Biobitumen in Estonia

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida võimalusi biobituumeni kasutuselevõtuks asfaltsegus.
2. Anda ülevaade biobituumenist ning tuua välja muu maailma kogemus biobituumeni kasutamisel.
3. Kontrollida biobituumeni sobivust Eesti asfaltsegude tootmiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teaduskirjanduse läbitöötamine ja kehtivate nõuetega tutvumine	29.02.2024
2.	Teooriaosa kirjutamine	29.02.2024
3.	Laboratoorsed katsetused	25.03.2024
4.	75% tööst on valmis	25.04.2024
5.	Katsetulemuste analüüs	07.05.2024
6.	Töö on valmis ning esitatakse retsenseerimisele	20.05.2024

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: Karl-Kristjan Smitt ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Kristjan Lill ".....".....20.....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Sven Sillamäe ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Simo Ilomets ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
1. SISSEJUHATUS	11
2. TEOREETILISED ALUSED	13
2.1 Bituumenist üldiselt.....	13
2.2 Biobituumenist üldiselt	15
2.2.1 Ligniini põhise komponendiga biobituumen	15
2.2.2 Bioõli põhise komponendiga biobituumen	16
2.2.3 100% biopõhiste komponentidega biobituumen.....	21
2.3 Riikide kogemused biobituumeniga.....	23
2.3.1 Ligniini sisaldava biobituumeniga teostatud katselõigud.....	23
2.3.2 Bioõli sisaldava biobituumeniga teostatud katselõigud	25
2.4 Biobituumeni kasutamise mõju keskkonnale.....	27
2.4.1 Biogeennse süsiniku olemus ja mõiste.....	28
3. BIOBITUUMENIGA TEHTAVAD LABORATOORSED KATSETUSED	30
3.1 Kasutatud materjalide kirjeldus	31
3.2 Biobituumeni kokku segamine	33
3.3 Nõelpenetratsiooni määramine	35
3.4 Pehmenemistäpi määramine	35
3.5 Fraass'i murdumistäpp	36
3.6 Säilivuskindlus.....	37
3.7 RTFOT ja massimuutuse määramine.....	38
3.8 Biobituumeni pikaaegne vanandamine (PAV).....	39
3.9 Pikendatud BBR meetod (eBBR).....	40
3.10 DSR (<i>Dynamic Shear Rheometer</i>) katse.....	42
3.11 Leektäpi määramine.....	43
4. BIOASFALTSEGUGA TEHTAVAD LABORATOORSED KATSETUSED	44
4.1 Bioasfaltsegu kasutatud materjalide kirjeldus.....	45
4.2 Bioasfaltsegu segamine	46
4.3 Bioasfaltsegule teostatud katsetuste kirjeldused	47
4.3.1 Lahustuva sideaine sisalduse ja terastikulise koostise määramine.....	47
4.3.2 Biobituumeni eraldamine metüleenkloriidi lahusest. Nõelpenetratsiooni ja pehmenemistäpi määramine	49
4.3.3 Marshall-proovikehade valmistamine bioasfaltsegust.....	49
4.3.4 Näiva erimassi määramine.....	51
4.3.5 Mahumassi määramine Meetod B.....	51
4.3.6 Poorsusomaduste määramine.....	52
4.3.7 Asfaltsegude veepüsivuse määramine	52

4.3.8	Rattaroopa katse	52
5.	BIOBITUUMENI LABORATOORSETE KATSETULEMUSTE ANALÜÜS	54
5.1	Nõelpenetratsiooni tulemused.....	56
5.2	Pehmenemistäpi määramise tulemused	56
5.3	Fraass'i murdumistäpi määramise tulemused	57
5.4	Säilivuskindluse määramise tulemused	58
5.5	RTFOT vanandamise tulemused	58
5.6	PAV vanandamine	59
5.7	Pikendatud BBR (eBBR) meetodi tulemused	60
5.8	DSR katse tulemused	61
5.9	Leektäpi määramise tulemused	62
6.	BIOASFALTSEGU KATSETULEMUSTE ANALÜÜS.....	63
6.1	Lahustuva sideaine sisalduse määramise tulemused.....	63
6.2	Terastikulise koostise määramise tulemused	64
6.3	Näiva erimassi, mahumassi ja poorsusomaduste tulemused	66
6.3.1	Erimass.....	66
6.3.2	Mahumass Meetod B	66
6.3.3	Poorsusomadused.....	66
6.4	Biobituumenist asfaltsegu veepüsivuse määramise tulemused	67
6.5	Rattaroopa katse ja jäävdeformatsiooni vastupanu tulemused	68
7.	JÄRELDUSED JA SOOVITUSED	71
	KOKKUVÕTE	75
	SUMMARY	76
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	77
	LISAD	81

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema väljatöötamisel oli oluline panus Tallinna Tehnikaülikooli doktorandil Kristjan Lillel ja projektijuht Sven Sillamäel. Töö eesmärgiks on uurida biobituumeni laialdasemat kasutamist uute asfaltsegude tootmisel. Teema valikul lähtus autor sellest, et tema hinnangul ei pööra ehitussektor piisavat tähelepanu taaskasutusele. Samuti on sektoril suur potentsiaal majanduslikult paremate lahenduste kasutuselevõtuks ja CO₂ jalajälje vähendamiseks, mis aitaksid kaasa elustandardi parendamisele Eestis.

Soovin avaldada tänu juhendajatele Kristjan Lillele ja Sven Sillamäele, kes olid abiks kogu protsessi jooksul ning jagasid väärtuslikku tuge ja juhiseid.

Samuti soovin avaldada tänusõnad Tallinna Tehnikaülikooli teedelabori meeskonnale, kes aitas läbi viia lõputöö raames vajalikud laboratoorsed katsetused.

Sooviksin väljendada sügavat tänu Verston OÜ-le katsete rahastamise eest. Nende toetus on olnud märkimisväärne ning võimaldanud edukalt läbi viia olulisi eksperimente ja uuringuid. Verston OÜ on mitte ainult laboratoorsete katsete rahastaja, vaid ka oluline partner, kes jagab huvi innovatsiooni vastu ning toetab positiivselt jätkusuutlikke algatusi.

Sooviksin avaldada siirast tänu kõigile mainitud isikutele ja organisatsioonidele, kes on andnud hindamatu panuse selle magistritöö valmimisse. Olen sügavalt tänulik nende toetuse eest, mis on olnud abiks käesoleva uurimustöö edukale lõpuleviimisele.

Võtmesõnad: taristuehitus, taaskasutus, biobituumen, bioasfaltsegu, magistritöö

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- °C - Tähistab kraadi Celsiuse skaalal temperatuuri mõõtmiseks.
- 70/100 - Tähistus, mis viitab bituumeni penetratsiooniklassile.
- AC surf - Ing. *Surface asphalt concrete*, mis tähistab kulumiskihi asfaltsegu.
- AKÖL - Aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus.
- APA - Ing. *Asphalt Pavement Analyzer* tähistab seadet, mida kasutatakse asfaldi segu vastupidavuse testimiseks liikluse ja muude koormuste mõjul.
- BBR - Ing. *Bending Beam Rheometer* tähistab seadet, mida kasutatakse asfaltsegude ja bituumeni madalatemperatuuriliste omaduste mõõtmiseks.
- CESD - Ing. *Critical Strain Energy Density* tähistab väärtust, millega materjali mehaanikas kirjeldatakse energia hulka ühiku ruumala kohta, mis on vajalik materjali pragunemise või rikke tekitamiseks.
- CO₂ - Tähistab süsinikdioksiidi, mis on kasvuhoonegaas.
- DSR - Ing. *Dynamic Shear Rheometer* test tähistab seadet, mida kasutatakse bituumeni ja muude viskoosete materjalide viskoelastsete omaduste mõõtmiseks.
- DWB - Ing. *Dried Wood Bio-oil*, ehk kuivatatud puidust bioõli.
- EBBR - Ing. *Extended Bending Beam Rheometer* tähistab pikendatud BBR testi.
- EFB - Ing. *Empty Fruit Bunch* tähendab tühja puuvilja kobarat.
- EN - Euroopa standardit mis on välja töötatud Euroopa standardiorganisatsioonide poolt.
- EVS - Tähistab Eesti standardit.
- Fr - Lühend sõnast fraktsioon.
- GC-MS - Ing. *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* tähistab analüütilist tehnikat, mida kasutatakse laialdaselt keemiliste ühendite identifitseerimiseks ja nende kontsentratsioonide mõõtmiseks proovides.
- ISO - Ing. *International Organization for Standardization* tähistab Rahvusvahelist Standardiseerimisorganisatsiooni.
- ITSR - Ing. *Indirect Tensile Strength Ratio* tähistab katsemeetodit, mida kasutatakse asfaltsegude omaduste hindamiseks ja nende tugevuse mõõtmiseks pinge all.
- kg/CO_{2eq} - Tähistab süsinikdioksiidi ekvivalendid (CO_{2eq}) kilogrammi kohta. See on mõõtühik, mida kasutatakse süsiniku jalajälje või kasvuhoonegaaside heitkoguste mõõtmisel

- LCA - Ing. *Life Cycle Assessment* tähistab meetodit, mida kasutatakse toote või teenuse kogu elutsükli mõju keskkonnale hindamiseks alates toormaterjalide kaevandamisest ja töötlemisest kuni toote kasutamise, utiliseerimise või kõrvaldamiseni.
- LCMS - Ing. *Laser Crack Measurement System* tähistab süsteemi, mis kasutab lasertehnoloogiat teekatete pragude mõõtmiseks ja analüüsimiseks.
- Mg/m³ - Tähistab megagrammi kuupmeetri kohta.
- MPa - Tähistab megapaskalit, mis on rõhu mõõtühik rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (SI).
- MSO - Ing. *Marshall Stability and Flow* tähistab testi, mida kasutatakse asfaltsegude mehaaniliste omaduste, sealhulgas stabiilsuse ja voolavuse mõõtmiseks.
- PAV - Ingl. *Pressure Aging Vessel* tähistab seadet, mida kasutatakse bituumeni vananemise simuleerimiseks laboritingimustes.
- PE - Polüetüleen tähistab laialdaselt levivat plastiku nimetust.
- PG - Ing. *Performance Grade* on Põhja-Ameerika klassifikatsiooni süsteem, mille alusel liigitatakse bituumeneid selle toimivuse alusel erinevatel temperatuuridel.
- PMB - Ing. *Polymer Modified Bio-oil* ehk polümeer modifitseeritud bioõli.
- PPA - Ing. *PolyPhosphoric Acid* tähistab fosforhapest tugevamat ja viskkoosemat happesegu.
- PRD - Tähistab rattarootsa katsel suhtelise roopasügavuse tulemust.
- RD - Tähistab rattarootsa katsel roopasügavuse tulemust.
- RSAT - Ing. *Rotating Surface Abrasion Test* tähistab katsemeetodit, mida kasutatakse materjalide, nagu plastid, kummid, pinnakatted või muud sarnased materjalid, pinna kulumiskindluse mõõtmiseks.
- RTFOT - Ing. *Rolling Thin Film Oven Test* tähistab laboratoorset testi, mida kasutatakse bituumeni vananemise simuleerimiseks lühiajalisel kokkupuutel kõrge temperatuuri ja õhuga.
- SARA - Bituumenite põhilised keemilised grupid saab jaotada neljaks, mida nimetatakse nn SARA fraktsioonideks (ing. *Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes*).
- SB - Ing. *Sugarcane Bagasse* tähendab suhkruroo bagassi. Bagass on jäätmematerjal, mis jääb järele pärast suhkruroo mahlade väljapressimist suhkru tootmiseks.
- SBR - Stüreen-butadieen-kumm tähistab sünteetilist kummi, mis on üks levinumaid kummi sorte maailmas.

- SBS - Stüreen-butadieen-stüreen tähistab termoplastset elastomeeri, mis on loodud stüreeni ja butadieeni blokkopolümeerisatsiooni teel.
- SCB - Ing. *Semi-Circular Bending* tähistab katsemeetodit, mida kasutatakse materjalide, eriti asfaltsegude, pragunemiskindluse hindamiseks.
- SSD - Ing. *Single Sized Distribution*, mis tähendab ühtlaselt suurustatud killustiku jaotust.
- TAU - Tähistab tardkivi killustiku klassifikatsiooni.
- TG-FTIR - Ing. *Thermogravimetric Analysis with Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, tähistab analüütilist tehnikat, mida kasutatakse materjalide koostise ja termiliste omaduste uurimiseks.
- TSR - Ing. *Tension Strength Ratio* tähistab testi, mida kasutatakse asfaltsegude niiskuskindluse hindamiseks.
- TSRST - Ing. *Thermal Stress Restrained Specimen Test* tähistab katset, mida kasutatakse asfaldi segu vastupidavuse hindamiseks termilistele pingetele.
- WTS - Tähistab rattaroopa katsel roobastumise tõusu tulemust.

1. SISSEJUHATUS

Tänapäeval ja ettevaatavalt tulevikus on maailmas probleemiks ressursside nappus ja keskkonnahoid, mistõttu muutuvad jätkusuutliku arengu printsiibid üha olulisemaks. Ehitussektor, sealhulgas taristuehitus, on üks suurimaid ressursikasutajaid ja keskkonnajalajälje tekitajaid. Seetõttu on oluline leida uusi lähenemisviise, kuidas ehitada säästvalt ja vähendada ehitustegevuse negatiivset mõju meid ümbritsevale. Üks võimalus selle eesmärgi saavutamiseks on materjalide taaskasutamine.

Asfaldi tootmine on märkimisväärne ehitussektori ressurssikasutus, mis toob kaasa ulatusliku keskkonnamõju. Eesti teedehituse valdkonnas on oluliselt suurem potentsiaal keskkonnamõjude vähendamiseks, kui seda seni on tehtud, mida kinnitab ka uute keskkonnasõbralike materjalide vähene või ebapiisav kasutamine.

Üks viis looduskeskkonna hoidmiseks on kasutada biobituumenit. Kui praeguseks oleksid meil piisavad teadmised biobituumenist, mh selle tootmisest, annaks see võimaluse taaskasutada kohapeal olevaid materjale ning vähendada vajadust täiendava naftabituumeni impordi järele Eestisse. Bituumen saadakse toornafta rafineerimise tulemusena ning lisaks fossiilsele päritolule on bituumen Eestisse täielikult imporditav materjal. 2021. aasta teedehitushooajal kerkis bituumeni turuhind ning selle põhjusteks oli üldine toornafta hinnatõus maailmaturul ning Venemaa Föderatsioonile kehtestatud sanktsioonid. Lisaks hinnatõusule oli probleemiks naftabituumeni kättesaadavus tarnijatelt, mis sundis asfalditootmist peatama või asfaltsegude väljamüüki teistele turuosalistele piirama, mõjutades seeläbi tervet teedehitusektorit.

Käesoleva lõputöö põhieesmärk on vähendada teedehituse sektori sõltuvust fossiilset päritolu bituumenist, et aidata kaasa keskkonnasõbralikuma taristu arendamisele. Seetõttu plaanitakse lõputöö raames uurida biomassidest toodetud biokomponente, mis on lisatud naftabituumeni osakaalu asendamiseks või täielikult asendamaks naftabituumenit. Lisaks sellele 100% biokomponentidest toodetud biobituumeni kasutamise võimalikkust Eestis, katsetades alternatiivset asfaltsegu.

Magistritöö esimeses osas antakse ülevaade biobituumenist ning sellest, kuidas toodetakse või saadakse selle erinevaid koostisosasid. Lisaks uuritakse lähemalt biobituumeni erinevad liike. Samuti üldisemalt, milline on biobituumeni taust, millised katselõigud maailmas on juba paigaldatud ning kus need asuvad.

Lõputöö teises osas kirjeldatakse kõiki olulisi protsesse, kuidas ja milliseid laboratoorseid katseid teostati biobituumeniga. Lisaks sellele on lõputöö autor kirjeldanud laboratoorsetes katsetustes kasutatud materjale.

Lõputöö kolmandas osas kirjeldatakse biobituumenist segatava bioasfaltsegu laboratoorseid katsetusi. Täiendavalt on lõputöö autor kirjeldanud projekteeritud asfaltsegu kasutatavaid materjale.

Neljandas ja viiendas osas keskendub autor laboratoorsete katsetulemuste analüüsimisele. Biobituumeni analüüs koostati vastavalt katsetulemustele ning varasemalt teostatud uuringutele. Projekteeritud biobituumenist asfaltsegu analüüs koostati vastavalt referentssegu katsetulemuste ja seguresepti põhjal.

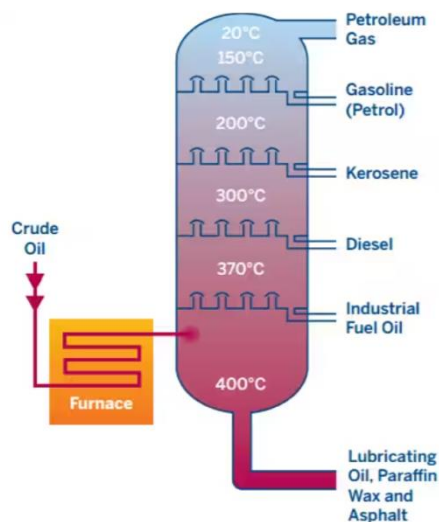
Viimases osas on autor välja toonud laboratoorsete katsetuste tulemustele tuginedes jõutud järeldustele ning andnud soovitusi edasisteks tegevusteks.

2. TEOREETILISED ALUSED

2.1 Bituumenist üldiselt

Bituumenit kasutatakse Eestis peamiselt teedehituses asfaltsegu sideainena. Põhilised kasutusala on maanteed, linnatänavate ja muude sõiduteede ehitamine ja remontimine. Seda kasutatakse peamiselt kolmel põhjusel, milleks on vastupidavus, pikaealisus ja ökonoomsus. Bituumen on võrreldes teiste teekatematerjalidega, nagu betoon, suhteliselt odav. Samuti on bituumeni paigaldamine ja hooldamine lihtsam, mis teeb selle populaarseks valikuks avaliku- ja erasektori teeprojektides.

Bituumenit toodetakse toornaftast, mis on tekkinud maapõues looduslike protsesside tulemusel. Toornafta, mida tuntakse ka lähteproduktina, säilitatakse rafineerimistehases suurtes mahutites, mis suunatakse edasi soojusvaheti kaudu erinevate naftaproduktide eraldamiseks eraldi rafineerimistorni (Joonis 2.1). Toornafta kuumutamise tulemusel algab erinevate naftaproduktide füüsiline lahknemine. Protsessi käigus tõusevad mahutis kergemad osised, nagu lahustid ja kergemad kütused, ülespoole. Samal ajal, kui raskemad osad, näiteks rasked kütused ja õlid, laskuvad allapoole. Protsessi lõpp-produkti, mis settib vaakumdestillatsioonitorni põhja, nimetatakse bituumeniks. [1]



Joonis 2.1 Toornafta rafineerimise protsess ja bituumeni tootmine [2]

Bituumen on must, pehme ja viskoelastne materjal, mis saadakse jäägina toornafta destilleerimisel, muutudes jahtumisel üsna kõvaks. See on termoplastne materjal, mida saab töödelda ja segada täitematerjalidega, et luua erinevaid asfaltseguisid. Bituumen on

viskoelastne sideaine, mis koosneb peamiselt suure molekulmassiga rasketest süsivesinikest (82,8 % süsinikku, 10,2 % vesinikku, 0,7 % hapnikku, 0,7 % väävel, keskmiselt 3,8 % lämmastikku). [3]

Bituumenit kirjeldatakse teaduskirjanduses kui kolloidset dispersiooni, milles polaarsed asfalteenid asetsevad mittepolaarsete ühendite (malteenide) sees/vahel. Bituumenit on jagatud kahte eraldi keemilisse gruppi, sõltuvalt osakeste lahustuvusest mittepolaarsetes lahustites. Eelnevalt kirjeldatud kahte gruppi nimetatakse asfalteenideks ja malteenideks. Malteenid jagunevad omakorda kolme eraldi gruppi, milleks on aromaatsed ja küllastunud ühendid ning vaigud. Koos asfalteenidega kutsutakse neid kokkuvõtvalt SARA fraktsioonideks (ing. **Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes**). [1]

Bituumeni toimivust määratletakse füüsiliste, mehaaniliste, keemiliste, morfoloogiliste või reoloogiliste omaduste alusel. Bituumeni voolamise või deformatsiooni uurimist erinevatel temperatuuri-, pingekoormus- ja koormustingimustel (või sagedusel) nimetatakse reoloogiaks. [1]

Adhesiooniks nimetatakse bituumeni omadust, kus bituumen nakkub või kleepub teiste pindade või osakeste külge. See sõltub bituumeni keemilisest olemusest, eriti selle polaarsusest ja asfalteenide fraktsioonidest. [1]

Bituumeni omadust, kus ta on kuumutamisel pehme ja jahutamisel taas kõva, ilma et see muudaks märkimisväärselt tema omadusi, nimetatakse termoplastilisuseks. Termoplastilisus võimaldab bituumenil voolata, olla pumbatav ja töödeldav. [1]

Bituumeni vananemise käigus muutub selle keemiline koostis ja molekulaarstruktuur. Oksüdatiivseks vananemiseks kutsutakse protsessi, milles bituumen reageerib kokkupuutel hapnikuga, viies selle keemilise koostise muutumiseni ja omaduste halvenemiseni. See nähtus vähendab teekatte eluiga ja toimivust. [1]

Bituumen vananeb füüsiliselt tingituna aja kulgemisest, põhjustades bituumeni kõvenemist. SARA fraktsioonid muutuvad vananemise tagajärjel. Näiteks asfalteenide suurenemisel muutuvad mõned fraktsioonid järgmiseks rühmaks, küllastunud osakesed muutuvad aromaatideks, aromaadid muutuvad vaikudeks ja vastupidi. Lõpuks muutub bituumen hapramaks ning kergesti purunevaks. [3]

2.2 Biobituumenist üldiselt

Kokkuvõtvalt erineb biobituumen traditsioonilisest naftabituumenist koostisosade poolest. Biobituumen on kas täielikult valmistatud bioloogilistest komponentidest või sisaldab see naftabituumenit, millele on lisatud biolisandeid (bioõlid, ligniin jne). Biobituumeni bioloogilised komponendid nagu bioõli, ligniin, on saadud biomasside jääkide ümbertöötlemisena. Lisandina saab juurde lisada ka looduslikku vaiku. [3]

Biobituumen võib olla jätkusuutlik asendaja traditsioonilisele naftapõhisele bituumenile, mille tootmiseks ja arendamiseks on mitmeid viise. Biobituumeni tootmisviisidest tulenev mitmekesisus võimaldab biobituumenil leida laia kasutust erinevatel eesmärkidel, sealhulgas teedehituses. Järgnevalt on autor välja toonud mõned peamised biobituumeni liigid, sõltuvalt kasutatavatest lähtematerjalidest ja tootmisviisidest:[3]

- 1) Ligniini põhise komponendiga biobituumen (ligniini osakaal kuni 50 % naftabituumenis);
- 2) Bioõli põhise komponendiga biobituumen (bioõliga asendatud osakaal naftabituumenis);
Bioõli põhine biobituumen (100 % biokomponentidest biobituumen). [3]

2.2.1 Ligniini põhise komponendiga biobituumen

Ligniini, mis on teine kõige rohkem levinud looduslik biopolümeer pärast tselluloosi ning oluline komponent taimerakkude seintes, saab kasutada biobituumeni tootmiseks. [6]

Puidu biomassist moodustab ligniin 20-30 % ning okaspuit sisaldab veidi rohkem ligniini kui lehtpuit. Ligniin toimib nagu liim, mis hoiab koos tselluloosi. Tselluloosi ja paberi tootmiseks tuleb puidust tselluloos ligniinist eraldada. Tänapäeval toodetakse tselluloosi peamiselt kraft- ehk sulfaattehnoloogia abil. [6]

Tööstuses on ligniin tootmisprotsessi kõrvalprodukt. Tselluloosi tootmisega tegelevad tehased kasutavad sageli biomassist eraldatud ligniini kütusena, et toota energiat oma tegevuse tarbeks. Ligniini potentsiaalsed kasutusalaad hõlmavad liime, õlisid, vaikusid ja plaste. Biomaterjalina on ligniinil suur tulevikupotentsiaal, kuid praegusel hetkel ei ole see tööstuses veel laialdaselt kasutusel. Seetõttu on ligniini väärimine ja uute kasutusvõimaluste otsimine taastuva biopolümeeri jaoks muutunud aktuaalseks. [6]

Ligniini bituumeni tootmisel on tänaseks maailmas üsna head ja levinud kogemused. Juba aastakümneid on uuritud ligniini kasutamist bituumeni asendaja või modifikaatorina, mis on kaasa toonud palju teemakohast kirjandust. Järgnevalt on lõputöö autor välja toonud mõningatest uurimustöödest selgunud laboratoorsete katsetuste tulemusel selgunud järeldused. [6]

Xie poolt läbiviidud laborikatsetuste tulemused näitasid, et kraft ligniiniga modifitseeritud bituumen vähendab teekatte ebatasasusi, kuid suurendab pragude teket madalatel temperatuuridel. Samuti avastati, et teatud ligniinifraktsioonid parandavad modifitseeritud bituumeni temperatuuriomadusi ja vastupidavust vananemisele. [7] Batista ja tema meeskond jõudis järeldusele, et naftabituumen, millele lisati kraft ligniini 1 %, 4 % või 6 % ulatuses, saadi modifitseeritud sideaine, millel on väiksem tõenäosus tekitada teekattes roopaid kõrgetel temperatuuridel. Lisaks leiti, et vähenes risk temperatuuripragude tekkeks madalatel temperatuuridel ning suurenes vastupidavus fotodegradatsioonile (materjali lagunemine, muundumine UV-kiirguse mõjul). [8] Vastavalt Xu seisukohale, kui lisada puidust saadud ligniinipulbrit naftabituumenile 5 % või 10 %, kaasneb sellega sideaine jäigastumine. Lisaks märgati, et ligniiniga modifitseeritud naftabituumen näitas paremat vastupidavust teekatte ebatasasuste tekkele kõrgel temperatuuril, paranesid vananemisomadused ja langes väsimuskindlus. [9] Wu ja tema kolleegid kasutasid tselluloosi- ja paberitööstusest pärit ligniini, kus naftabituumeni mahust asendati massisuhtega 20 % ligniiniga. Täheledatai, et ligniini lisamine muutis bituumeni kõvemaks, mis väljendus penetratsiooni ja elastsuse vähenemises. Lisaks sellele tõusis pehmenemistäpp ja kompleksmoodul. Vananemiskindlus vähenes lühiajaliselt, siis pikema perioodi jooksul paranes see 27 %, võrreldes tavapärase naftabituumeniga. [10]

2.2.2 Bioõli põhise komponendiga biobituumen

Biobituumen, mis on kokku segatud naftabituumenist ja bioõlist, on sideaine, kus bioõli on valmistatud biomassidest. Sellist biobituumenit toodetakse tavaliselt, segades naftabituumenit bioõliga kindlas proportsioonis, et saavutada soovitud omadused ja kasutusvaldkonnad. Hilisemalt on võimalik segada antud liiki biobituumen täitematerjalidega ning toota bioasfaltsegusid. Bioasfalti toodetakse naftabituumeni asendamisel või modifitseerimisel biosideainega. [4]

Bioõlidel on palju erinevaid nimetusi nagu biotoornafta, pürolüüsiõli/vedelik, puiduvedelik jne. Bioõli on omamoodi pruun, must või tumemust vedelik, mis on toodetud erinevast

biomassist ensüümide muundamise, pürolüüsi või kõrgsurve vedeldamise teel, mille tulemusel tekib kõrgelt oksüdeerunud segu. [4]

Bioõlide tootmiseks eksisteerib palju erinevaid biomasse. Puitunud päritolu biomassi alla kuuluvad juured, lehed, saepuru, laastud, koor, graanulid jne. Rohtse- ja põllumajandusliku päritolu biomassi alla kuuluvad munakoored, kestad, puuvillad, terad, kiud, varred ja tõlvikud. Neid jääke toodavad rohttaimed, köögiviljad, mais, raps, päevalill jne. Lisaks sellele tekivad antud valdkonnas jäätmetena puuvillaõli jäägid, maisiõli jäägid, sojaoa jäätmed ja seemned. Saastunud ja tööstusliku biomassi alla kuuluvad muda, lammutuspuit, pabermass, vanapaber, papp, puitkiudplaadid, vineer. Lisaks eelnevale on ka looduslikud kiud ja ligniin tahke biomaterjal. [3]

Bioõlisisid saab naftabituumeni osakaalu minimaliseerimiseks kasutada kolmel viisil:

1) modifikaatorina (kuni 10 % mahust); 2) bituumeni eluea pikendajana (25-75 % mahust); 3) alternatiivse sideainena (100 % naftabituumeni mahust). [4]

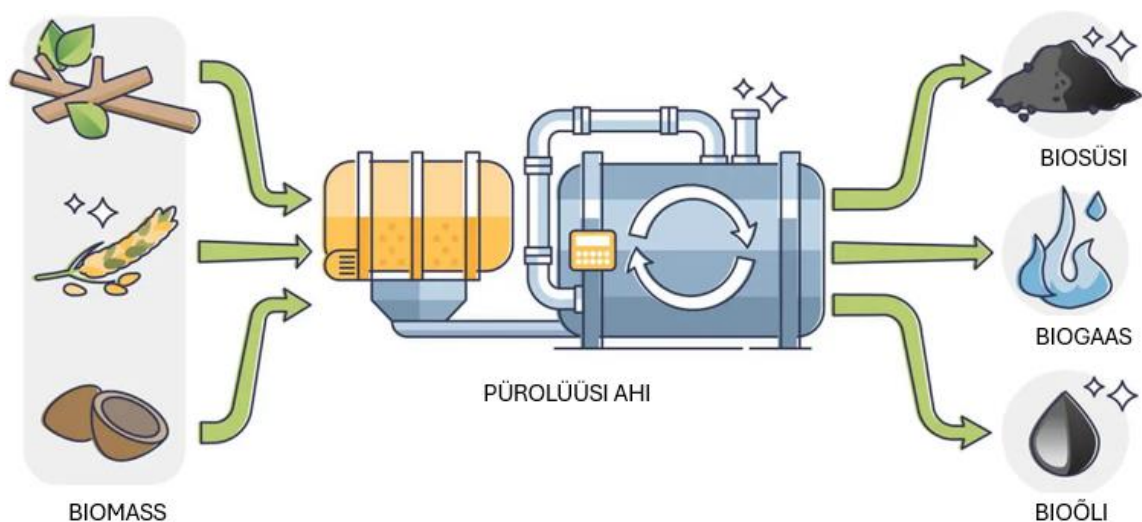
2.2.2.1 Enim kasutatud tehnoloogiad bioõlide tootmiseks

Üldistatult on võimalik eristada tahkeid ja vedelaid biomaterjale. Naftabituumenis sobiva bioõli kasutamiseks ja saamiseks on kaks peamist varianti: 1) värskete taimsete või põllumajandus biomasside pressimine; 2) hüdrotermiline vedeldamine või pürolüüs, millest viimane on enim uuritud ja kasutatud tehnoloogia bioõlide tootmiseks (Joonis 2.2). [3]

Pürolüüs on termokeemiline protsess ja seda peetakse kõige efektiivsemaks viisiks bioõli tootmisel. Sõltuvalt pürolüüsi temperatuuride, kuumutuskiiruste ja aja kestuse erinevustest, võib pürolüüsi tehnoloogia jagada nelja tüüpi: 1) aeglane pürolüüs (<400 °C); 2) traditsiooniline pürolüüs (<500 °C); 3) kiirpürolüüs (<600 °C); 4) valkpürolüüs (>600 °C). Erinevate uuringute põhjal on täheldatud, et kiirpürolüüs ning valkpürolüüs on parimad meetodid suurema saagikusega bioõli tootmiseks. [14]

Uuringud on näidanud, et enamiku biomassi raskeõlide ettevalmistamise temperatuur on üle 300 °C. [15] Erinevat tüüpi biomasside puhul eksisteerib teatud erinevus pürolüüsi temperatuuri ja rõhu osas. Näiteks Cituta ja tema kolleegid tegid tööd optimaalsete tootmistingimuste leidmiseks biomassist saadava raskeõli **suhkruroo bagassist** (SB ehk *sugarcane bagasse*) ja **tühjadest palmiviljakobaratest** (EFB ehk *empty fruit bunch*). Leiti, et parimate töötingimuste korral (temperatuur 560 °C, gaasi viibimisaeg 77 s ja osakeste suurus 0,5–0,85 mm) saadi SB puhul bioõli saagis 53,4 massiprotsenti. Samal ajal saadi EFB puhul parimate töötingimuste korral (temperatuur 540 °C, gaasi viibimisaeg 31 s ja osakeste suurus <0,5 mm) bioõli saagis 48,4 massiprotsenti. [16] **Riisikoorte**

optimaalne temperatuur pürolüüsi protsessis oli üldiselt vahemikus 400–700 °C. Kui protsessi temperatuur oli 450 °C juures, saadi 70 massiprotsenti bioõli saagis, kuna massi ja soojust oli suurel hulgal. [17] Lisaks on tootnud riisikoortest bioõli Guo, saagiga 46,36 massiprotsenti, temperatuuril 450–550 °C. [18] Abnisa leidis, et **palmipuukoorte** puhul saadi bioõli saagis 47,3 massiprotsenti temperatuuril 500 °C, 60 min reaktsioonaja juures. [19] Fini ja tema kolleegid muundasid **sea sõnniku** bioõliks temperatuuril 304 °C, rõhul 10,3 MPa ja reaktsioonijal 80 min saagis oli 70 massiprotsenti [21], täiendavalt andsid Mills Beale pürolüüstehnoloogia katsetused sea sõnnikust saadava bioõli parima saagise protsendi temperatuuril 380 °C, kus rõhk oli 40 MPa [22]. Fan ja tema kolleegid tootsid bioõli **epoksiidijäätmeplaatidest**. [23] Yang ja You muundasid **olmeprügi** bioõliks ja tootsid seejärel bioõlist raskebioõli vaakumkeskkonnas temperatuuril 500 °C. [25] Zheng muundas sügavkatalüütilise lõhustamise abil **toiduõli** bioõliks temperatuuril 540 °C, reaktsioonijaga 70 min. [26] Wan tootis **mikrovetikatest** bioõli mikrolaine pürolüüsimetodil. [27] Didem tootis edukalt bioõlised **mandlist, sarapuupähklist, viinamarjadest ja kastanitest**. [28] Yan tootis bioõli **pähklitest**, kiirpürolüüs meetodil temperatuuril 600 °C, kuumutuskiirusel 60 °C/min, reaktsioonijaga 30 min. [29] Raouf ja tema kolleegid tootsid bioõli **tammepuidust** kiirpürolüüs meetodi abil. [30] Liao tootis bioõli **puuvillaseemnest ja sojaubadest** destilleerimise ja oksüdatsiooni tehnoloogia abil. [31] Mohd ja Wang on järeldanud, et temperatuuril on kõige märkimisväärsem mõju bioõli saagisele. [20]



Joonis 2.2 Bioõli tootmine pürolüüstehnoloogia teel [32]

2.2.2.2 Bioõli põhise komponendiga biobituumeni toimivus

Bioõli põhise komponendiga biobituumeni toimivusomadusi hinnates on jõutud üldisele arusaamale, kus antud biobituumeni kõrgtemperatuuriline toimivus on halvem kui puhtal naftabituumenil. Lisaks sellele on leitud, et paljud erinevad bioõlid parandavad madalatemperatuurilist toimivust. Neid väited on uuritud järgnevalt:

Wang jõudis järeldusele, et nõelpenetratsioon suurenes koos saepurust toodetud bioõli segamisprotsendi suurenemisega. [40] Pan väitis, et naftabituumeni nõelpenetratsioon suurenes ligikaudu 20 (0,1 mm) iga 10 % bioõli lisamisega. [41] Wangi teatel vähenes pehmenemistäpp koos saepurust toodetud bioõli segamisprotsendi suurenemisega. [40] Pan väitis, et naftabituumeni pehmenemistäpp vähenes ligikaudu 1 °C iga 5 % bioõli sisalduse lisamisel. Pan järeldas, et bioõli põhise biobituumeni lisamine vähendas asfaltsegu võimet taluda kõrgtemperatuurilisi deformatsioone. [41] Wang leidis, et sigade sõnnikust pärit bioõli võiks parandada asfaltsegu kõrgtemperatuurilist toimivust. [40]

Wen viis läbi nihkekiiruse teste ja sai erinevate toiduõlide baasil erinevaid CESD (*critical strain energy density*) väärtusi. CESD väärtused kirjeldavad bituumeni deformatsiooni-kõvenemisprotsessi käigus ruumalaühiku kohta hajunud energiat. Toiduõli jäätmetest toodetud bioõli lisamine naftabituumenile, vähendas naftabituumeni CSED väärtusi, mis viitas Wen arvates sellele, et bioõlil põhineva biobituumeni vastupanu väsimuspragudele vähenes. [42] Riitsinusõli baasil toodetud biobituumenit katsetati pikaajalise vananemisprotsessiga (PAV). Laboratoorsete katsetuste tulemusel järeldati, et riitsinusõlist toodetud bioõli suureneva sisaldusega naftabituumeni osakaalust, paranes biobituumeni vastupanu väsimuspragudele. [40] Lisaks leiti, et puuvilla- ja sojapõhistest bioõlidest biobituumenil suureneb väsimuskindlusetegur temperatuuri vähenedes. Puuvilla- ja sojaoa biomassist toodetud bioõli parandas naftabituumeni väsimuskindlust. [31]

Joonisel 2.3 on välja toodud näited erinevatest bioõli põhise komponendiga naftabituumenitest, millele teostati purunemistemperatuuride välja selgitamiseks laboratoorsed uuringud. 10 % bioõli lisamine vähendas oluliselt PG 64–22 kriitilist purunemistemperatuuri 4,6–4,9 °C võrra. Kriitiline purunemistemperatuur vähenes bioõli sisalduse suurenedes. Vaadates biobituumenit tähistusega PG 58–28, siis sealt selgus, et tavaline puidupõhine bioõli oli sobivam modifikaator naftabituumenile kui nõ „kuivatatud“ puidupõhine bioõli (*dewatered wood bio-oil*). Polümeermodifitseeritud puidupõhine bioõli (*polymer modified wood bio-oil*) parandas madalatel temperatuuridel toimivust. [14]

Types of bio-bitumen	Proportion of bio-asphalt	Cracking temperature (°C)
PG 64-22 + swine manure	0%	-31.7
	2%	-33.1
	5%	-34.7
	10%	-36.3
PG 58-28 + original wood bio-oil	5%	-19.8
	10%	-17
PG 58-28 + dewatered wood bio-oil	5%	-16.9
	10%	-15.6
PG 58-28 + polymer modified wood bio-oil	5%	-17.9
	10%	-16

Joonis 2.3 Erinevate biobituumenite pragunemistemperatuurid. [14]

2.2.2.3 Bioõlist toodetud bioasfaltsegude toimivus

Asfaltsegu on komposiitmaterjal, mis koosneb kolmest peamisest osast: tahketest täitematerjalidest, viskoelastsest bituumenist ja õhutühikutest. Bituumen mängib olulist rolli asfaltsegude toimivuse osas, mistõttu on vajalik hinnata biobituumeni mõju asfaltsegu toimivusele.

Songi poolt läbi viidud uurimus näitas, et bioõli põhine biobituumenist asfaltsegu näitas head kõrgetemperatuurilist toimivust. Ühelt poolt parandas bioõli kõrgem viskoossus biobituumeni ja täitematerjalide adhesiooni, suurendades samal ajal nende nihketugevust. Teiselt poolt leidis Song, et bioõli põhisel biobituumenil tõusis pehmenemistäpp. Lisaks soovitas Song, et kui dünaamiline stabiilsus ületab 6000 korda/mm, tuleks läbi viia madalatemperatuuriliste omaduste määramiseks madalatemperatuuriline katsekehade paindetest (BBR), et vältida bioasfaltsegude purunemist madalal temperatuuril. [44] Mohammad leidis männipuulaastudest valmistatud bioõli sisaldava asfaldisegu roobaste sügavuse märkimisväärse vähenemise, mis näitab, et männipuulaastudest valmistatud bioõli võib parandada roobaste tekke vastupanuvõimet. [45] Xu testis asfaltsegu roopa sügavusi, mille bioõli põhine sideaine valmistati puidu jäätmetest. APA (*asphalt Pavement Analyzer*) katsetes selgus, et antud tüüpi bioõlil oli negatiivne mõju asfaltsegu kõrgetemperatuurilisele toimivusele. Teatud uuringud on näidanud, et polümeer võiks parandada bioõli põhise sidainega asfaldisegu kõrgetemperatuurilist toimivust. [46] [47] Lu vaatles biobituumeni pragunemistemperatuuri, mille tulemusi otsis ta TSRST (*thermal stress restrained specimen test*) testi kaudu, et hinnata puidupõhist bioõli sisaldavat bioasfaltsegu madalatemperatuurilist toimivust. Selgus, et võrreldes naftabituumenist segatud asfaltseguga, suurenes bioõliga modifitseeritud asfaltsegu pragunemistemperatuur 15 % kuni 50 % võrra. [48] Mohammad leidis, et männipuust

toodetud bioõlist valmistatud biobituumenist asfaltsegu pragunemistemperatuur oli -22 °C, mis oli väiksem kui katsetatud naftabituumenist asfaltsegu oma. Mohammed järeldas, et bioõlist valmistatud biobituumenist asfaltsegu näitas head madalatemperatuurilist toimivust. [46] Peralta kasutas SCB (ing. *semi-circular bending*) testi, et analüüsida kummipuruga segatud asfaltsegu madalatemperatuurilist toimivust, mis lisaks sisaldas tammepuidust saadud bioõli. Ta leidis, et katsekeha põhjas tekkiv maksimaalne tõmbepinge tõusis, mis näitas, et biobituumenil võib olla hea pragunemisvastane omadus madalatel temperatuuridel. [49] Yang viis läbi väsimuskindluse katse, et määrata bioõli põhise biobituumenist tehtud asfaltsegu väsimuskindlust. Tulemused näitasid, et see parandas oluliselt asfaltsegu väsimuskindlust. [25]

Halb veekindlus võib põhjustada bioasfaldi ja killustiku eraldumist ning seejärel tekitada asfaltkattesse kahjustusi, milleks on näiteks aukude teke. Song ja Ma leidsid MSO (ing. *Marshall stability*) ja TSR (*tension strength ratio*) katsetega, et bioõli põhise biobituumeniga tehtud asfaltsegud vastasid nõuetele, kuigi soovitasid veekindlust parandada. Lisaks uuris Ma bioasfaltsegude toimivust, milles sisalduv bioõli oli pärit tammeterudest ning mille tulemused näitasid, et TSR väärtused vastasid samuti nõuetele. [44] [50]

2.2.3 100% biopõhiste komponentidega biobituumen

100 %-lise biokomponentidest biobituumeni teadus- ja arendustegevus on etapis, kus mitmed uurimisgrupid ja ettevõtted üle maailma töötavad erinevate tootmistehnoloogiatega. Kuna biobituumenite arendamine on tõusnud maailmas aktuaalseks, siis näiteks Hollandis Wageningeni ülikoolis tehtava uurimistöö raames arendatakse täielikult biopõhist sideainet, mis pärineb paberi- ja tselluloositööstuse ning põllumajandus- ja toiduainetööstuse kõrvalproduktidest. Kuigi 100% biopõhise biobituumeni arendamine on veel pooleli, on Hollandis ja Saksamaal olemas tugev teadus- ja arendustegevus, mis toetab selle teostatavust ja potentsiaalset rakendamist tulevikus.

Richard Gosselink (biobituumeni arendustegevuse juht Wageningeni ülikoolis) on öelnud, et peamine eesmärk on, et uuel biosideainel oleks vähemalt samad funktsionaalsed omadused kui naftabituumenil. Funktsionaalsete omaduste saavutamiseks otsitakse uusi kombinatsioone bioloogilistest molekulidest. Uuringud keskenduvad esmalt laboratoorsetele uuringutele, et leida õigeid molekulide vahelisi kombinatsioone. Tema sõnul tuleb muuta mitmeid keemilisi komponente, et anda 100% biobituumenile soovitud funktsionaalsed omadused võrreldes naftabituumeniga. [56]

Tuleb tõdeda, et 100 %-lise biokomponentidest biobituumeni kasutamisel ja tootmisel tekivad mitmed väljakutsed, mis tulenevad nende keemilisest koostisest ja füüsikalistest omadustest. Peamised põhjused, miks bioõlisid ei saa kohe biobituumeni tootmiseks kasutada ja miks neid tuleb sageli edasi töödelda, on järgmised:

1. **Keemiline stabiilsus:** bioõlid, mis on saadud orgaanilise biomassi pürolüüsist või muudest termokeemilistest protsessidest, sisaldavad kõrgeid hapnikusisaldusega komponente, nagu fenoolid ja aldehüüdid. Need ühendid on keemiliselt reaktiivsed ja võivad aja jooksul põhjustada biobituumeni toimivuse langust.
2. **Viskoossus:** bioõlid on sageli kõrge viskoossusega, võrreldes fossiilset päritolu bituumeniga. Nende füüsikalised omadused muudavad need sobimatuks otse kasutamiseks teedehituses.
3. **Vee sisaldus ja heterogeensus:** bioõlid sisaldavad tihti vett ja muid lenduvaid komponente, mis võivad mõjutada bituumeni kvaliteeti ja töötlemist. Veesisaldus võib põhjustada emulgeerumist ja stabiilsuse probleeme. [14]

Tulenevalt vähesest infost teadusartikkelites on täna teada vaid see, et 100%-lise biokomponentidest biobituumeni tootmise jaoks tuleb rakendada erinevaid protsesse, et muuta biomassidest toodetud bioõlid sobivaks biosideaineks. Erinevate protseduuride käigus muundatakse bioõlid raskebioõlideks. Destilleerimine, ekstraheerimine, oksüdatsioon ja polümeermodifitseerimine on osad näited nendest protsessidest.

Destilleerimismeetodi põhimõte on järgmine: vastavalt bioõli komponentide erinevatele keemistemperatuuridele saab kvaliteetset bioõli toota kergete komponentide eraldamisel kõrgtemperatuurse destilleerimise teel. Destilleerimismeetodit on lihtne kasutada ja see on odav. Destilleerimismeetodi põhieesmärk on bioõlist kergemad komponendid välja tõmmata ja tekkiv toormaterjal edasi saata edasiseks töötlemiseks muude töötlemismeetoditega. Üldiselt tuleb seda kasutada koos oksüdatsioonimeetodi ja modifitseerimismeetodiga. [33]

Ekstraheerimise oksüdatsioonimeetodil saadakse biosideaine kahes etapis: esiteks kasutatakse bioõli ekstraheerimiseks eelnevalt välja töödatud keemilist lahustit sihtkomponentide saamiseks. Seejärel töödeldakse neid komponente termokeemiliselt, millest tulenevalt võib saada biosideainet. Kui destilleerimisel saadud bioõli sideaine ei vasta nõuetele, näiteks on vaja parandada sideaine kõvadust, pehmenemistemperatuuri ja viskoossust, võib kasutada ekstraheerimise oksüdatsioonimeetodit. [33]

Polümeeri modifitseerimise meetodit kasutatakse biosideaine saamiseks, lisades bioõlile vajatud toimivuse saavutamiseks polümeeri modifikaatorit. Peamised biosideaine

modifikaatorid on SBS (stüreen-butadieen-stüreen), SBR (stüreen-butadieen-kumm), PE (polüetüleen), kummipulber jne. Fini kasutas polüfosforhapet (ing. *PolyPhosphorus Acid, PPA*) seasõnnikust saadud bioõli modifitseerimiseks biosideaine valmistamiseks ja jõudis järeldusele, et PPA lisamine võib oluliselt parandada biosideaine toimimist kõrgel temperatuuril, kuid selle toimivus madalal temperatuuril, ei paranenud. [33]

2.3 Riikide kogemused biobituumeniga

2.3.1 Ligniini sisaldava biobituumeniga teostatud katselõigud

2.3.1.1 Hollandi kogemus

Holland on maailmas juhtiv riik biobituumeniga segatud asfaldi kasutamisel, kus aastatel 2015-2023 on paigaldatud üle 30 katselõigu. Ligniiniga asendatav osa naftabituumenist ulatub kuni 50 %-ni. Esimene, 70-meetrine bioasfaldi lõik rajati 2015. aastal Sas van Gentis. Ligniinasfaldi potentsiaali tõttu käivitati Chaplini programm (*Collaboration in aspHalt Applications with LIgnin in the Netherlands*), mis keskendus sektoriteülese väärtusahela loomisele ja ligniinasfaldi arendamisele. Programmi teine faas, Chaplin XL (Extra Lignin) on nüüdseks lõppenud ning edasiselt keskendutakse uute biobituumenist sideainete loomisele. [11] [6]

Programmi raames kogutud teadmised näitavad, et ligniiniga on võimalik saavutada kuni 50 %-line naftabituumeni asendamine, mis võimaldab CO₂ heitmete vähenemist 35-70 % pealmistes ja 25-50 % alumistes asfaldikihtides. Samuti leiti, et ligniiniga asfaltsegu on hästi töödeldav ja tihendatav. Negatiivse poole pealt toodi välja, et ligniini, kui alternatiivse sideainega, ei ole võimalik täielikult asendada naftabituumenit. [11] [6]



Joonis 2.4 Ligniini põhise asfaltiga testlõik N987 Siddebureni ja Wagenborgeni vahel [12]

2.3.1.2 Kanada kogemus

Kanada seadis eesmärgiks kasutada ligniini bituumensideaine asendajana. Ettevõtte FP Innovations, mis on keskendunud Kanada metsandussektori jätkusuutlikuse säilitamisele, alustas arendustöid, mille tulemusena viidi läbi laboratoorsed katsetused École de Technologie Supérieure'i ülikoolis Montrealis. Katsetustes keskenduti optimaalse ligniini ja naftabituumeni suhte, segamisaja, temperatuuri ja sobivaima segamiseadme leidmisele. Ligniini asendusmäärad olid vastavalt 10 %, 20 %, 30 % ja lisakatsetena 50 %. Lavali ülikool Quebecis tegi katseid koostöös ettevõtte FP Innovations'ga, jäljendades raskeveokite mõju teekatenditele, võimaldades leida pikema ajalise mõju tagajärjel tekkivaid koormusi mõne nädalaga. Esialgsete laboratoorsete katsetuste tulemusel paigaldati kolm katselõiku erinevatesse Kanada linnadesse, et kinnitada või ümber lükata ligniinipõhise asfaldi lubavad tulemused laboris saadud katsetuste põhjal. [6]



Joonis 2.5 Kanadas ligniinipõhise asfaltsegu paigaldamine [13]

2.3.1.3 Eesti kogemus

2023. aastal paigaldati Eestis ligniinipõhise komponendiga biobituumenist toodetud asfaltsegu Imaverre, ettevõtte Fibenol tehaseplatsile (Joonis 2.6). Fibenol tegeleb uuenduslike ja jätkusuutlike ligniinipõhiste materjalide tootmisega. Fibenol keskendub biomaterjalide ja kemikaalide arendamisele ning tootmisele, pakkudes alternatiive fossiilkütustel põhinevatele toodetele. Nende peamine eesmärk on edendada ringmajandust ja vähendada keskkonnamõju, kasutades ligniini. Koostöös Verstoniga, Eesti teedehituse ettevõttega, asendati 25 % asfaltsegu sisalduvast fossiilpõhisest bituumenist Fibenoli poolt toodetud ligniin tootega LIGNOVA'ga. Tallinna Tehnikaülikooliga (TalTech) aitas koostada bioasfaltsegu retsepti ning teostas hilisemalt laboratoorsed katsetused. [57] Lisaks sellele on Eestis paigaldatud ligniinipõhise komponendiga biobituumenist asfaltsegu lõik ka Ülemiste keskuse parklasse.



Joonis 2.6. Fibenoli tehaseplatsile paigaldatav ligniinipõhise komponendiga biobituumenist toodetud bioasfaltsegu [57]

2.3.2 Bioõli sisaldava biobituumeniga teostatud katselõigud

2.3.2.1 Hollandi kogemus

Holland on tänaseks Euroopa turul kõige suuremate teadmistega riik, kus on katsetatud erinevaid bioõli põhiste komponentidega biobituumeneid. Lõputöö autor toob järgmisena välja kaks 100 %-lise biokomponentidest biobituumeni paigaldamisega seotud ettevõtet.

Ventraco Innovatsioonikeskus on töötanud välja nutikaid lisandeid asfaldi ja bituumeni modifitseerimiseks. Nende lisandid on tuntud kaubamärgi all *Rheofalt*. Nende kõige uusimaks tooteks on *BioBit*, ehk teisisõnu biobituumen. Ventraco Innovatsioonikeskus töötab välja biopõhise bituumeni *BioBit*, mille loodusliku tooraine sisaldus on väidetavalt üks kõrgemaid turul, kuni 100 %. Antud biobituumen koosneb taimsete vaikude segust looduslike rasvhapete estritega, mis on segatud loodusliku kõva bituumeniga. [52] Kahjuks puuduvad tänaseks edasised teadmised ja katsetused antud biobituumeni osas.

Alates 2003. aastast on ettevõtte Esha teinud tihedat koostööd juhtivate kohalike teedeehitus ettevõtete ja ülikoolidega biopõhiste materjalide uurimis- ja arendustegevuse alal. Nende uusim toode, mida saab nimetada 100 % biobituumeniks, on *Freebit*. *Freebit* koosneb erinevatest taastuvatest toorainetest ning on bioloogiline ja jätkusuutlik alternatiiv bituumenile. *Freebit* on toodetud vastamaks standardile EN 15804, mis on üldine keskkonnadeklaratsioonide koostamise standard. [53] Esha *Freebit* biobituumenist

on edasi arendatud toode nime *Harsfalt*, ehk teisisõnu vaikasfalt, milles naftabituumen on asendatud 100% bioloogilise sideainega. Naftabituumeni asemel lisatakse asfaldile biobituumenit, mis sisaldab orgaaniliste õlide, vaigu ja ligniini segu. 100% bioloogilise sideainega asfaltsegu välja töötamise algatajateks olid kohalikud ettevõtted Mourik Infra, NTP, Versluys Group, Vermeulen Group ja ReintenInfra. Esha tarnis bioloogilist sideainet, Miscancell looduspõhist ligniini ja fillerit asfaltsegude jaoks. Koostöös Asfalt Kennis Centrum (Asfaldi Teadmiste Keskusega) töötati koos välja nõuetele vastav asfaltsegu. [54]

Asseni ja Oude IJsselstreeki valdadesse on ehitatud vastavalt 500 m ja ühe kilomeetri pikkused katselõigud. Liiklus toimib nendes lõikudes juba üle nelja aasta. Antud lõikudel jälgib Asfaldi Teadmiste Keskus asfaltkatte vananemist tulenevaid muudatusi ja deformatsioone. Antud lõikudes teostatakse LCMS (ing. *Laser Crack Measurement System*) -mõõtmisi, RSAT (ing. *Rotating Surface Abrasion Test*) -uuringuid ja reoloogiliste omaduste uuringuid biobituumenile. [54]



Joonis 2.7 Harsfalti (vaikasfalt) paigaldamine [55]

2.3.2.2 Saksamaa kogemus

Saksamaal on tänaseks ettevõtted B2Square ja Biofabrik välja arendanud toote nimega BioBitumen (biobituumen). Koostöös ettevõttega MHI AG paigaldati biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu, milles kasutati 85 % freespuru, sideainena 3,7 % vananenud sideainet, millele lisati 15 % uut täitematerjali ning 1,5 % biobituumenit (Joonis 2.8). Ettevõtete sõnul ei ole biobituumenil põhinev bioasfalt tavapärasest asfaldist visuaalselt eristatav. Väga erinev oli aga bioasfaldi paigaldamise temperatuur (umbes 120 °C), tavalist naftabituumenil põhinevat asfaltsegu paigaldatakse tavaliselt temperatuuril 150 °C ja rohkem. B2Square väidab, et biobituumenil põhinevat asfaltsegu saab veel ideaalselt tihendada 115 °C juures, olles seejuures "soe", mitte enam "kuum" asfaltsegu. [51]



Joonis 2.8 B2Square asfalditootmistehase tee asfalteerimine 100 % biopõhistel komponentidel põhineva biobituumenist asfaltseguga [51]

2.4 Biobituumeni kasutamise mõju keskkonnale

Biobituumen on keskkonnasõbralik alternatiiv tavapärasele bituumenile, mida kasutatakse teedeehituses ja muudes ehitusprojektides. See on valmistatud bioloogilistest materjalidest, aidates vähendada süsinikdioksiidi jalajälge mitmel viisil. Järgnevalt tuuakse välja peamised põhjendused, millest tulenevalt on biobituumeni kasutamise mõju keskkonnale vähem koormavam.

Esiteks kasutab biobituumeni tootmine vähem fossiilseid kütuseid. Tavapärase naftabituumen saadakse toornafta rafineerimisel, mis on energiantensiivne protsess, kus vabaneb suures koguses süsinikdioksiidi. Biobituumeni valmistamisel kasutatakse taastuvaid allikaid nagu bioõlid, mis on keskkonnasõbralikumad ja vähem saastavamad. Näiteks on uuringud näidanud, et biobituumeni kasutamine võib oluliselt vähendada süsinikdioksiidi heitkoguseid, võrreldes traditsioonilise naftabituumeniga, sest bioõli tootmine ja kasutamine põhjustab vähem süsinikdioksiidi heidet. [58] Samuti toetab biobituumen ringmajandust. Selle koostisosad nagu näiteks riisikestadest saadav tuhk või looduslikud vahad, on sageli jääkproduktid, mis muidu satuksid prügilasse. Nende materjalide kasutamine vähendab jäätmete hulka ja toetab ressursside taaskasutust, mis on oluline süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamiseks. [59]

Biobituumeni tootmise käigus tekib kõrvalproduktina biosüsi, mis oma omadustelt on väärtuslik kõrvalprodukt, mis tekib näiteks biomassi pürolüüsprotsessi tulemusena. Sellel on mitmeid keskkonnasõbralikke rakendusi tänu oma unikaalsetele füüsikalistele ja

keemilistele omadustele. Biosüsi aitab siduda süsinikdioksiidi, aidates seeläbi kaasa kliimamuutuste leevendamisele. [60] Tänu oma suurele pindalale ja pooridele on biosüsi efektiivne adsorbent, mis suudab pinnasest ja veest eemaldada toksiine ja saasteaineid. See on eriti kasulik raskmetallide, nagu plii ja kaadmium, ning orgaaniliste ühendite puhastamiseks, mis võivad olla kahjulikud nii inimeste tervisele kui ka keskkonnale. [61] Lisaks võib biosüsi toimida ka biokütusena. Biosöe energiaomadused tulenevad selle kõrgest süsinikusaldusest ja põlemisomadustest, mis võimaldavad seda omakorda kasutada biomassist bioõlide tootmiseks kuluva energia katmiseks. [62]

Susanjib Sarkar ja Amit Kumar uurisid, milliseid kõrvalprodukte tekib bioõlide tootmise käigus ning avastasid, et biomassist saadud bioõli võib olla ka biovesiniku tootmise allikas. Biovesinik on puhas energiaallikas, mille põletamisel vabaneb ainult vesi, mitte süsinikdioksiid. Biovesiniku tootmine ja kasutamine aitab oluliselt vähendada fossiilsete kütuste tarbimist ja nendega kaasnevaid heitkoguseid ning mida saab omakorda ära kasutada bioõlide tootmiseks kuluva energia katmiseks. [63]

Täiendavalt on täheldatud, et pürolüüsprotsessi käigus eraldub palju erinevaid gaase. Biomassi konverteerimisel bioõliks läbi kiirpürolüüsi protsessi võib tekkida vesinikugaas. Seda vesinikku võib saada bioõlist auru kondenseerumise teel, mis on üks võimalik viis, kuidas toota kütust süsinikdioksiidi heitkoguseid oluliselt vähendades. Näiteks, uuringus leiti, et vesinik, mis on toodetud biomassist läbi kiirpürolüüsi, võib aidata vähendada CO₂ heitkoguseid kuni 50 % võrreldes maagaasil põhineva vesinikuga. [63] Bioõli tootmisel võib tekkida ka CO₂, mida võib kasutada mitmel viisil, näiteks kasvuhoonetes taimekasvu soodustamiseks või erinevates tööstuslikes protsessides, kus CO₂ on vajalik. Lisaks vesinikule ja CO₂-le võivad bioõli tootmisel eralduda ka muud gaasid, nagu süsinikmonooksiid (CO) ja kerged hüdrokarbonaadid, mida võib kasutada alternatiivse kütustena pürolüüsprotsessi energia kasutuses või muudes keemilistes protsessides. [63]

2.4.1 Biogeense süsiniku olemus ja mõiste

Biogeenne süsinik on süsinik, mis on talletatud bioloogilistes materjalides, näiteks taimedes või pinnases. Süsinik koguneb taimedesse fotosünteesi protsessi kaudu, millest tulenevalt võivad biopõhised tooted aidata kaasa süsinikdioksiidi taseme vähendamisele atmosfääris. Biogeenset süsinikku ehitustoodetes võib seetõttu pidada "negatiivseks emissiooniks". See tähendab, et biopõhiste materjalide kasvufaasis talletatakse süsinik bioehitusmaterjali. [64] Järgnevalt vaatleme, kuidas biogeenset süsinikku rakendatakse ja milline on biopõhiste toodete mõju sellele.

Biogeenset süsinikku kasutatakse peamiselt ehitusmaterjalides ja biokütustes. Biopõhiste materjalide, nagu bio-polüetüleen ja bio-poli (tereftalaat) kasutamine pakendamisel jne, pakub samuti alternatiivi fossiilsetele materjalidele, vähendades nii süsiniku jalajälge ja parandades materjalide ringlussevõtu võimalusi. [65]

Biopõhiste toodete elutsükli hindamisel on oluline arvestada nii süsiniku sidumist kui ka vabastamist. Biogeennse süsiniku mõju sõltub suuresti materjali tootmisviisist ja kasutusest. Näiteks, kui puidutooded pärinevad jätkusuutlikult majandatud metsadest, võivad need pikemas perspektiivis aidata atmosfäärist süsinikku siduda. Siiski, biopõhiste materjalide tootmisel võib esineda ka keskkonnamõjusid nagu maakasutuse muutus ja bioloogilise mitmekesisuse vähenemine, mida tuleb samuti arvesse võtta. [66]

Kokkuvõtvalt on biogeenne süsinik oluline element keskkonnasõbralike ja jätkusuutlike toodete arendamisel. Selle rakendamine ehitusmaterjalides ja biokütustes, biobituumenites aitab kaasa süsiniku sidumisele, vähendades sellega kliimamuutuste mõju. Siiski on vaja jätkuvaid uuringuid ja paremat arusaama biopõhiste materjalide elutsükli mõjudest, et optimeerida nende keskkonnamõju ja maksimeerida süsiniku sidumise potentsiaali.

3. BIOBITUUMENIGA TEHTAVAD LABORATOORSED KATSETUSED

Üheks lõputöö eesmärgiks oli laboratoorselt katsetada penetratsiooniga 70/100 biobituumenit, kasutades Eestis kehtivaid standardeid, ning võrrelda seda penetratsiooniga 70/100 naftabituumeni omadustega. Saadud tulemuste põhjal tehti järeldusi biobituumeni sobivuse ning edasiste uurimissuundade kohta.

Töö autoril oli algselt plaan katsetada mitmeid erinevaid biobituumeneid, võrdlemaks nende erinevaid omadusi ja toimivust. Lõputöö formuleerimise käigus võeti lähteülesandeks hankida Euroopa turult nõ 100% biobituumeneid. Teadaolevalt pakuvad sellist sideainet eelpool mainitud ettevõtted Saksamaalt BioFabrik, Hollandist Esha ja Reofalt. Tänapäevaks hetkeks on olukord, kus täielikult biomassist tuleneva bituumeni arendus- ja teadustööd on poolikud ning valmistoodangu kättesaadavus raskendatud. Eelnevalt mainitud kolm ettevõtet on oma tooted patenteerinud ning tutvustanud neid laiemale avalikkusele. Ühtlasi ka teada andnud, et antud tooteid on võimalik tellida. Mitu kuud kestnud kirjavahetuste käigus selgus, et kolmest pakkujast on Saksamaa ettevõtte Biofabrik koostöös B2Square'ga valmis oma toodet tarnima edasisteks laboratoorseteks katsetusteks antud lõputöö raames. Seetõttu tuli ajalisel ja rahalisel kaalutlusel langetada otsus ühe kindla biobituumeni ja asfaltsegu katsetamise ning uurimise kasuks.

Katseplaan sai üles ehitatud järgnevalt:

Tabel 3.1 Biobituumeni laboratoorsete katsetuste plaan

	Katse kirjeldus	Standard
1	100 % biopõhise komponendiga biobituumeni hankimine	
2	Biobituumeni komponentide kokkusegamine	
3	Nõelpenetratsiooni määramine	EVS-EN 1426:2015
4	Pehmenemistäpi määramine	EVS-EN 1427:2015
5	Fraass'i murdumistäpi määramine	EVS-EN 12593:2015
6	Säilivuskindluse määramine	EVS-EN 13399:2017
7	RTFOT vanandamine ja massimuutuse määramine	EVS-EN 12607-1:2014
8	PAV vanandamine	EVS-EN 14769:2023
9	Bituumeni omaduste määramine eBBR meetodil	EVS-EN 14771:2023 + AASHTO M320 + LS-308
10	DSR katse	EVS-EN 14770:2023
11	Leektäpi määramine	ISO 2592:2017

3.1 Kasutatud materjalide kirjeldus

Sideainena katsetati penetratsiooniga 70/100 biobituumenit, mille tootjaks Biofabrik Group ja B2Square.

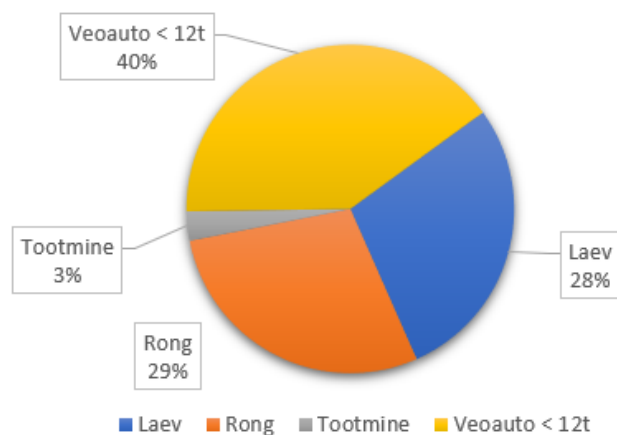
Biobituumen pärineb Biofabrik Group ja B2Square koostöös loodud tootest. Biofabrik Group ja B2Square arendavad ning turustavad kõrgtehnoloogilisi taaskasutustehnoloogiaid, eesmärgiga jätkusuutlikult lahendada energia-, jäätme- ja toiduprobleeme. Nende eesmärgiks on vähendada ja tegeleda tõsiste keskkonnaprobleemidega, nagu fossiilseid ressursse hävitav kaevandamine. Nende poolt pakutud toote nimeks on *Instant BioBitumen™*, mille näol on tegemist kahe eraldi seisva materjaliga. [51] Nimelt toodavad ja turustavad nad antud biobituumeni eraldi seisvate asfalteenide ja malteenidena, mis tuleb omavahel kokku segada. Antud toote omapära seisneb veel selles, et doseerides erineva osakaaluga malteene ja asfalteene, peaks saama tootja sõnul erineva penetratsiooni ja viskoossusega biobituumeni segusid. Tulenevalt ettevõtte ärisaladustest, ei ole kahjuks täpselt teada, millest on tehtud asfalteenid. Suhtlusest toote esindajaga võis eeldada, et tegemist on looduslikult esineva materjaliga, millele rakendatakse edasitöötlemise protsesse. Malteenide kohta jagas esindaja infot, et antud toode on tehtud India pähkli koortest toodetud bioõlist. Kahjuks ei olnud jällegi ärisaladuse kaitsest tulenevalt võimalik saada rohkem infot, millist täpset tehnoloogiat oli kasutatud antud malteenide tootmiseks (kiirpürolüüs vms). [infoallikas: elektrooniline kirjavahetus]

3.1.1.1 Ühe tonni Instant Biotumen'i CO₂ jalajälg

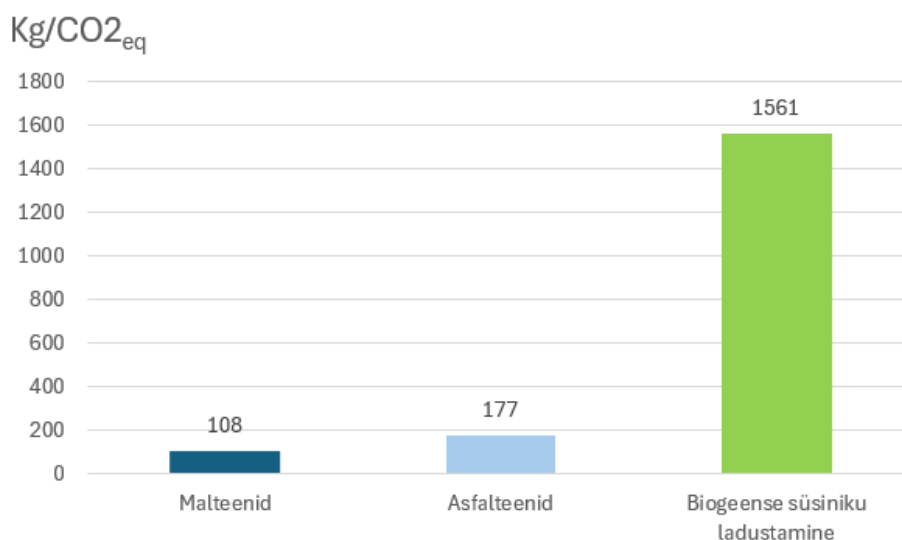
Frank Albrecht, kes on eelnevalt mainitud biobituumeni tootmise, arendamise ja väljatöötamise eestvedaja ja esindaja, jagas antud lõputöö raames täiendavaid dokumente, et hinnata *Instant BioBitumen™* keskkonnajalajälge. Biobituumeni jalajälje hindamiseks oli nende poolt tellitud süsiniku jalajälje elutsükli uuring, kus seda hinnati alates materjali tootmisest kuni materjali ladustamiseni Saksamaal. Kuna antud toode koosneb eraldiseisvatest malteenidest ja asfalteenidest, siis süsiniku jalajälje hindamisel võeti eraldi arvesse nende kahe komponendi tootmist, transporti ja ladustamist. Uuringus arvestatud heitetegurid pärinevad Saksamaa Keskkonna-, Toidu- ja Maaeluministeeriumi ning Keskkonnakaitseagentuuri andmebaasidest. Malteenide (*Instant Biotumen MTF-10M*) ja asfalteenide (*Instant Biotumen HCR-150*) jaoks esitati dokument (Lisa 6), mille koostajaks oli ettevõtte Forliance. Dokumendist selgub, et asfalteenide kohta paiskus õhku (materjali lattu jõudmiseni) 355 kg/CO_{2eq}, millest suurima osa moodustas transport. Transport jagati osadeks (Joonis 3.1), kuna üksikud lõigud läbiti erinevate transpordivahenditega. On märkimisväärne, et suurimad heitkogused tekkisid

veoautotranspordiga, kuigi suurim läbitud vahemaa oli vees (merekauavedu). Ühe tonni asfalteenide kohta vastavalt eraldunud CO₂ kogus oli 177 kg/CO_{2eq}. (Lisa 6)

Ettevõtte Advieslab VOF teostas eraldi uuringu malteenide (*Instant Biotumen MTF-10M*) elutsükli analüüsi, milles mõõdeti keskkonnavalajälje suurust. Samas biogeense CO₂ säilitamist see ei hõlmanud. LCA (ing. *Life-cycle assessment*) uuringu kohaselt leiti, et malteenide tootmisest kuni Saksamaale lattu jõudmise käigus eraldus 216 kg/CO_{2eq}. Arvutuslikult leiti, et ühest tonnist malteenidest eralduv CO₂ kogus on 108 kg/CO_{2eq}. Lõplikult arvutati, et antud biobituumeni komponentide tootmine ja transport tekitas 285 kg/CO_{2eq} (Joonis 3.2). Lisaks leidis Advieslab VOF, et antud biobituumeni biogeense CO₂ talletatud kogus oli 3122 kg/CO_{2eq}. Arvutuslikult järeldati, et ühe tonni *Instant BioBitumen*TM kohta seotud vastav biogeense CO₂ kogus on 1561 kg. Kokkuvõtvalt järeldati uuringus, et antud biobituumen on negatiivse CO₂ jalajäljega (Lisa 6).



Joonis 3.1 CO₂-e heitkoguste jagunemine kategooriate kaupa ühe tonni *Instant Biotumen HCR-150* (asfalteenid) kohta (Lisa 6)



Joonis 3.2 Ühe tonni biobituumeni PCF (ing. *Product Carbon Footprint*) võrreldes salvestatud biogeense CO₂-ga (Lisa 6)

3.2 Biobituumeni kokku segamine

Biobituumeniga seotud tööd teostati TalTechi teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Segamistingimused formuleeriti vastavalt tootja esitatud andmetele, mis selgitasid segamisprotsessi tööpõhimõtteid detailsemalt.

Järgnevalt on autor kirjeldanud tootja poolt etteantud protseduure asfalteenide ja malteenide kokkusegamiseks biobituumeniks laboratoorsetes tingimustes:

1. Kaaluda vajaminev kogus malteene ja asfalteene.
2. Valada toatemperatuuril malteenid sobivasse segamisanumasse.
3. Lisada toatemperatuuril asfalteenid eelnevalt mainitud segamisanumasse, samal ajal pidevalt segades.
4. Jätkata toatemperatuuril segamist ning suurendada mikseri pöörete arvu umbes 3000-ni.
5. Jälgida anumasse oleva segu temperatuuri tõusu kuni 145 °C-ni.
6. Pärast 145 °C saavutamist kuumutada segu kuni 175 °C-ni.
7. Kontrollida segu homogeensust, et segamisanuma põhjas ega ääres ei oleks segunenud materjali.
8. Pärast 175 °C saavutamist lasta materjalil jahtuda uuesti umbes 120 °C-ni.
9. Biobituumenisegu peaks olema valmis ning seda saab kasutada edasisteks laboratoorseteks katsetusteks. [infoallikas: elektrooniline kirjavahetus]

Asfalteenide ja malteenide laboratoorseks kokkusegamiseks kasutati *high shear* mikserit. Antud mikseri eesmärk on asfalteenide ja malteenide kokku segamisel saavutada võimalikult homogeenne segu. Antud mikser aitab kaasa segatavates segudes suurema nihkepinge tekkimisele, mis on suure tähtsusega. Tänu sellele liiguvad segatavates viskoossetes ainetes vedelikud efektiivsemalt, mis omakorda muudavad segamisprotsessi ühtlasemaks ja kiiremaks. *High shear* mikser kasutab vedeliku töötlemiseks pöörlevat tiivikut või kiiresti liikuvat rootorit, või selliste tiivikute või jadamisi rootorite otsikut, mida käitab elektrimootor, luues vedelikus voolsust ja nihet. Otsiku väliskülgedel asuva vedeliku liikumiskiirus on suurem kui otsiku keskel asuva tiiviku ümber. Just see kiiruste erinevus tekitab nihkepinget vedelikus. [67] Joonisel 3.3 on autor välja toonud Silversoni L5M-A mikseri segamisotsiku "*duplex*" löikepeaga.



Joonis 3.3 *High Shear* mikseri segamisotsik [erakogu]

Asfalteenide ja malteenide kokku segamine võttis aega orienteeruvalt 30 minutit. Kuna tootja poolt ei olnud infot, milliste koguste kaupa oleks pidanud asfalteene malteenidele lisama, otsustati asfalteene lisada väikeste koguste kaupa, et vältida klompe. Lisaks sellele, et ei tekiks eraldunud, mitte segunenud materjali segamisanuma seinale. Tootja poolt etteantud juhiste tuginedes tuli vastavalt 1 kg 70/100 bituumeni segamiseks kasutada vahetunde, kus 1 kg segust 52 % moodustasid asfalteenid ning 48 % malteenid. Segamisprotsessi käigus selgus (visuaalsel vaatlusel ning infrapuna termomeetriga mõõtes), et tootja poolt etteantud mikseri pöörete arv 3000 p/min ei andnud vajalikku tulemust saavutamaks 145 °C. Tulenevalt sellest otsustati mikseri pöörete arvu tõstmise kasuks, milleks oli ca 6000 p/min. Lisaks sellele asetati seguanuma alla pliit, et hilisemalt segu kuumutada 175 °C-ni, seda pidevalt segades. Segamisprotsess on välja toodud Joonisel 3.4.



Joonis 3.4 Asfalteenidest ja malteenidest high shear mikseriga biobituumeni kokku segamine [erakogu]

3.3 Nõelpenetratsiooni määramine

Valmis segatud biobituumenile teostati nõelpenetratsiooni katse vastavalt standardile EVS-EN 1426:2015. Katse põhimõtteks on määrata bituumeni viskoossust. Katsetulemused saadakse kui mõõdetakse koormatud standartse nõela läbitungimist bituumeni katseproovi. Olenevalt bituumeni margist on ettenähtud erinevate parameetritega katsed. Antud juhul oli tegemist 70/100 biobituumeniga ning penetratsioonide puhul väärtustega kuni 330 mm × 0,1 mm on katseparameetriteks temperatuur 25 °C, rakendatav koormus 100 g ning koormamisaeg 5 s. [68]. Katsekeha on välja toodud Joonisel 3.5.

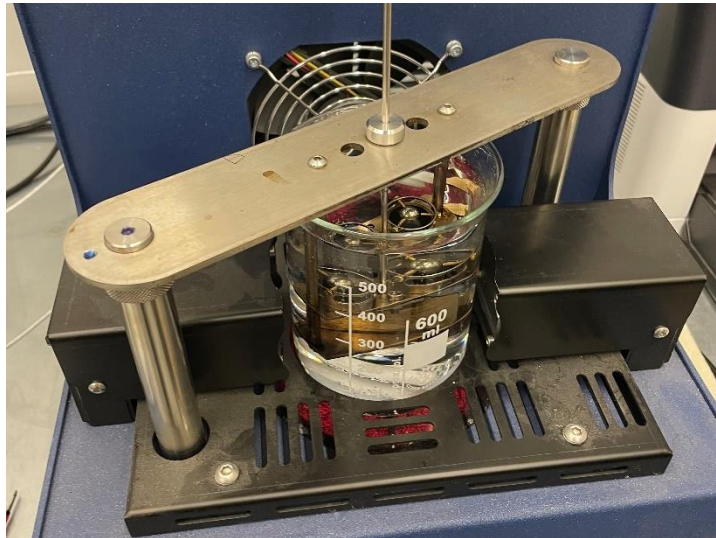


Joonis 3.5 Nõelpenetratsiooni katse läbinud proovikeha [erakogu]

3.4 Pehmenemistäpi määramine

Järgnevalt määrati pehmenemistäpp, kasutades selleks kuuli ja rõnga meetodit, mida teostati EVS-EN 1427:2015 standardi põhjal. Katse eesmärgiks oli iseloomustada biobituumeni kõrgetemperatuurilist toimivust teekattes, millal see pole enam võimeline vastu võtma koormusi. Selle katse abil on võimalik hinnata vastupidavust plastsetele deformatsioonidele. Katse teostati järgnevalt: esmalt kuumutati biobituumen, seejärel valati kahte õlgmikuga messingrõngasse, kerge liiaga. Seejärel lasti rõngastel jahtuda. Kui katseproovid olid jahtunud lõigati liig tasaseks rõnga servaga, kasutades eelnevalt

kuumutatud terava servaga pahtlilabidat. Rõngad asetati spetsiaalsesse hoidjasse ning seejärel vedelikuvanni, mille temperatuuri oli võimalik kontrollida. Siis asetati 3,5 g teraskuulid tsentreerimisrõnga abil biobituumenile. Seejärel kontrolliti vedeliku temperatuuri ja kuulide vajumist, kuni saavutati vajum $25,0 \pm 0,4$ mm, mis tähendas katse lõppu. Pehmenemistäpp esitati tulemustemperatuuride keskmisena, mille juures kaks biobituumenketast pehmenesid. [69] Biobituumeni katsetamine on väljatoodud Joonisel 3.6.

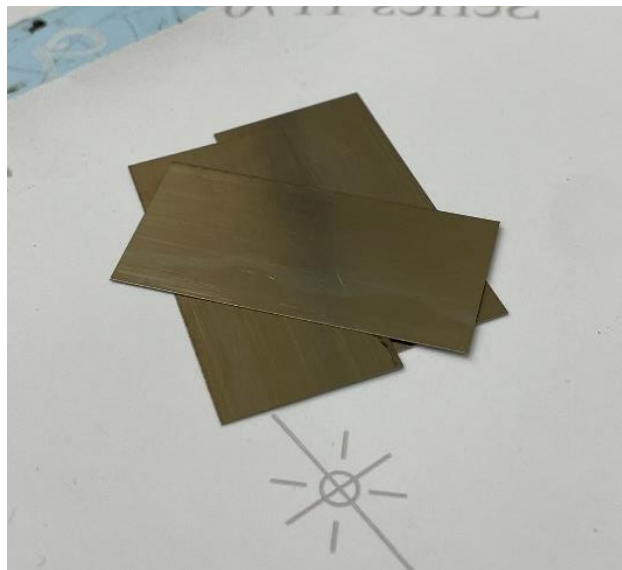


Joonis 3.6 Biobituumeni pehmenemistäpi määramine [erakogu]

3.5 Fraass'i murdumistäpp

Järgmisena teostati Fraass'i murdumistäpi määramine vastavalt standardile EVS-EN 12593:2015. Fraass'i murdumistäppi kasutatakse bituumeni või asfaldi katsetamisel selleks, et määrata kindlaks materjali külmakindlust. See test näitab temperatuuri, mille juures bituumen muutub nii hapraks, et hakkab murduma. Murdumistäpp on oluline näitaja, eriti kliimates, kus esineb sageli külma ilma, kuna see aitab kindlaks teha, milline bituumen või asfaltsegu sobib kohalike ilmastikutingimustega. Näiteks kui bituumenil on kõrge Fraass'i murdumistäpp, võib see olla sobivam külmematele piirkondadele, kus on vajalik suurem külmakindlus. Katse põhimõte seisneb selles, et metallplaadile (Joonis 3.7) kantakse ühtlase paksusega bituumenist sideaineproov. Seejärel jahutatakse plaati pidevalt ja see painutatakse mitu korda, kuni sideainekiht murdub. Temperatuur, kus esimene mõra ilmub, registreeritakse kui Fraass'i murdumistäpp. Plaadid on valmistatud karastatud vedruterasest, järgmiste mõõtmetega: $(41,00 \pm 0,05)$ mm pikad, $(20,0 + 0,2)$ mm laiad ja $(0,15 \pm 0,02)$ mm paksud. Katseks valmistati ette viis plaati puhastades, kuivatades ja kaaludes need selliselt, et saavutada kaaluliselt 0,01 g täpsus. Katseplaadid

kaeti biobituumenist proovidega käsitsi. Katse standard sätestab seda, kui EN 1247 standardi järgselt on kuuli ja rõnga järgne pehmenemistäpp võrdne 100 °C või alla selle, peab plaadid katma käsitsi. Plaatidele kaaluti (410 ± 10) mg biobituumenit. Biobituumeniga kaetud plaate katsetati 30 min kuni 240 min jooksul pärast katmise algust temperatuuril, mis on vähemalt 15 °C võrra kõrgem eeldatavast murdumistäpist. Katse sooritati käsiseadme abil. Vastavalt standardile tuleb käsiseadme puhul asetada kaetud katseplaadid haardtangide abil klambrite vahele. Katseplaadi asetamisel katseseadmesse peab tagama, et seda käsitletakse selliselt, et sideaine kiht ei murduks. Kui pragu peaks siiski tekkima, tuleb see välja vahetada teise kaetud plaadi vastu. Tulenevalt sellest valmistatigi igaks juhuks ette viis katseplaati. Katse tulemused esitati Celsiuse kraadides. [70]



Joonis 3.7 Katseplaadid [erakogu]

3.6 Säilivuskindlus

Järgmisena teostati säilivuskindluse määramine, vastavalt standardile EVS-EN 13399:2017. Antud katse ei olnud tegelikult oluline, kuna antud biobituumenit ei ole vaja hoiustada. Katse sooritati informatiivsel mõttel, et veenduda, kui stabiilne on antud biobituumen kõrgetel temperatuuridel.

See standard määratleb meetodi bituumeni ladustamise stabiilsuse mõõtmiseks kõrge temperatuuril. Biobituumeni proov lisati katseanumasse, milleks on „hambapasta tuubi“ kujuline katseanum, mis ühest otsast on suletud ning peale sideaine lisamist katseanumasse, suleti hilisemalt ka katseanuma teine ots. Tuubi seintel on kindlaks määratud täpne joon, milleni tuleb maksimaalselt lisada katsetatavat sideainet. Tuubi

sulgemisel pidi ülemisest osast välja pigistama õhu, mis ei tohinud suletud tuubi jääda. Tuub pidi olema otsast-lõpuni täidetud katsetatava sideainega. Biobituumeni homogeenset proovi hoiti vertikaalses anumus 180 °C juures 72 h (Joonis 3.8). Pärast proovi jahtumist lõigati see kolmeks võrdseks osaks. Mõlemaid otsasid (ülemine ja alumine) analüüsiti edasiselt, et hinnata võimalikke erinevusi biobituumeni omadustes. Tuubi ülemisele ja alumisele osale määrati pehmenemistäpp. [71]



Joonis 3.8 Biobituumenit sisaldava katseanuma „Tuubi“ fikseerimine edasiseks katsetamiseks [erakogu]

3.7 RTFOT ja massimuutuse määramine

Järgmisena teostati RTFOT (ing. *Rolling Thin Film Oven Test*) vanandamine ja massimuutuse määramine vastavalt standardile EVS-EN 12607-1:2014. Siinkohal tasub mainida, et massimuutus on EN-i mitte PG (*Performance Grade*) katsetuste nõue. Antud standard määratleb meetodi, mis võimaldab mõõta kuumuse ja õhu ühismõju õhukesele liikuvale bituumeni kihile, simuleerides selle kõvenemist. Teisisõnu püütakse simuleerida bituumeni lühiajalist vananemist, ehk oksüdeerumist. Katse teostati, kus biobituumeni õhuke kiht kuumutati ahjus kindlaksmääratud temperatuuril teatud aja jooksul, millele õhu pealevool oli pidev. Kuumuse ja õhu mõju biobituumenile määrati kindlaks massimuutuse ning selliste omaduste muutuste põhjal nagu jääkpenetratsioon ja pehmenemistäpi muutus, mõõtes neid enne ja pärast biobituumeni ahjus viibimist. Õhuringluse referentstemperatuur oli 163 °C. Antud katses asetati spetsiaalsesse ahju kaheksa katseanumat (klaasist silindrid). Oluline oli, et ahi oleks täidetud kindla arvu klaasidega. Isegi kui katseanumates oli katsetatav biobituumen lisatud vaid nelja katseanumasse, tuli ahjus ja katse jooksul tagada katseanumate vahel tasakaal. RTFOT katse käigus mõõdeti katseanumates oleva biobituumeni massimuutust, mis väljendati

negatiivse arvuna protsentides. [73] Ahju lisatud katseanumad on välja toodud Joonisel 3.9.



Joonis 3.9 RTFOT katse jaoks biobituumeniga täidetud katseanumad [erakogu]

3.8 Biobituumeni pikaaegne vanandamine (PAV)

Järgnevalt teostati biobituumeni pikaaegne vanandamine, mida edasiselt nimetatakse PAV (ing. *pressurised aging vessel*) vanandamiseks. Laboratoorne katse teostati vastavalt standardile EVS-EN 14769:2023. PAV katsega simuleeriti biobituumeni pikema ajalist vananemist, mis leiab aset sideainega teekatendites selle kasutamise käigus. Antud laboratoorse katse põhimõtteks on testida sideaineid muutustele, mis avalduksid kasutusel olevatel teedel kaheksa kuni kümne aasta jooksul. Selle tagajärjel toimuvad muutused bituumenite reoloogias ja keemilises koostises. PAV katsetamiseks kasutatav seade on kombinatsioon ahjust ja survekambrist. Biobituumeni katsetamiseks asetati see väikeste pannide peale (Joonis 3.10), mis omakorda tõsteti spetsiaalse riuli peale. Üks katseanum (pann) sisaldas 50 g biobituumenit, mis moodustas pannile ca 3,2 mm paksuse kihi. Spetsiaalne riul tõsteti survekambrisse ning kamber suleti. Seejärel viidi ahi katsetemperatuurini 100 °C-ni ning survekambris tõsteti rõhk 2,1 MPa-ni, mida säilitati 20 tunni vältel. [74]



Joonis 3.10 PAV vanandamise jaoks täidetud katseanumad biobituumeniga [erakogu]

3.9 Pikendatud BBR meetod (eBBR)

Järgnevalt teostati biobituumeni omaduste määramine madalatel temperatuuridel – eBBR meetodil (ing. *Extended Bending Beam Rheometer*). Laboratoorne katse teostati vastavalt standardile EVS-EN 14771:2023, lisaks arvestati Põhja-Ameerika standardites AASHTO M320 ja LS-308 täiendavate nõuetega.

Pikendatud BBR (eBBR) katse eesmärk on uurida bituumeni kalduvust pöörduva vananemisega kaasnevale jäigenemisele. [1] Katse teostati tavalise BBR katseseadmega, kuid proovikehasid katsetati kahel erineval temperatuuril ja kolmel erineval ajahetkel. Kui tavalise PG klassifikatsiooni määramisel teostatakse madalatemperatuurilised omadused ühe tunni jooksul peale proovikeha katsetemperatuuri saavutamist, siis 24 ja 72 tunni järel katsetades ilmneb bituumeni tegelik pikaajaline vastupidavus madalatel temperatuuridel. [75]

Üldiselt kaotavad kõik bituumenid madalatel temperatuuridel pöörduva vananemise ilmingu tõttu oma esialgset elastsust ning muutuvad rabedamaks. Koormamised viiakse läbi (Joonis 3.11), kui proovikehasid on hoitud katse teostamise temperatuuril vastavalt 1, 24 ja 72 tundi. Katse väljundiks on, sarnaselt tava-BBR katsega, roomejäikus (S) ja roomekiiruse (m) väärtus, kusjuures nende kriteeriumid peavad vastama tingimustele $S < 300$ MPa ja $m > 0,300$. m -väärtus näitab, kui kiiresti muutub roomejäikus ajas, st kui kiirelt bituumen kaotab oma jäikust koormamise tulemusena. Lisaks sellele, kui jäik on katsetatav bituumen madalatel temperatuuridel ning kui hästi bituumen tuleb toime tõmbe pingete leevendamise madalatel temperatuuridel. [75]

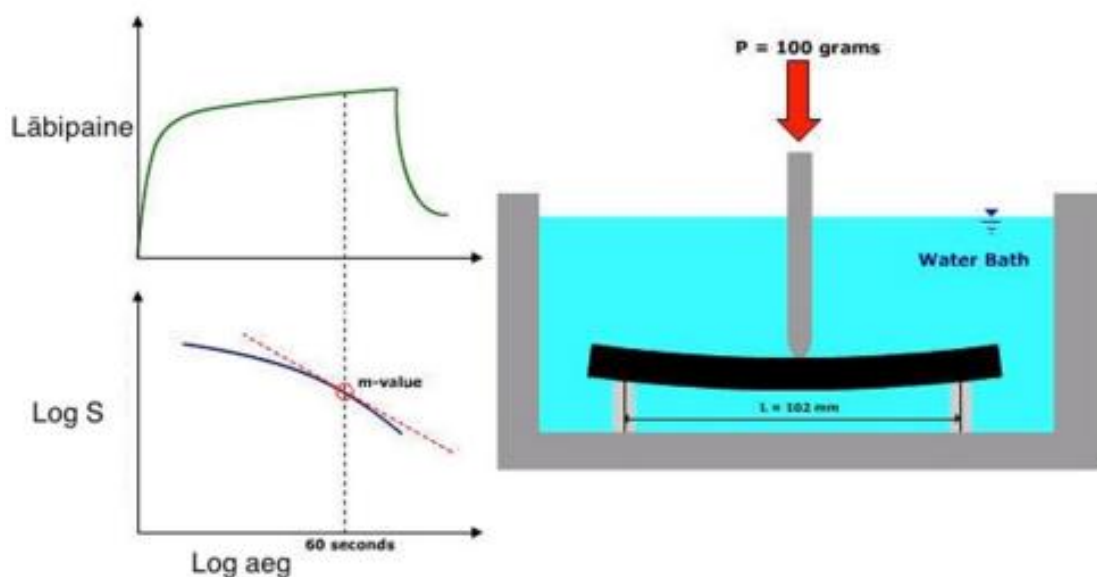
Pärast viimase proovi katsetamist arvutatakse, mitme kraadi võrra erinesid biobituumeni roomejäikused ja roomekiirused erinevatel katsetemperatuuridel ja katse teostamise aegadel. Katse tulemusena leitakse temperatuurimuutus. Selle leidmiseks peab esmalt määrama BBR katse kohaselt katsetatava bituumeni madalatemperatuurilise toimivuse

(tulemus kraadides, *Celsiust*). Peale seda määratakse pikendatud BBR katsega (eBBR) bituumeni madalatemperatuuriline toimivus (tulemuse kraadides, *Celsiust*), millega kirjeldatakse bituumeni pöörduvat jäigenemist. Nende kahe tulemuse alusel arvutatakse temperatuurimuutus, kus teekatte temperatuuripragunemise vältimiseks on nõutud, et temperatuurikadu jääks alla 3...6 °C. Kui katse käigus leitud temperatuurimuutus on alla 3...6 °C, on asfalkattesse tekkivate temperatuurimuutustest tingitud pragude (reeglina põikpragunemine) tekkimise risk väike või pragusid ei teki üldse. [1] [75]

Pöörduv vananemine avaldub madalate temperatuuride taluvuse muutumises. Katsekeha piirväärtus saadakse kõrgema temperatuuri juures, st negatiivse väärtusega. Näiteks

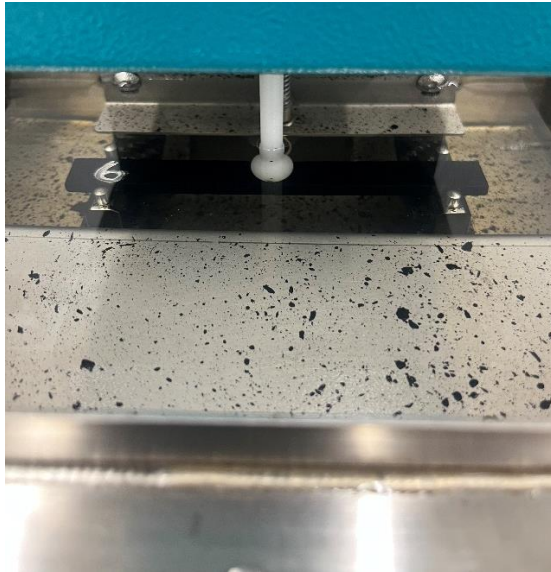
- Kui enne oli katsekeha tulemus -24 °C ning pärast katset oli -20 kraadi °C, siis muutus - 4 °C on sobilikus vahemikus.
- Kui enne oli katsekeha tulemus -28 °C ning pärast katset oli -18 kraadi °C, siis muutus - 10 °C ei ole enam sobilikus vahemikus.

Katsekehad on välja toodud Joonistel 3.12, 3.13.



Joonis 3.11 Roomejäikus „S“, roomekiirus „m“ ja katse teostamise skeem. [1]

Pikendatud BBR katse (eBBR) tulemuste baasil määratakse PG klassifitseerimis süsteemi järgi bituumeni madalatemperatuurilise toimivuse temperatuur (näiteks PG 70-28, kus 28 on eBBR-i katsetulemusest tulenev). PG-süsteem põhineb kahe äärmusliku temperatuuri järgi bituumeni sobivuse hindamises. Põhimõtteliselt on ainsaks nõudeks see, et bituumen vastaks uuritavatel temperatuuridel etteantud katsetingimustele. [1]



Joonis 3.12 Biobituumenist eBBRi katsekeha katsetamine [erakogu]



Joonis 3.13 Biobituumenist eBBRi katsekehade väljavalamine vormidesse [erakogu]

3.10 DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) katse

Järgnevalt läbi viidud katse teostati vastavalt standardile EVS-EN 14770:2023. DSR (*ing. Dynamic Shear Rheometer*) katse peamiseks eesmärgiks on hinnata bituumenite vastupidavust roobaste tekkele ja väsimuspragunemisele. Vastavalt bituumenite PG klassifitseerimisele, katsetati esimeses etapis vanandamata biobituumenit kõrgel temperatuuril. Teises etapis katsetati RTFOT vanandatud biobituumenit kõrgel temperatuuril. Katse teostamiseks vajalikud temperatuurid valiti vastavalt bituumenite PG klassifitseerimise alusel, mis on välja toodud TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus. [1]

Biobituumeni proov paigutati kahe paralleelse plaadi vahele, millest üks oli fikseeritud ja teine oli võimeline etteantud sagedusel ja amplituudil ostsilleerima (võnkuma). Plaadid ja proov asetati katsekambrisse, mis võimaldas kontrollida ja eelseadistada katse teostamise temperatuuri ja täiendavaid tingimusi. Kui katse teostamiseks sobilik temperatuur oli saavutatud, käivitati ostsilleerimine kiirusega 10 rad/s ning mõõdeti reaajas bituumeni vastupanu nihkele (nihkepinget) ja koormamise tagajärjel tekkivat suhtelist deformatsiooni. Lisaks mõõdeti ajalist viivitust pinge rakendamisest lõpliku deformatsiooni tekkimiseni. [1] [76]

DSR katsest esialgselt leitav vanandamata bituumeni katsetulemus (väljendatuna, °C), näitab temperatuuri, millal juures bituumen täidab kompleksmooduli nõude minimaalselt 1,0 kPa. Teisalt määratav temperatuur (väljendatuna, °C), mis määratakse bituumenile

peale RTFOT vanandamist, näitab temperatuuri, millal bitumen täidab kompleksmooduli nõude minimaalselt 2,2 kPa.

DSR katse tulemuste baasil määratakse PG klassifitseerimis süsteemi järgi bituumeni kõrgtemperatuurilise toimivuse temperatuur (näiteks PG 70-28, kus 70 on DSR-i katsetulemusest tulenev).

3.11 Leektäpi määramine

Antud laboratoorne katse viidi läbi vastavalt standardile ISO 2592:2017. Leektäpi määramisega iseloomustatakse proovi omadust koos õhuga moodustada süttiv segu. Leektäpp on madalaim temperatuur, mille juures vedelike pinnalt eralduvad aurud süttivad hetkeks leegi lähendamisel. Süttimistemperatuuri määramiseks jätkatakse teimi kuni temperatuurini, mille juures leegi lähendamisel kestab põlemine vähemalt viis sekundit. Leektäpp ja süttimistemperatuur väljendatakse kraadides (*Celsiust*). Vastavalt standardile ISO 2592:2017 on määratletud protseduur naftatoodete leektäpi määramiseks, kasutades Clevelandi avatud topsi seadet. See on kohaldatav naftatoodetele, mille avatud topsi leektäpid jäävad vahemikku 79 °C kuni 400 °C, välja arvatud kütteõlid. [77]

4. BIOASFALTSEGUGA TEHTAVAD LABORATOORSED KATSETUSED

Katsetatavaks seguks sai valitud AC 16 surf ning seda kahel põhjusel: esmalt oli soov võrrelda segu käitumist naftabituumenist 70/100 tehtud seguga, mida tänaseks on lubatud kasutada Transpordiameti objektidel ning teiseks ajendiks oli, et seda asfaltsegu on laialdasemalt kasutatud teekatendite ülemistes kihtides, mis oma kasutusliku mahu mõttes omab suurt mõju.

Katseplaan sai üles ehitatud järgnevalt:

Tabel 4.1 Asfaltseguga tehtud katsetused

Katsetused	Standardid
Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing	EVS-EN 12697-35:2016
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus	EVS-EN 12697-1, -2
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine	EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019
1) Test methods - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator 2) Bituumen ja bituumensideained. Nõelpenetratsiooni määramine 3) Bituumen ja bituumensideained. Pehmenemistäpi määramine. Kuulirõnga meetod	1) EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018 2) EVS-EN 1427:2015 3) EVS-EN 1426:2015
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga	EVS-EN 12697-30:2018
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine	EVS-EN 12697-5:2018
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine	EVS-EN 12697-6:2020
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine	EVS-EN 12697-8:2018
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine	EVS-EN 12697-12:2018
Bituminous mixtures - Test method - Part 33: Specimen prepared by roller compactor	EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022
Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 22: Rattaroopa katse	EVS-EN 12697-22:2020

4.1 Bioasfaltsegus kasutatud materjalide kirjeldus

Biobituumenist asfalsegu projekteerimiseks kasutas lõputöö autor referentsandmeteks riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo asfalteerimisel ettevõtte Verston OÜ poolt koostatud seguretsepti alusel asfaltsegule tehtud laboratoorsete katsetulemuste andmeid. Vastavad tulemused on esitatud lisades (Lisa 3 ja 5). Antud AC 16 Surf segus kasutati sama päritolu täitematerjale ja fillerit, mida kasutati biobituumenist asfaltsegu AC 16 Surf tegemisel. Bituumen 70/100, mida kasutati Verstoni poolt toodetud AC 16 Surf segus, pärines Leedust ettevõttelt Orlen. Vastava bituumeni toimivusdeklaratsioon on lisatud lisadesse (Lisa 4).

Projekteeritud bioasfaltsegu AC 16 surf kasutati sarnaselt referentssegus kasutatud täitematerjale, milleks oli tardkivi killustik. Tardkivi killustik pärines Tallinnas asuva Bekkeri sadama vahelaost ning kasutatud fraktsioonideks oli 0/5; 5/8; 8/11 ning 11/16. Asfaltseguisse lisatav filler R0-0/0, 125 RAF pärines Rakkest ettevõttelt Nordkalk. Tuleb välja tuua, et projekteeritud asfaltsegu fillerit terakoostise tulemused erinevad referentssegus kasutatud fillerit terakoostise näitajatest, mis tegelikult suuremas määras ei mõjuta tulemusi. Projekteeritud segus kasutatava fillerit terakoostise näitajad on värskemad (viimati katsetatud). Referentssegus kasutati nakkeparandajat nimega *WetFix*, mida biobituumenist katsetatavale asfalsegule ei lisatud (biobituumeni tootjapoolne soovitus).

Bioasfaldi seguretsept koostati vastavalt Eestis kehtivatele standarditele ja projekteerimismuutustele, lähtudes dokumendis "Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised (2021)" väljatoodud standardile EVS 901-3. [78]

Biobituumenist projekteeritud AC 16 surf seguretsept (Lisa 1) projekteeriti selliselt, et see maksimaalselt sarnaneks Verstoni T-2 Võõbu – Mäo AC 16 surf segule. Vastavalt T-2 Võõbu – Mäo AC 16 surf asfaltsegu teostatud laboratoorsete katsetuste keskmistele tulemustele, projekteeriti biobituumenist AC 16 surf seguretsepti terakoostis.

Täitematerjalidega seotud katsed viidi läbi TalTechi teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis.

Tardkivi killustiku terakoostise määramine toimus vastavalt standardile EVS-EN 933-1. Selle tarbeks tuli teostada materjali pesemine, mille põhjal määratakse peenosise sisaldus. Seejärel toimus materjali kuivatamine ning kuivisõelumine. Sõelumisega jaotati materjal sõeltekomplektide abil erinevateks fraktsioonideks ning igale sõelale jäänud materjalide

massi võrreldi algmassiga, mille väärtused esitatakse numbriliselt terastikulise koostisena. [79] Katse käigus määratud terastikulised koostised on esitatud Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Määratud terastikulised koostised täitematerjalidele

Sõel	Sõela läbind, %			
	fr. 0-4	fr. 5-8	fr 8-11	fr. 11-16
0,063	6,9	1,8	2	1,9
0,125	11	2	2	2
0,25	17	2	2	2
0,5	27	2	3	2
1	42	2	3	2
2	67	3	3	2
2,8	77	3		
4	87	3	3	2
5,6	99	20		3
6,3	100	41	4	3
8		92	18	3
11,2		100	90	16
12,5			98	34
14				
16			100	89
20				100

4.2 Bioasfaltsegu segamine

Asfaltsegu kokku segamiseks transporditi graniitkillustikust täitematerjalid, filler ja biobituumenist sideaine TalTechi laborist ettevõtte Trev2 Grupp AS laborisse, millel on võimekus vastavalt standardile segada laboratoorselt kuni 60 kg asfaltsegu. Kokku segati üks partii bioasfaltsegu, järgides standardit EVS-EN 12697-35:2016.

Järgnevalt on lõputöö autor kirjeldanud, lähtudes standardist EVS-EN 12697-35-2016 ja tootja poolt saadud juhistest, biobituumenist asfaltsegu segamise protseduuri:

Enne segamist tuleb vajadusel kuivatada täitematerjal. Esmalt tuleb segamistemperatuuri valimiseks valida vastavalt standardis EVS-EN 12697-35:2016 kasutatav bituumeni mark. Antud juhul määrati biobituumeni segamistemperatuuriks esialgu 145 °C, lähtudes standardis välja toodud penetratsiooniväärtusest 70/100. Hilisemalt valiti tootja juhiste põhjal asfaltsegu segamistemperatuuriks laboratoorsetes tingimustes 165 °C. Selline kõrgem temperatuur valiti selleks, et kompenseerida laboritingimustes asfalditehases leiduvate paremate segamistingimuste puudujääki biobituumeni puhul. Täitematerjal kuumutati vastavalt vajaliku segamistemperatuurini (hälbega ± 5 °C). Tootjapoolsete

juhiste põhjal ei olnud vaja biobituumeni koostisosi (asfalteene ja malteene) eelnevalt eraldi kokku segada. Need koostisosad lisati asfaltsegusse toatemperatuuril pärast vajaliku täitematerjali ja filleri lisamist. Segamine toimus segutrumlis, kus täitematerjal ja segutrummel kuumutas kogu segu ühtlaselt (Joonis 4.1). Tootja poolt saadud juhiste põhjal doseeriti trumlisse vastav kogus asfalteene 30 sekundi jooksul, peale mida doseeriti vajaminev malteenide kogus kahe minuti jooksul. Peale seda segati segu veel 30 sekundit, et saavutada asfaltsegu homogeensus. Segamisprotsess ei kestinud kauem kui kolm minutit. [80]



Joonis 4.1 Valmis segatud biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu [erakogu]

Valmis segatud asfaltsegu toodi tagasi Taltech'i teedelaborisse, kus viidi läbi Tabelis 4.1 nimetatud katsetused.

4.3 Bioasfaltsegule teostatud katsetuste kirjeldused

4.3.1 Lahustuva sideaine sisalduse ja terastikulise koostise määramine

Esmalt teostati sideaine sisalduse ning terastikulise koostise määramine lähtudes standarditest EVS-EN 12697-1:2020 ja EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019. Katseproov kuivatati ning seejärel kaaluti. Peale seda asetati katseproov Joonisel 4.2 kujutatud ekstraktorisse, kus eraldati metüleenkloriidiga ekstraheerimise teel täitematerjal sideainest. Ekstraktorist tulnud täitematerjal kuivatati ja kaaluti ning seejärel sõeluti (Joonis 4.3). Lisaks sellele eraldati asfalt segust filler (Joonis 4.4). Sõelumise tulemusena saadi sõelte läbindid, millest lähtuvalt joonistub välja sõelköver. Sõelte läbindid esitatakse summaarsete massiprotsentidena. [81] [82]



Joonis 4.2 Biobituumenist AC 16 surf segust sideaine ja täitematerjalide eraldamine [erakogu]



Joonis 4.3 Täitematerjalid (tardkivi killustik) peale sideaine eemaldamist ekstraktoris [erakogu]

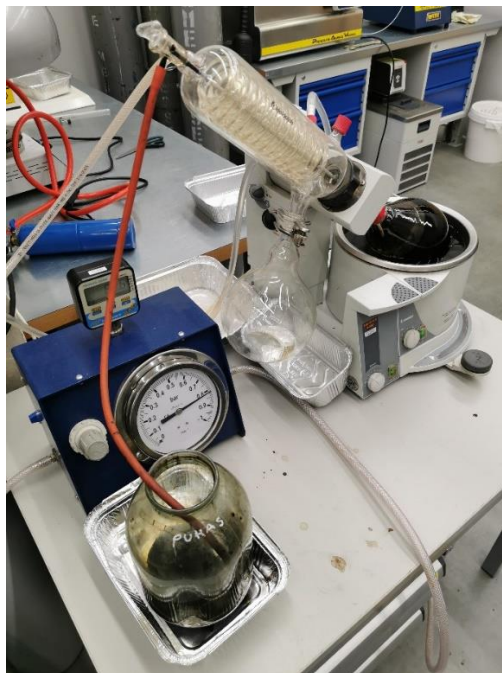


Joonis 4.4 Ekstraktoris eraldatud asfaltsegust sisalduv tolm (filler) [erakogu]

4.3.2 Biobituumeni eraldamine metüleenkloriidi lahusest.

Nõelpenetratsiooni ja pehmenemistäpi määramine

Biobituumeni eraldamisel metüleenkloriidi lahusest lähtuti standardist EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018, kus peale lahustumatu tahke aine eemaldamist ekstraktoriga ekstraheerimise teel, jäi alles biobituumeni ja metüleenkloriidi lahus. Seejärel eraldati lahuses üksteisest vaakumdestilleerimisega biobituumen ning metüleenkloriid, kasutades selleks Joonisel 4.5 kujutatud rotaatoraurustit. Protsess viidi läbi temperatuurivahemikus 85 °C kuni 150 °C, kus protsessi jooksul tõsteti temperatuuri lineaarselt. Vaakumdestilleerimise protsess loeti lõppenuks, kui metüleenkloriid oli lahusest eraldatud ning kolbi jäi järele puhas biobituumen. [83] Lisaks määrati asfaltsegust eraldatud biobituumenile uuesti nõelpenetratsioon vastavalt standardile EVS-EN 1426:2015 ja pehmenemistäpp vastavalt standardile EVS-EN 1427:2015.



Joonis 4.5 Biobituumeni (sideaine) eraldamine metüleenkloriidi lahusest [erakogu]

4.3.3 Marshall-proovikehade valmistamine bioasfaltsegust

Standard EVS-EN 12697-30:2018 käsitleb endas asfaltsegust proovikehade valmistamist kasutades selleks Joonisel 4.6 kujutatud lööktihendajat. Selle meetodiga valmistatud proovikehasid saab kasutada asfaldi tehnoloogiliste omaduste määramiseks. Antud standardi järgi on proovikeha valmistamise eelduseks, et asfaltsegus, millest proovi valmistatakse, ei tohi sõelale jääda rohkem kui 15 % 22,4 mm terasuurusega materjali ja asfaltsegu terasuurus peab olema alla 31,5 mm. [84]

Esmalt asfaltsegu kuumutati ning seejärel asetati tihendusvormi. Segu tihendati lööktihendajaga määratud aja jooksul, kindel arv kordi. Peale tihendamist lasti proovikehal jahtuda toatemperatuurini. [84]



Joonis 4.6 Proovikehade valmistamiseks kasutatud lööktihendaja [erakogu]

Lööktihendajaga valmistati Joonisel 4.7 kujutatud silindrilised proovikehad nii mahumassi kui ka veepüsivuse määramiseks. Lähtuvalt standardist EVS-EN 901-3:2021 on ette nähtud surf asfaltsegust poorsusomaduste ja kulumiskindluse proovikehade valmistamiseks 2 x 50 lööki. Veepüsivuse jaoks valmistatavad proovikehadele on standardis määratud 2 x 35 lööki. Kuna kõik katsekehad valmistati asfaltsegust, milles kasutatud biobituumeni penetratsioon on 70/100, siis lähtuvalt standardist valiti tihendamistemperatuuriks 145 °C. [84]



Joonis 4.7 Biobituumenist AC 16 surf segu proovikehad [erakogu]

4.3.4 Näiva erimassi määramine

Erimass on õhupoorideta asfaltsegu mass mahuühiku kohta. Asfaltsegu erimass määrati vastavalt standardile EVS-EN 12697-5:2018. Näiva erimassi määramiseks kasutati mahulist protseduuri (meetod A), kus püknomeetris mõõdetakse teadaoleva kuivmassiga proovi maht vee väljasurve alusel. Katset alustati püknomeetri ja selle ülaosa kaalumiseega. Seejärel asetati katseproov püknomeetrisse ja kaaluti uuesti. Püknomeeter täideti veega, nii et vedeliku tase jäi vähemalt 30 mm ülaosa ühenduskohast allapoole. Õhu eemaldamiseks segupooridest kasutati vaakumit. Kui õhk oli väljunud, lisati eemaldunud õhu võrra õhuvaba vett ning püknomeeter suleti. Püknomeeter asetati veevanni vähemalt 30 minutiks, et viia proov taas katsetemperatuurile $\pm 1,0$ °C (Joonis 4.8). Lõpuks võeti püknomeeter vannist välja, kuivatati välispind ja kaaluti seejärel. Edasiselt arvutati vastavalt katsetulemusele erimass. [85] [6]



Joonis 4.8 Biobituumenist AC 16 Surf segu erimassi leidmine püknomeetriga [erakogu]

4.3.5 Mahumassi määramine Meetod B

Standard EVS-EN 12697-6:2020 käsitleb endas katsemeetodeid, läbi mille määratakse asfaltproovikehade mahumassi. Antud lõputöö raames oli vaja määrata mahumassi, et hiljem arvutada välja jäävpoorsus. Mahumassi katsetuste jaoks valiti meetod B, mis tähendab mahumassi määramist immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikehadele (SSD). Proovikeha asetati toatemperatuuriga veevanni ning lasti vees küllastuda. Küllastumine toimus seni kuni proovikehade mass enam ei muutunud. Peale seda proovikeha mass fikseeriti. Proovikeha kuivatati seemisnahkse lapiga ning seejärel fikseeriti proovikeha mass uuesti. [86] [87]

4.3.6 Poorsusomaduste määramine

Jäävpoorsus iseloomustab tihendatud asfaltkatte õhupooride sisaldust protsentides. Liiga tihe asfaltsegu võib kaotada oma deformatsioonikindluse, mis põhjustab roobaste tekkimist. Liiga poorne asfaltsegu on vastuvõtlikum ilmastikumõjudele, nagu sulamis- ja külmumistsüklid, ning võib liikluskoormuse mõjul järeltiheneda, soodustades defektide teket. Antud lõputöö raames määrati bioasfaltsegu poorsus vastavalt standardile EVS-EN 12697-8:2018, kasutades õhuga täidetud pooride leidmise meetodit. Jäävpoorsus arvutati erimassi ja mahumassi tulemuste põhjal, et hinnata asfaltsegu õhupooride sisaldust. [88] [89]

4.3.7 Asfaltsegude veepüsivuse määramine

Standard EVS-EN 12697-12:2018 käsitleb kolme katsemeetodit, et määrata veega küllastamise ja kiirendatult vastavatesse tingimustesse viimise mõju. Antud lõputöö raames valiti veepüsivuse määramiseks meetod A. See seisneb asfaltsegudest silindriliste proovikehade kaudse tõmbetugevuse katsetamises. [90]

Silindrilised katsekehad jaotati kahte gruppi: märg ja kuiv. Märja grupi proovikehad asetati veevanni, kus need küllastusid 40 °C juures 72 tundi, samal ajal hoiti kuiva grupi toatemperatuuril kuivas keskkonnas. Enne katsetamist asetati mõlema grupi proovikehad neljaks tunniks 15 °C juures veevanni. Kuiva grupi proovikehad paigutati enne veevanni veekindlasse kotti, et kaitsta neid märgumise eest. Seejärel määrati kõigile proovikehadele kaudne tõmbetugevus. Katse eesmärk oli määrata märja ja kuiva grupi proovikehade kaudsete tõmbetugevuste suhe protsentides, et hinnata vee mõju bioasfaltsegu toimivusele. [90] [87]

4.3.8 Rattaroopa katse

Proovikehade valmistamine toimus vastavalt standardile EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022. Bioasfaltsegu kuumutati vastavalt biobituumeni penetratsioonile ning asetati risküliku kujulisse katsevormi (Joonis 4.9). Tihendamise vormi suurus oli 320 mm x 260 mm. Tihendamiseks pandi katsekeha spetsiaalsesse tihendusmasinasse ning teostati tihendamine, misjärel lasti proovikehal jahtuda. [91]

Rattaroopa katse viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 12697-22:2020, kasutades B meetodi väikest seadet, mis nõuab vähemalt kahte proovikeha. Enne proovikehade katsemasinasse asetamist kontrolliti nende nimipaksust, kusjuures lubatud hälve nelja

külje keskelt mõõdetuna on maksimaalselt 2,5 mm. Proovikehad peavad enne katset tahenema vähemalt 48 tundi temperatuuril alla 25 °C. Seejärel viidi proovikehad katsetamistemperatuurile, antud juhul 50 °C, ja hoiti neid sellel temperatuuril vähemalt neli tundi (kuni 24 tundi). Pärast seda kinnitati proovikeha katsemasinasse ja käivitati masin, märkides üles ratta vertikaalpaigutuse lugemi. Esimese tunni jooksul kontrolliti lugemit 6-7 korda ja seejärel iga 500 koormustsükli järel. Katse lõpetati, kui oli rakendatud 10 000 koormustsükli või kui roopasügavus saavutas 20 mm. [92]



Joonis 4.9 Biobituumenist AC 16 surf segu rattaroopa katse proovikehad [erakogu]

5. BIOBITUUMENI LABORATOORSETE KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

Järgnevas peatükis on autor keskendunud uuendusliku biobituumeni materjali katsetulemuste põhjalikumale uurimisele. Antud peatükis tutvustatakse Saksamaalt *Instant BioBitumen™*-i omaduste põhjalikke laboratoorsete katsetuste tulemusi (Tabel 5.1), mille eesmärk on määratleda selle sobivus Eestis kasutatava sideainena. Analüüsitud on erinevaid katsete meetodite tulemusi ning võrreldud neid 70/100 naftabituumeniga.

Tabel 5.1 Biobituumeni laboratoorsed katsetulemused

Katse nimi	Ühik	Tulemus
Nõelpenetratsioon	0,1 mm	97
Nõelpenetratsioon (peale asfaltsegust eraldamist)	0,1 mm	55
Pehmenemistäpp	°C	51
Pehmenemistäpp (peale asfalt segust eraldamist)	°C	58,8
Fraassi murdumistäpp	°C	-19
Säilivuskindlus	°C	59,2/59
RTFOT penetratsioon	0,1 mm	46
RTFOT pehmenemistäpp	°C	64
RTFOT massimuutus	%	-1,18
RTFOT jääkpenetratsioon	%	47,4
RTFOT pehmenemistäpi muutus	°C	13
DSR	PG Grade	76/82
Leektäpp	°C	246

Selleks, et hinnata katsetulemusi, kuidas on käitunud biobituumen võrreldes naftabituumeniga, siis järgnevalt on autor väljatoonud vastavalt TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus "Uued viisid bituumensideainete kvaliteediomaduste määramiseks ja võimalused nende rakendamiseks, pidades silmas konkreetsele objektile vastavaid kriteeriume sideaine eeldatavast elueast ja kasutuskohast lähtuvalt" tabeli (Tabel 5.2), kust võrdluseks on leitavad naftabituumenile 70/100 teostatud laboratoorsete katsetuste referentstulemused.

Tabel 5.2 TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus naftabituumenitele teostatud laboratoorsete katsetuste tulemused [1]

Nr	Määratud omadus	Ühik	70/100					Keskmine
			A	B	C	D	E	
1	Penetratsioon	x 0.1 mm	84,0	74,0	83,0	88,0	82,0	82,2
2	Pehmenemistäpp	°C	45,4	46,6	45,8	46,4	52,0	47,2
3	RTFOT kuumutuskadu	%	-0,17	0,00	0,11	0,05	0,01	0,0
4	RTFOT penetratsioon	x 0.1 mm	54,0	50,0	54,0	61,0	56,0	55,0
5	RTFOT pehmenemistäpp	°C	51,2	51,6	50,6	51,2	59,6	52,8
6	eBBR temperatuurikadu	°C	0,3	6,6	5,0	6,9	7,1	5,18
7	PG vahemikud		64-22	58-22	58-22	58-28	70-28	
8	Jääkpenetratsioon	%	64,0	68,0	65,0	69,0	68,0	66,8
9	Pehmenemistäpp	°C	5,8	5,0	4,8	4,8	7,6	5,6
10	Murdumistäpp	°C	-16,0	-15,0	-20,0	-18,0	-24,0	-18,6
11	Leektäpp	°C	316,0	276,0	352,0	338,0	316,0	319,6

Lisaks on oluline välja tuua vastavalt standardi EVS 901-2 järgsed nõuded teebituumenitele (Joonis 5.1):

Omadus	Ühik	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	Katsemeetod
Penetratsioon, 25 °C	0,1 mm	35 – 50	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220	EVS-EN 1426
Pehmenemistäpp	°C	50 – 58	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43	EVS-EN 1427
Kinemaatiline viskoossus, 135 °C	mm ² /s	≥ 370	≥ 295	≥ 230	≥ 175	≥ 135	EVS-EN 12595
Dünaamiline viskoossus, 60 °C	Pa×s	≥ 225	≥ 145	≥ 90	≥ 55	≥ 30	EVS-EN 12596
Murdumistäpp	°C	≤ miinus 5	≤ miinus 8	≤ miinus 10	≤ miinus 12	≤ miinus 15	EVS-EN 12593
Pärast kuumutamist, RTFOT, 163 °C:							EVS-EN 12607-1
- massi muutus, max	massi %	± 0,5	± 0,5	± 0,8	± 0,8	± 1,0	
- jääkpenetratsioon	%	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37	
- pehmenemistäpi tõus	°C	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11	EVS-EN 1427
Leektäpp, Clevelandi lahtine tiigel	°C	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220	EVS-EN ISO 2592
Lahustuvus tolueenis	massi %	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	EVS-EN 12592

Joonis 5.1 Teebituumeni standardi EVS 901-2 järgsed nõuded [93]

5.1 Nõelpenetratsiooni tulemused

Katse eesmärgiks oli määrata biobituumeni viskoossus. Laboratoorselt biobituumeni nõelpenetratsiooni määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1426:2015 kirjeldatud meetodist. Katsetamisel saadud biobituumeni nõelpenetratsiooni tulemused on välja toodud Tabelis 5.1 Tuleb nentida, et biobituumeni nõelpenetratsiooni tulemus 97 on tavapärasest kõrgem, kui keskmiselt naftabituumenitel (Tabel 5.2), kuid lubatud piirmäärade vahemikus. Olukorras, kus bituumeni penetratsiooni tulemus on liiga kõrge, on sideaine pehmem ning see võib omakorda mõjutada negatiivselt deformatsioonikindlust. Olukorras kus aga penetratsiooni tulemus on madal, on tegemist jäigema sideainega. See võib omakorda negatiivselt mõjutada pragunemiskindlust. [94] Kuid leitud tulemuste põhjal saame järeldada, et antud biobituumen võiks käituda pigem hästi pragunemiskindluse vastu, mida kinnitavad ka eelnevalt teooria osas uuritud uuringute tulemused ning katsega leitud kõrgem biobituumeni nõelpenetratsiooni tulemus.

Lisaks sellele määrati bioasfaltsegust ekstraheeritud biobituumenile nõelpenetratsioon, mille tulemuseks oli 55. Bioasfaltsegust eraldatud biobituumeni nõelpenetratsiooni tulemus viitab sellele, et biobituumen muutub kasutamise ja ekstraheerimise käigus jäigemaks. See võib negatiivselt mõjutada pragunemiskindlust madalatel temperatuuridel. Lisaks sellele vastab nõelpenetratsiooni tulemuse vähenemine ühele penetratsioonivahemikule, mis on ootuspärane nähtus, samastudes naftabituumenitega. Naftabituumenid muutuvad samamoodi jäigemaks pärast nende kasutamist asfaltsegus. [94]

Katsetulemuste põhjal võib järeldada, et antud biobituumen on pigem viskoossne, lisaks annab nõelpenetratsiooni näitaja 97 ettekujutust, et analüüsida tuleb ka hilisemalt deformatsioonikindlust. Asfaltsegust eraldatud biobituumeni nõelpenetratsiooni tulemuse langus 97-lt 55-le annab aimu sellest, et biobituumen käitub sarnaselt naftabituumenile, kus sideaine muutub jäigemaks pärast asfaltsegus kasutamist, kus edasiselt tuleks uurida pragunemiskindlust.

5.2 Pehmenemistäpi määramise tulemused

Bituumeni pehmenemistäpp iseloomustab temperatuuri, mille juures eeldatakse, et bituumen muutub teekattes kasutuks ja ei ole võimeline vastu võtma liikluse poolt tekitatud koormusi. Mida kõrgem on bituumeni pehmenemistäpp, seda parem on selle bituumeni vastupidavus plastsetele deformatsioonidele. [94]

Tabelis 5.1 on välja toodud katsetulemused. Vastavalt standardi EVS 901-2 esitatud nõuetele, peab 70/100 bituumeni pehmenemistäpi vahemik olema 43-51 °C vahel. Katsetatud biobituumeni pehmenemistäpi tulemuseks saadi 51 °C, mis on 70/100 naftabituumenitele standardis kehtestatud ülemise piiri lähedal (Joonis 5.1). Naftabituumenite keskmise pehmenemistäpi tulemustega võrreldes (Tabel 5.2) on näha, et biobituumeni pehmenemistäpi tulemus on ca 3 °C kõrgem. Olukorras, kus pehmenemistäpi väärtus on madal, on tegemist pehmema sideainega, mis omakorda võib mõjutada deformatsioonikindlust. Samas, kui pehmenemistäpi väärtus on kõrgem, on tegemist jäigema bituumeniga, mis võib tingida asfaltsegu väiksema pragunemiskindluse. [94] Teisalt saab järeldada, et antud biobituumeni kõrgem pehmenemistäpi väärtus võib viidata sellele, et biobituumeni käitumisomadused on paremad kõrgetel temperatuuridel.

Lisaks eelnevale määrati ka asfaltsegust ekstraheeritud biobituumenile pehmenemistäpp, mille tulemuseks oli 58,8 °C. Tuleb mainida, et asfaltsegust ekstraheeritud bituumeni pehmenemistäpile, pole Eestis kehtestatud standarditega nõutud miinimum- ega ka maksimummäär. Siiski saame järeldada, et pärast kasutamist asfaltsegu ja ekstraheerimist tõusis biobituumeni pehmenemistäpp 51 °C -lt 58,8 °C-ni, mis näitab, et biobituumen muutub kasutamise käigus märgatavalt jäigemaks. Suurem jäikus võib parandada deformatsioonikindlust kuumadel ilmastikutingimustel, kuid liiga suur jäikus võib negatiivselt mõjutada pragunemiskindlust, eriti madalatel temperatuuridel.

Nõelpenetratsiooni tulemused viitasid sellele, et antud biobituumen käitub paremini madalamatel temperatuuridel ning halvemini kõrgematel temperatuuridel. Pehmenemistäpi tulemused näitasid, et biobituumen võiks paremini käituda kõrgematel temperatuuridel ning halvemini madalamatel temperatuuridel. Kokkuvõtvalt saame järeldada, et katsetatud biobituumen on käitunud täiesti omapärasel moel, kus eelnevalt teostatud katsemeetodide tulemused tekitavad teineteisele vasturääkivusi.

5.3 Fraass'i murdumistäpi määramise tulemused

Fraass'i murdumistäpi määramisel lähtuti standardist EVS-EN 12593:2015. Katse tulemused on esitatud Tabelis 5.1 Vastavalt standardi EVS 901-2 väljatoodud nõuetele, peab naftabituumeni murdumistäpp olema vähemalt -10 °C. Laboratoorse katse tulemuse käigus leiti, et katsetatud biobituumeni murdumistäpp oli -19 °C, täites ära ka 100/150 ja 160/220 naftabituumeni miinimum murdumistäpi nõude.

Kokkuvõttes võib öelda, et testitud biobituumen ületab oluliselt standardis nõutud miinimumnõude, mis teeb sellest atraktiivse materjali kasutamiseks külmades kliimatingimustes.

5.4 Säilivuskindluse määramise tulemused

Säilivuskindluse määramisel lähtuti vastavalt standardile EVS-EN 13399:2017. Säilivuskindluse katse tulemused on esitatud Tabelis 5.1. Taaskord on tähtis välja tuua, et tegelikult ei olnud see katse biobituumeni korral oluline, sest seda ei ole vaja hoiustada. Tootja poolt tarnitav biobituumen on eraldatud malteenideks ja asfalteenideks, mis on hoiustatavad toatemperatuuridel. Katse sooritati informatiivsel mõttel, et veenduda, kui stabiilne on biobituumen kõrgetel temperatuuridel. Lisaks sellele, et hinnata biobituumeni ladustamise stabiilsust sarnaselt naftabituumenile, mis on oluline, kuna bituumensidemed võivad pikemaajalisel säilitamisel eralduda oma koostisosadeks. See võib mõjutada sideme toimivust ja kvaliteeti, kui seda lõpuks asfaltsegudes kasutatakse.

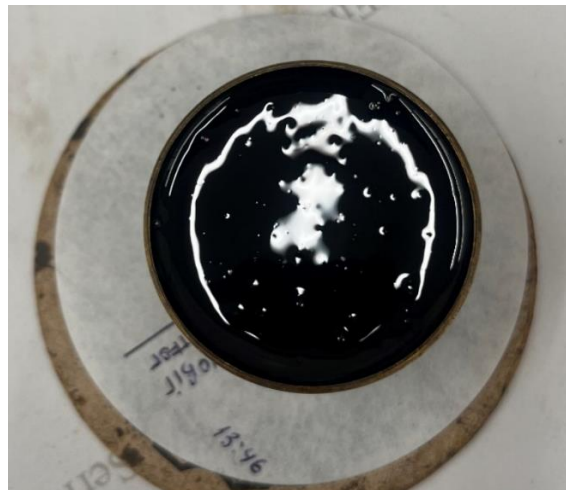
Testi tulemustest võib järeldada, et kui üla- (59,0 °C) ja alaproovi (59,2 °C) pehmenemistäpi tulemused on sarnased, viitab see sellele, et koostisosade sidemetel on hea homogeensus ja see on ladustamise ajal stabiilne. See tähendab, et komponendid ei eraldu oluliselt. Sellel on positiivne mõju biobituumeni toimivuse ühtluse säilitamiseks. Lisaks saame järeldada, et kui biobituumeni koostisosade sidemed, mis püsivad ladustamistingimustes stabiilsena, siis on tõenäolisem, et biobituumen toimib samuti ka tee-ehitusprotsessis oodatud viisil. See annab aimu, et biobituumenil on ühtlased sidumisomadused kogu partii ulatuses, mis mõjutavad hilisemalt positiivses suunas asfaltkatte toimivust.

Samas on tähtis välja tuua pehmenemistäpi tulemuste erinevus peale säilivuskindluse katset võrrelduna esialgsest tulemusest (51 °C). Tuleb tõdeda, et võrreldes esialgse tulemusega tõusis pehmenemistäpp peale säilivuskindluse katset oluliselt, mis näitab, et biobituumen muutub eelnevalt segatuna ladustamise käigus märgatavalt jäigemaks. Samamoodi saame siin eeldada, et suurem jäikus võib parandada deformatsioonikindlust kuumadel ilmastikutingimustel, kuid liiga suur jäikus võib negatiivselt mõjutada pragunemiskindlust, eriti madalatel temperatuuridel. Siin kohal on tähtis rõhutada, et antud biobituumeni puhul tuleb kinnipidada tootja pooletest juhistest, kus oli selgelt öeldud, et antud biobituumenit ei tohiks ette segada, ega mahutisse ootele panna.

5.5 RTFOT vanandamise tulemused

RTFOT vanandamine ja massimuutuse määramine teostati vastavalt standardile EVS-EN 12607-1:2014. RTFOT vanandamisest saadud biobituumeni proovist ei saadud peale proovide kokku segamist kõiki õhumulle täielikult välja, mis on näha Joonisel 5.2

Tulenevalt sellest ei ole teada täpset mõju katsetulemustele. Katsetulemused on välja toodud Tabelis 5.1 Biobituumeni penetratsiooni tulemus langes peale RTFOT katset 53 %, samas TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus on välja toodud, et naftabituumenite keskmiste tulemuste põhjal langes penetratsiooni tulemus peale RTFOT katset 33 % (Tabel 5.2). Biobituumeni pehmenemistäpp tõusis peale RTFOT katset 13 °C ehk 25 %, samas allikas [1] TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus on välja toodud, et naftabituumenite keskmiste tulemuste põhjal tõusis pehmenemistäpp 5,6 °C ehk 12 %. Biobituumeni jääkpenetratsiooniks saadi 47,4 % , kus TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus on välja toodud, et naftabituumenite keskmiste tulemuste põhjal oli jääkpenetratsiooniks 66,8 %. Biobituumeni massimuutus peale RTFOT katset oli -1,18 %, mis on silmämärgatavalt rohkem, kui TTÜ Teedeinstituudi uuringus kajastatud 70/100 naftabituumenite üksikud tulemused. Nagu eelnevalt mainitud, siis vanandamisest saadud bituumeni proovist ei saadud peale proovide kokku segamist kõiki õhumulle täielikult välja, millest tulenevalt ei ole teada selle mõju katsetulemustele. Järeldusi saab teha vastavalt üksnes olemasolevate andmete põhjal. Biobituumeni 53 %-lise penetratsiooni tulemuse langus ja pehmenemistäpi 25 %-line tõus annab aimu sellest, mis toimub biobituumenist asfaltsegu valmistamisel, transpordil ja teekatete ehitusel kõrgetel temperatuuridel. Penetratsiooni ja pehmenemistäpi katsetulemustest saame järeldada, et vananenud biobituumenil on väiksem vananemiskindlus (mis võib viidata ka halvemale pragunemiskindlusele). Mida väiksemad on muutused katsetulemustes, seda parem.



Joonis 5.2 RTFOT vanandamisest saadud biobituumeni proov [Erakogu]

5.6 PAV vanandamine

PAV vanandamise käigus tekkis proovi pinnale kile, mis oli vaja enne eBBRi katsekehade väljavalamist eemaldada, et segu oleks ühtlane ja valatav (Joonis 5.3 ja 5.4). Joonisel 5.4 on näidatud kogu kile, mis eBBRi katsest välja jäi. Antud kile tekkimine ei ole tavapärane,

mis tõttu eBBR katsesse ei jõudnud kogu katseanumas olnud materjal ning mõju katse tulemustele ei ole teada.



Joonis 5.3 PAV vanadamise käigus katseanumale tekkinud kile [erakogu]



Joonis 5.4 PAV vanadamise käigus tekkinud kile, mis eBBRi katses välja jäi [erakogu]

5.7 Pikendatud BBR (eBBR) meetodi tulemused

Laboratoorne katse teostati vastavalt peatükis (3.9) kirjeldustele. Katse tulemused on esitatud Tabelis 5.3, mille kohaselt katsetatud biobituumeni omaduste määramine madalatel temperatuuridel, kasutades pikendatud BBR (eBBR) meetodit, viitab sellele, et biobituumenil esineb vähesel määral vananemisega kaasnevat jäigenemise probleemi.

Tulemused näitavad, et 72 tunni jooksul hoitud proovikehad muutuvad jäigemaks võrreldes ühe tunni jooksul hoitud proovikehadega, kuna temperatuur, kus jäikus (S) on 300 MPa, langes $-35,9\text{ °C}$ -lt $-38,3\text{ °C}$ -ni ja temperatuur, kus m-väärtus on 0,300, tõusis $-31,2\text{ °C}$ -lt $-27,3\text{ °C}$ -ni. Temperatuurikadu, mis on $3,9\text{ °C}$, jääb soovitud temperatuuride $3\text{...}6\text{ °C}$ vahemikku. Teostatud katse kohaselt peaks katsetatud biobituumen olema piisavalt vastupidav pragunemiste vältimiseks madalatel temperatuuridel.

BBR katse kohaselt on katsetatud biobituumeni madalatemperatuuriline toimivus $-31,2\text{ °C}$, mille põhjal PG klassifitseerimise süsteemi järgi tuleb selle klassiks -28 °C . Peale pikendatud BBR katset (eBBR) määramaks pöörduvat jäigenemist, tõuseb madalatemperatuuriline toimivus $-27,3\text{ °C}$ juurde, mis muudab biobituumeni PG klassifitseerimise süsteemi järgi klassiks -22 °C , *split grade* (PG temperatuurid 2 °C

sammuga) järgi -26 °C juurde. Tulenevalt sellest saame järeldada, et katsetulemused on vajalikes piirides, kuid siiski ei suuda biobituumen säilitada oma algseid omadusi. Võrreldes allikaga [1] TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus (Tabel 5.2), siis biobituumen on oma omadusi madalatel temperatuuridel paremini säilitanud, kui naftabituumenid.

Tabel 5.3 Pikendatud BBR (eBBR) meetodi tulemused biobituumeniga

Näitaja	1 h	72 h	Temperatuuri kadu, °C
Temperatuur, kus $S=300$ MPa, °C	-35,9	-38,3	3,9
Temperatuur, kus m -value=0,300, °C	-31,2	-27,3	
Määrav temp., °C	-31,2	-27,3	

5.8 DSR katse tulemused

Järgnevalt läbiviidud katse viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 14770:2023. DSR katse peamiseks eesmärgiks oli hinnata biobituumeni vastupidavust roobaste tekkele.

Vastavalt AASHTO M320 bituumeninõuetele, peavad vanandamata bituumenid täitma kompleksmooduli tulemuse minimaalselt 1,0 kPa. Antud biobituumen saavutas vajaliku sitkuse 76 °C juures.

Peale RTFOT vanandamist on kompleksmooduli miinimumnõudeks 2,2 kPa. Antud biobituumen saavutas vajaliku nõude 82 °C juures.

Vastavalt TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus leiti, et penetratsiooniga 70/100 naftabituumenid saavutasid vajaliku nõud 1 kPa keskmiselt 58 °C juures. [1] Biobituumeni katsetulemus 76 °C viitab sellele, et biobituumen on jäigem kõrgematel temperatuuridel.

Peale RTFOT vanandamist täitsid osad 70/100 naftabituumenid nõude 64 °C juures ning üks 70/100 naftabituumen 70 °C juures. Biobituumeni katsetulemus 82 °C viitab sellele, et biobituumen vananeb kiiremini, kui naftabituumen.

Vastavalt eBBRi ja DSRi tulemustele on biobituumeni PG 76-28, PG *split grade* 76-30 ja PG *true grade* 76-31. Võrreldes allikas [1] TTÜ Teedeinstituudi poolt tehtud uuringus leitud tulemustele (Tabel 5.2), saame järeldada, et biobituumeni temperatuuriline toimivus vahemik on suurem kui tavapärasel naftabituumenitel.

5.9 Leektäpi määramise tulemused

Tulenevalt standardi EVS 901-2 järgi on naftabituumeni penetratsiooniga 70/100 leektäpi nõue on võrdne või suurem 230 °C. Vastavalt standardile ISO 2592:2017 tehtud katsele jõuti tulemusele, et biobituumeni pinnalt eralduvate aurude süttimistemperatuur oli 246 °C (Tabel 5.1). Selle tulemusega on küll täidetud vastavalt 70/100 naftabituumenitele ette antud nõue, kuid tuleb mainida, et naftabituumenite pinnalt eralduvate aurude keskmine süttimistemperatuur on ca 300 °C. Siit same järeldada biobituumeni kohta erinevaid asju:

1. **Madalam süttimistemperatuur:** Biobituumen, mille leektäpi temperatuur on 246 °C, on potentsiaalselt ohtlikum kui bituumen, mille leektäpi temperatuur on kõrgem. See süttib madalamal temperatuuril, mis suurendab riski selle käsitlemisel, transportimisel ja kasutamisel.
2. **Võimalikud erinevused koostises:** Madalam leektäpi temperatuur võib viidata sellele, et biobituumeni koostises on suurem osa kergemini lenduvaid ühendeid. See võib mõjutada ka bituumeni muid omadusi, nagu näiteks selle viskoossus ja vastupidavus vananemisele jne.
3. **Kvaliteet ja kasutusala:** Sõltuvalt kasutusala võib madalama leektäpi temperatuuriga bituumen olla vähem sobiv teatud oludes, eriti kõrgematel temperatuuridel töötamiseks. Näiteks võib see nõuda täiendavaid meetmeid või modifikatsioone, et tagada nõutav töökindlus ja ohutus.

6. BIOASFALTSEGU KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

Järgnevas peatükis annab lõputöö autor ülevaate erinevate katsete tulemustest, et hinnata biobituumenil põhinevate asfaltsegude omadusi ja nende potentsiaali kasutamiseks tee-ehituses. Katsete hulka kuulusid sideaine ja lisandi põhjalik segamine High Shear mikseriga, sideainesisalduse ja terakoostise täpne määramine, samuti Marshall-proovikehade valmistamine valmissegust. Lisaks hõlmab peatükk asfaltsegude füüsikaliste omaduste, nagu mahumassi määramist ning veepüsivuse analüüsi läbi viimist. Veel ühe olulise osana analüüsitakse rattarooma katset, mis simuleerib reaalseid liikluskoormusi ja mõõdab bioasfaltsegu vastupidavust ning deformatsioone. Osalised laboratoorsed katsetulemused on välja toodud Tabelis 6.1.

Tabel 6.1 Asfaltsegude laboratoorsed tulemused

Katsetulemuse nimi (tähis)	Ühik	Biobituumen AC 16 surf	Naftabituumen AC 16 surf (T-2)
Lahustuva sideaine sisaldus (S)	%	5,0	5,0
Erimassi (ρ_{mv})	Mg/m ³	2,546	2,547
Mahumass (ρ_{bssd})	Mg/m ³	2,518	2,501
Jäävpoorsus (V_a)	%	1,1	1,8

6.1 Lahustuva sideaine sisalduse määramise tulemused

Referentssegus kasutati naftabituumenit ja katsetatud asfaltsegu biobituumenit, kus laboratoorsete katsete tulemusena oli mõlema segu lahustuva sideaine sisaldus 5 % (Tabel 6.1 ja Lisa 5), kuigi plaanitud oli 5,2 %. See annab olulist informatsiooni nende kahe erineva bituumeni käitumise kohta asfaltsegu. Tulenevalt katsetulemusest täitis bioasfaltsegu AC 16 surf ära standardis EVS 901-3:2021 AC surf segule määratud minimaalse sideaine sisalduse nõude.

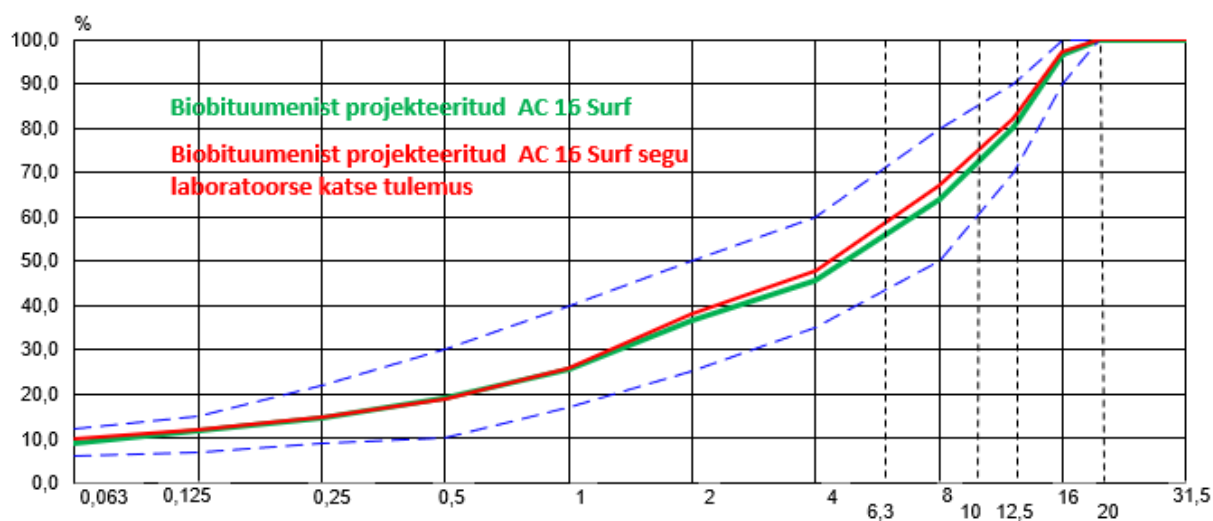
Sarnane käitumine kuumsegus: Tulemused näitavad, et mõlemad bituumenitüübid (nafta- ja biobituumen) käitusid laboratoorsetes tingimustes sarnaselt, kuna mõlema seguga saavutati sarnane sideaine sisaldus. See viitab sellele, et biobituumen võiks olla potentsiaalne asendaja naftabituumenile teatud asfaltsegudes.

Mõõtmiste ja segamise täpsus: Et mõlemad bituumenid andsid katses sarnaseid tulemusi, viitab see ka sellele, et laboratoorse segamisprotsessi täpsus ja korduvus on

piisavalt hea. See on oluline, sest kinnitab katsetulemuste usaldusväärsust ja bituumenite omaduste objektiivset võrdlust.

6.2 Terastikulise koostise määramise tulemused

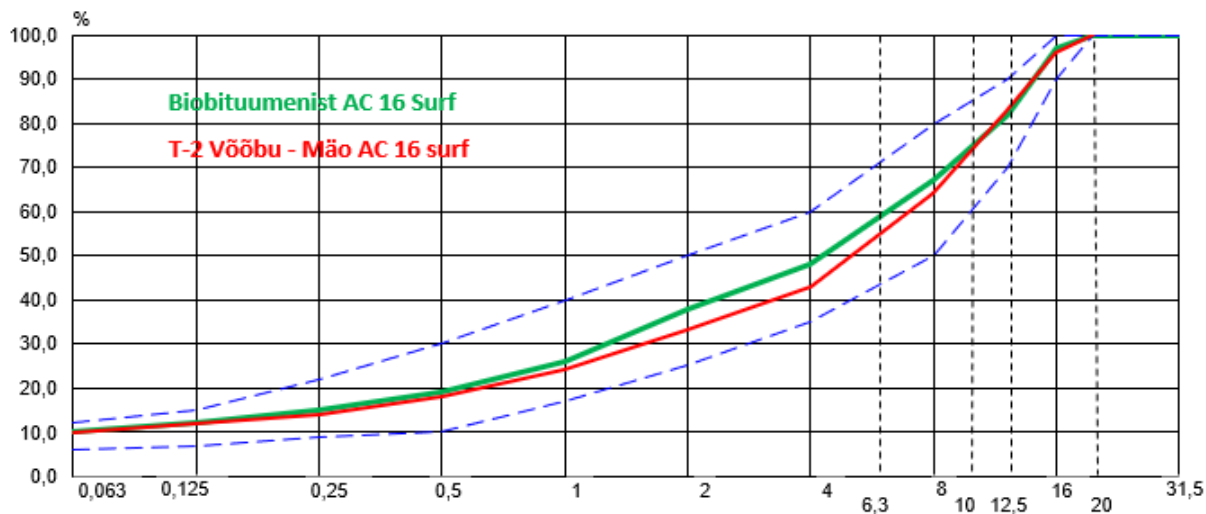
Biobituumenist asfaltsegu ja naftabituumenist asfaltsegu puhul näib, et laboratoorses tulemustes on sõelte läbindprotsendid veidi erinevad projekteeritud andmetest (Tabel 6.2). See võib olla tingitud mitmest tegurist, sealhulgas materjali heterogeensusest, proovivõtu variatsioonidest või laboratoorsete meetodite erinevustest. Mõlema segu laboratoorsete tulemuste erinevused on suuremas osas tingitud täitematerjalide enda terastikulise koostise tulemustest, mis segude projekteerimisel arvesse võetakse. Biobituumenist asfaltsegu projekteerides üritati saavutada võimalikult sarnane segu vastavalt T-2 Võõbu – Mäo asfaltsegule. Tuleb tõdeda, et suurema fraktsiooniga täitematerjalide osas ei suudetud segu projekteerida selliselt, et see vastaks täielikult referentssegule (segu muutus nõ „peenemaks“). Hilisemalt on ka näha seda, et biobituumenist AC 16 surf segu laboratoorse tulemuse sõelkõver, sõelte vahemikus 1mm kuni 8mm, erineb veelgi enam referentssegu laboratoorse tulemuse sõelkõverast (Joonis 6.2). Siiski saab täheldada, et biobituumenist AC 16 surf segu sõelkõver on lubatud maksimum-miinum piiride vahemikus ja vastab Eestis kehtivatele nõuetele. On positiivne, et projekteeritud biobituumenist AC 16 surf segu terastikulise koostise tulemused on valdavalt samad, mis hilisemalt valmis biobituumenist AC 16 surf segule laboratoorselt määrati. Biobituumenist asfaltsegu projekteeritud ja valmis segu laboratoorsete katsetulemuste sõelkõverate suurimad erinevused esinevad endiselt 1mm ja 8mm sõelte vahel (Joonis 6.1).



Joonis 6.1 Biobituumenist projekteeritud AC 16 surf segu sõelkõver võrrelduna laboratoorse katse tulemuse sõelkõveraga

Tabel 6.2 Biobituumenist AC 16 surf segu ja T-2 Võõbu – Mäo AC 16 surf (Lisa 2 ja 3) segu terastikuliste koostise võrdlus

	Projekteeritud		Laboratoorsed tulemused	
	Biobituumenist AC 16 surf	Naftabituumenist AC 16 surf (T-2)	Biobituumenist AC 16 surf	Naftabituumenist AC 16 surf (T-2)
Sõel, mm	Läbind, %	Läbind, %	Läbind, %	Läbind, %
0,063	8,9	8,6	10	9,8
0,125	12	11	12	12
0,25	14	15	15	14
0,5	19	19	19	18
1	26	25	26	24
2	37	36	38	33
4	45	47	48	43
8	64	66	67	64
12,5	80	85	82	83
16	97	95	97	96
20	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100
40	100	100	100	100



Joonis 6.2 Biobituumenist AC 16 surf segu laboratoorselt määratud terastikulise koostise sõelkõver võrrelduna T-2 Võõbu – Mäo AC 16 surf segu laboratoorselt määratud terastikulise koostise sõelkõveraga (põhineb Tabel 6.2 tulemustel)

Lisaks sellele annab see aimu, et antud terastikulise koostise tulemuste erinevused võivad mõjutada järgnevalt tehtud laboratoorseid katseid nagu mahumass, erimass ja jäävpoorsus, mille tulemusi on autor järgmisena analüüsinud.

6.3 Näiva erimassi, mahumassi ja poorsusomaduste tulemused

6.3.1 Erimass

Asfaltsegu proovi näiva erimassiga määratakse proovi massi suhe tema avatud poorideta mahtu, mille ühikuks on Mg/m^3 . Erinevus kahe segu vahel on äärmiselt väike, vaid 0,001 Mg/m^3 , mis praktilises mõttes on olematu ja näitab, et mõlemad materjalid on erimassi osas peaaegu identsed (Tabel 6.1). Biobituumenist asfaltsegu mõõtmised teostati veidi kõrgemal temperatuuril (23,1 °C) võrreldes naftabituumeni mõõtmistega (20,0 °C). See temperatuurierinevus võib mõjutada mõõtmistulemusi, kuna materjalide tihedus võib temperatuuri tõustes veidi väheneda, kuid mõju katsetulemustele ei ole teada. Siiski, vaadeldav väike erinevus erimassi mõõtmistes viitab sellele, et temperatuurimõju oli minimaalne. Biobituumenist asfaltsegu ja naftabituumenist asfaltsegu sarnased erimassid viitavad sellele, et mõlemad materjalid käituvad veekeskkonnas sarnaselt, mis on oluline näiteks asfaltsegu paigaldamisel ja selle käitumisel niisketes tingimustes.

6.3.2 Mahumass Meetod B

Proovikehad valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12697-30 (2x50 lööki, 145°C). Tulemused on esitatud Tabelis 6.1. Erinevus mahumassides on 0,017 Mg/m^3 , mis on suhteliselt väike, kuid oluline, näidates, et biobituumenist asfaltsegu on veidi tihedam kui naftabituumenist asfaltsegu. Kõrgem mahumass biobituumenist asfaltsegul võib viidata paremale tihendatusele. Kõrgem mahumass biobituumenist asfaltsegul võib aidata kaasa paremale vastupidavusele roobaste tekkele, kuna tihedam materjal võib paremini vastu pidada mehaanilisele pingele. See mõjutab asfaltsegu stabiilsust ja vastupidavust.

6.3.3 Poorsusomadused

Tabelis 6.1 esitatud andmed näitavad biobituumenist AC 16 surf ja naftabituumenis AC 16 surf (T-2) asfaltsegude jäävpoorsuste tulemust. Jäävpoorsus on oluline näitaja asfaltsegude kvaliteedi ja vastupidavuse hindamisel. Jäävpoorsus (V_a , %) näitab, kui suur protsent segust koosneb õhust, mis on jäänud materjali tihendamisel segusse. Biobituumenist asfaltsegu on näidanud madalamat jäävpoorsust võrreldes naftabituumenist asfaltseguga. Madalam jäävpoorsus võib viidata paremale tihendatusele, mis tavaliselt tähendab paremat veepüsivust ja vähem võimalusi veekahjustuste tekkimiseks. See tähendab, et biobituumeni segu võib olla vastupidavam ja pikema kasutuseaga, eriti kliimas, kus esinevad tihti sademed või on suur õhuniiskus.

Biobituumenist asfaltsegu parem tihenemisvõime võis tekkida materjali keemilistest omadustest või kasutatud segamismeetodist, mis võimaldasid paremat adhesiooni ja koheesiooni biobituumeni ja täitematerjalide vahel. Siiski tuleb nentida, et biobituumeni jäävpoorsuse tulemus ei vasta standardile EVS 901-3:2021, kus AC surf segule esitatud minimaalse ja maksimaalse poorsuse vahemik on 1,5-5 %. Lisaks tuleb üles tõstada kahtlus, et biobituumenist asfaltsegu võis olla hoopis ületihendatud. Ületihendamine viitab tihti kehvale deformatsioonikindlusele. Deformatsioonikindluse täpsemad tulemused on analüüsitud rattaroota katse juures.

6.4 Biobituumenist asfaltsegu veepüsivuse määramise tulemused

Asfaltsegu veepüsivuse näitaja *ITSR* (ing. *Indirect Tensile Strength Ratio*) on üks peamisi teste, mida kasutatakse asfaltbetoonsegu veekindluse või veepüsivuse määramiseks. *ITSR* 90% tähendab, et pärast veega küllastumist on biobituumenist asfaltsegu säilitanud 90 % oma algsest tugevusest (Tabel 6.3). *ITSR* annab olulist teavet asfaltsegu veekindluse kohta. Kõrgemad *ITSR* väärtused (lähedal 100 %-le) näitavad, et asfaltsegu peab paremini vastu vee tekitatud kahjustustele, säilitades oma tugevuse ka niisketes või märgades tingimustes. Vastavalt standardile EVS 901-3:2021, AC 16 surf segule esitatud minimaalne veepüsivuse näitaja on 90 %. Järelikult biobituumenist asfaltsegu on täitnud vastavalt standardile miinimumnõude.

Tähtis on siinkohal välja tuua, et T-2 Võõbu – Mäo referentssegus veepüsivuse katse tulemustel, oli katsekehade kaudne tõmbetugevus kuivadel kehadel 2511 kPa, märgadel katsekehadel 2395 kPa ning *ITSR* 95 % (Lisa 5). Kui vaadelda ainult biobituumenist ja naftabituumenist asfaltsegude katsekehade kaudset tõmbetugevust, ilma *ITSR*-i arvutamata, saame teha järgmised järeldused nende füüsikaliste omaduste ja mehaaniliste omaduste kohta: **kuivade katsekehade tõmbetugevus:** 1) Biobituumen asfaltsegu: 1785 kPa; 2) Naftabituumen asfaltsegu: 2511 kPa. Järeldus: Naftabituumenist asfaltsegu näitab märkimisväärselt suuremat tõmbetugevust kuivas olekus, võrreldes biobituumen asfaltseguga. See viitab, et naftabituumeni segu on mehaaniliselt tugevam, mis võib anda eeliseid koormustaluvuse ja teekatte pikaajalise vastupidavuse osas. **Märgade katsekehade tõmbetugevus:** 1) Biobituumen asfaltsegu: 1611 kPa; 2) Naftabituumen asfaltsegu: 2395 kPa. Järeldus: Sarnane trend jätkub ka märgades tingimustes, kus naftabituumeni asfaltsegu säilitab suurema tõmbetugevuse. Suurem tõmbetugevus märgades tingimustes viitab sellele, et naftabituumenist asfaltsegu on vastupidavam niiskusele ning veega kokkupuutel.

Tabel 6.3. Biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu veepüsivuse määramise tulemused

Veepüsivus, meetod A						
	Nr.	Paksus, mm	Diameeter, mm	Mahumass, Mg/m ³	Kaudne tõmbetugevus, kPa	ITSR, %
Märg grupp	1	63,2	101,5	2,457	1611	90
	2					
	5					
Kuiv grupp	3	63,07	101,5	2,455	1785	
	4					
	6					

6.5 Rattarooma katse ja jäävdeformatsiooni vastupanu tulemused

Tabel 6.4. Biobituumenist ja naftabituumenist AC 16 surf (T-2) segude rattarooma katse ja jäävdeformatsioonide võrdlus

BIOBITUUMENIST ASFALTSEGU AC 16 SURF (50 °C)				
Näitaja	Tähis	Proovikeha 1	Proovikeha 2	Keskmine
Katse temperatuur, °C		50	50	50
Paksus, mm	<i>h</i>	60,4	60,4	60,4
Mahumass, Mg/m ³	ρ_{bdim}	2,496	2,496	2,496
Roobastumise tõus, mm/1000 tsüklit	<i>WTS_{air}</i>	0,08	0,12	0,10
Roopasügavus, mm	<i>RD_{air}</i>	3,46	3,92	3,69
Suhteline roopasügavus, %	<i>PRD_{air}</i>	5,70	6,50	6,10
BIOBITUUMENIST ASFALTSEGU AC 16 SURF (60 °C)				
Näitaja	Tähis	Proovikeha 1	Proovikeha 2	Keskmine
Katse temperatuur, °C		60	60	60
Paksus, mm	<i>h</i>	60,3	60,3	60,3
Mahumass, Mg/m ³	ρ_{bdim}	2,502	2,506	2,504
Roobastumise tõus, mm/1000 tsüklit	<i>WTS_{air}</i>	0,08	0,1	0,09
Roopasügavus, mm	<i>RD_{air}</i>	4,29	4,79	4,54
Suhteline roopasügavus, %	<i>PRD_{air}</i>	7,10	7,90	7,50
NAFTABITUUMENIST ASFALTSEGU AC 16 SURF (T-2) (50 °C)				
Näitaja	Tähis	Proovikeha 1	Proovikeha 2	Keskmine
Katse temperatuur, °C		50	50	50
Paksus, mm	<i>h</i>	60,1	60,1	60,1
Mahumass, Mg/m ³	ρ_{bdim}	2,486	2,486	2,486
Roobastumise tõus, mm/1000 tsüklit	<i>WTS_{air}</i>	0,08	0,08	0,08
Roopasügavus, mm	<i>RD_{air}</i>	4,00	3,60	3,80
Suhteline roopasügavus, %	<i>PRD_{air}</i>	6,70	6,00	6,30

Tabelis 6.4 esitatud tulemuste põhjal on autor võrrelnud biobituumenist ja naftabituumenist asfaltsegude katsetulemusi 50 °C juures järgnevalt:

Mahumass: Biobituumenist asfaltsegu mahumass on 2,496 Mg/m³ ja naftabituumenist asfaltsegu 2,486 Mg/m³. See näitab, et biobituumenist segu on veidi tihedam.

Roobastumise tõus (WTS): Mõlemad segud näitavad sarnast roobastumise tõusu 0,08 - 0,10 mm/1000 tsükli, mis viitab laboritingimustes nende sarnasele vastupanuvõimele ratta koormuse katses.

Roopasügavus (RD): Biobituumenist asfaltsegu roopasügavus on väiksem (keskmiselt 3,69 mm), võrreldes naftabituumenist asfaltseguga (keskmiselt 3,80 mm). See näitab, et biobituumenist asfaltsegu võib olla veidi vastupidavam rasketele koormustele.

Suhteline roopasügavus (PRD): Biobituumenist asfaltsegu näitab suhtelist roopasügavust keskmiselt 6,10%, samas kui naftabituumenist asfaltsegu on 6,30%. Kuigi erinevus on väike, näitab see, et biobituumenist segu on vastupidavam deformatsioonidele.

Vastavalt standardile EVS 901-3:2021 võib AC 16 surf segule määratud maksimaalne suhteline roopasügavus (PRD_{air}) olla vahemikus 16-9%. Projekteeritud biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu täidab ära vastavalt AKÖL $\geq 12\ 000$ esitatud nõude, milleks on kuni 9%.

Kuna 50°C juures teostatud katsel näitas biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu võrdlemisi häid tulemusi, siis otsustati katse korrata ning uuesti läbi viia 60 °C juures (Tabel 6.4). Võrreldes omavahel biobituumenist ja naftabituumenist asfaltsegusid, siis kokkuvõtvalt saab järeldada, et biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu näib olema stabiilsem madalamal temperatuuril (50°C), kui naftabituumenist AC 16 surf asfaltsegu. Biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu näitab kõrgematel temperatuuridel (60 °C) suuremaid deformatsioone, kui 50 °C juures. PRD tulemuse tõus 6,1 pealt 7,5-le on tegelikult väga väike muutus 50 °C ja 60 °C vahel. Naftabituumenist asfaltsegudele teostatud laboratoorsete katsetuste käigus on täheldatud, et üldjuhul teeb deformatsiooni näitaja märgatava hüppe antud temperatuuride vahel. Lisaks sellele on huvitav tulemus 60 °C katse juures ka see, et biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu roobastumise tõusu näitaja (WTS_{air}) on langenud 0,001 mm. Jätakuvalt on biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu lubatud maksimaalse suhtelise roopasügavus (PRD_{air}) vahemikus ning täidab ära vastavalt AKÖL $\geq 12\ 000$ esitatud nõude, milleks on kuni 9 %.

Deformatsioonikindluse tulemuste juures saame konstanteerida, et biobituumen käitub naftabituumenist erinevalt, aga selles kontekstis paremini. Eelnevalt tõstatatud kahtlus, et biobituumenist AC 16 surf asfaltsegu võib jäävpoorsuse katsetulemuse põhjal tunduda ületihenenud, sai ümber lükatud rattaroopa katsega. Katse näitas, et see ei tähenda tingimata halba deformatsioonikindlust.

Kokkuvõttes näitab biobituumenist asfaltsegu pisut paremaid tulemusi deformatsioonikindluses. Kuigi erinevused on väikesed, võib see viidata sellele, et biobituumeni baasil asfaltsegud võivad teatud tingimustes pakkuda paremat vastupidavust. Mõõtmistulemused näitavad, et kuigi biobituumenist ja naftabituumenist asfaltsegude vahel on vastupidavuses ja deformatsioonitaluvuses väikeseid erinevusi, on sellegipoolest mõlemad segud oma toimivusomaduste poolest üsna võrreldavad.

7. JÄRELDUSED JA SOOVITUSED

Eelnevates peatükkides esitatud katsetulemuste põhjal võib järeldada, et vaadeldud biobituumen Instant BioBitumen™, on võrreldes naftabituumeniga täitnud mitmed Eestis kehtivates standardites esitatud nõuded olles seega naftabituumeniga võrreldav ning seeläbi oleks justkui võimalik võimalik järeldada, et biobituumeni kasutamisega on võimalik asfaltkatete keskkonnajalajälge vähendada ilma kvaliteedis kaotamata.

Aga, tehes toimivuspõhiseid katseid, tekkisid mitmed kahtlused ja ebakõlad.

Toimivus kõrgete temperatuuride juures:

- Nõelpenetratsioon ja pehmenemistäpp – Vastavad standardile, see läbi on võrreldav. Nõelpenetratsiooni katsetulemus viitab, et biobituumen on pehmem, mistõttu võib see olla vähem vastupidav kõrgetele temperatuuridele. Pehmenemistäpi tulemus vastupidiselt viitab, et biobituumen pigem jäigem ning võiks just hästi toimida kõrgematel temperatuuridel;
- DSR – Katsetulemustest saab järeldada, et biobituumeni kõrgtemperatuuriline näitaja on võrreldes tavapärase naftabituumeniga ebaloomilikult kõrge, mis näitab, et antud biobituumen võis katsekäigus vananeda, millele lisaks viitas ka RTFOT-i katsetulemused;
- Biobituumen on justkui vedelam, aga talub kõrget temperatuuri paremini, kui 70/100 tavapärase naftabituumen, mida tõestas DSR katsetulemus, kus vajalik kompleksooduli tulemus 1 kPa saavutati 76°C juures, võrreldes naftabituumenitega, mille keskmine tulemus oli 58 °C juures. Samuti saab järeldada, et biobituumen on jäigem kõrgematel temperatuuridel, kui võrreldud naftabituumenid.

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et biobituumen käitub leitud katsetulemuste põhjal võrreldes naftabituumeniga väga ebatavalisel moel, kuid kõrgete temperatuuride juures hästi.

Toimivus madala temperatuuride juures:

- Fraass'i murdumistäpp – Biobituumen täitis vastavalt standardis esitatud nõude, kaasa arvatud viskoosseimate bituumenite osas. Võrreldes naftabituumenite murdumistäpi tulemustega on biobituumeni murdumistäpi tulemus võrdlemisi sama.
- Pikendatud BBR (eBBR) katsetulemuste põhjal same järeldada, et biobituumen peaks olema piisavalt vastupidav pragunemiste vältimiseks madalatel temperatuuridel. Lisaks sellele jäid katsetulemused vastavalt PG klassifitseerimis

süsteemi etteantud piiridesse. Biobituumen säilitas toimivusomadusi madalatel temperatuuridel paremini, kui võrreldud naftabituumenid.

Biobituumeni temperatuurivahemik, hinnatuna Fraassi meetodi, pehmenemistäpi määramise ning PG testide tulemuste põhjal, on märkimisväärselt laiem kui tavapärasel naftabituumenitel. See näitab biobituumeni potentsiaali, eriti arvestades viimaste aastate suuri temperatuurikõikumisi Eestis. Naftabituumen ei pruugi sellistele ekstreemsetele tingimustele hästi vastu pidada, kuid biobituumen võib osutada sobivaks alternatiiviks. Tänu oma laiemale temperatuurivahemikule võib biobituumen pakkuda stabiilsemat ja vastupidavamat lahendust teedeehituses, kus temperatuuride amplituud on oluline tegur.

Biobituumeni vastupidavus ajas:

- Säilivuskindluse katsetulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumeni koostisosade sidemed püsisid ladustamistingimustes stabiilsena. Lisaks saab järeldada, et biobituumen muutub eelnevalt segatuna ladustamise käigus märgatavalt jäigemaks.
- RTFOT vanandamist määratud nõelenetratsiooni ja pehmenemistäpi katsetulemustest saab järeldada, et vananenud biobituumenil on väiksem vananemiskindlus (mis võib viidata ka halvemale pragunemiskindlusele). Katsetulemustes ei saa olla täielikult kindel, kuna biobituumeni proovist ei saadud peale proovide kokku segamist kõiki õhumulle täielikult välja.
- PAV vanandamise käigus proovipinnale tekkinud kile tõttu ei ole teada edasist mõju eBBR katsetulemustele.

Biobituumenist asfaltsegu toimivus:

- Biobituumenist asfaltsegu erimassi tulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegu võiks käituda veekeskkonnas sarnaselt naftabituumenist asfaltsegule.
- Biobituumenist asfaltsegu mahumassi tulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegu oli veidi tihedam kui naftabituumenist asfaltsegu. Kõrgem mahumass biobituumenist asfaltsegul viitab paremale tihendatusele, mis võib aidata kaasa paremale vastupidavusele roobaste tekkele, kuna tihedam materjal peab paremini vastu pidada mehaanilisele pingele.
- Jäävpoorsuse tulemuse põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegu võrreldes naftabituumenist asfaltseguga oli paremini tihenenud, mis võis tuleneda biobituumenist asfaltsegu terastikulise koostise erinevusest võrreldes referentseguga. Biobituumenist asfaltsegu jäävpoorsuse tulemus ei täitnud standardis etteantud nõuet. Lisaks jääb üles kahtlus, et biobituumenist asfaltsegu võis olla ka ületihendatud.

Biobituumenist asfaltsegu deformatsioonikindlus ja mehaaniline tugevus:

- Biobituumenile teostatud toimivusomaduste katsete juures viitas kõrgem nõelpenetratsiooni tulemus halvemale asfaltsegu deformatsioonikindlusele. Pehmenemistäpi, DSR ning RTFOT katsetulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegul on parem deformatsioonikindlus, kui naftabituumenist asfaltsegudel.
- Rattaroopa katsetulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegul on parem deformatsioonikindlus, kui võrreldud naftabituumenist asfaltsegul. Lisaks sellele täitis biobituumenist asfaltsegu ära vastavalt standardis esitatud nõuded katsetatud temperatuuridel 50°C, kui ka 60°C.
- Veepüsivuse määramise tulemuste põhjal saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegu täitis ära standardis esitatud nõuded. Lisaks saab katsetulemuste põhjal järeldada, et biobituumenist asfaltsegu on võrreldes naftabituumenist asfaltseguga mehaaniliselt nõrgem, kus katsekehade madalamad tõmbetugevused, viitasid halvemale koormustaluvusele, kuid rattaroopa katse tõestas jällegi vastupidist.

Kokkuvõttes on biobituumenist AC 16 surf segu sarnane naftabituumenist AC 16 surf seguga mitmetes olulistest aspektidest. Hoolimata tulemustes välja toodud erinevustest **saab järeldada, et biobituumenist asfaltsegu on sobiv kasutamiseks Eesti teedehituses.** Täiendavate uuringute ja segukoostise optimeerimisega võib biobituumenist asfaltsegu saavutada naftabituumeniga võrreldava või isegi parema jõudluse, toetades samal ajal keskkonnasõbralikumaid ehituspraktikaid.

Soovitused edasiseks uurimiseks ja arendamiseks:

1. **Vananemiskindlus:** Tuleks leida viise, kuidas suurendada biobituumeni vastupidavust vananemisele, kasutades näiteks lisandeid.
2. **Pragunemiskindluse täiendav testimine:** Vajalik on teha täiendavaid katseid erinevates keskkonnatingimustes, et mõista paremini biobituumeni käitumist äärmuslikes temperatuurides.
3. **Erinevate biobituumenite testimine:** Vajalik on testida erinevaid biobituumeneid, et kaardistada nende omadused ja sobivus erinevatesse teede kategooriatesse ja liikluskoormustesse, tagades nende tõhusa ja pikaajalise kasutamise.
4. **Erinevate asfaltsegude testimine erinevatest biobituumenitest:** Testimine tagaks nende sobivuse ja toimivuse erinevates tingimustes, võimaldades võrrelda traditsiooniliste naftabituumenist segudega. Tänu parematele teadmistele oleks võimalik kaardistada laboratoorses tingimustes, kui ka asfaltsegude tootmises vajalikke tehnoloogiliste uuenduste vajadust.

5. **Biobituumeni ja biobituumenist asfaltsegude omaduste hindamiseks teostatavad katsed:** Soovituslikult oleks parem teostada just PG (bituumeni toimivuse) katseid, et hinnata biobituumeni toimivusomadusi. Lisaks sellele, oleksid vajalikud täiendavad keemilised ja mikrostruktuursed analüüsid, et täielikult mõista biobituumeni käitumist ja omadusi. Täiendavad analüüsid, nagu skaneeriv elektronmikroskoopia või röntgenfotoelektron-spektroskoopia, võiksid anda detailsemat teavet biobituumeni mikrostruktuuri kohta ja selle mõju asfaltsegudes käitumise kohta.

Laboratoorsete katsete parimate tulemuste hindamiseks bituumeni ja asfaltsegude puhul on oluline katsetada mitmeid erinevaid proove, et saada keskmised tulemused, mis võimaldavad täpsemalt hinnata materjalide toimivusomadusi ja käitumist. Antud lõputöös katsetati aga ainult ühte biobituumeni proovi ja ainult ühte asfaltsegu, tulenevalt ajalisest kaalutlusest. Sellest tulenevalt on lõputöö alusel soovitatav edasistes uuringutes kaasata rohkem erinevaid proove. See võimaldaks saada usaldusväärsemaid ja üldistatavamaid tulemusi biobituumeni ja biobituumeniga segatud asfaltsegude kohta, mis on olulised materjalide laiemaks rakendamiseks ja kasutuselevõtuks Eesti teedehituses.

Autorile teadaolevalt on Eestis paigaldatud vaid ligniini sisaldavat asfaltbetooniga katselõike. Lõputöö käigus uuritud sarnaseid biobituumenit sisaldavaid asfaltbetoonist katselõike pole paigaldatud. Tulenevalt sellest võib järeldada, et Eesti on biobituumenist asfaltsegude paigaldamisel ja sellega seotud teadus- ja arendustööde teostamisel olnud pigem passiivne. Samal ajal on mitmed teised riigid, nagu Kanada, Holland ja Saksamaa, teinud selles valdkonnas suuri edusamme, pühendades märkimisväärseid ressursse ja tähelepanu biobituumenite kasutuselevõtule. Eestis oleks vajalik suurendada investeeringuid, et jõuda rahvusvahelisele tasemele ja edendada keskkonnasõbralikke lahendusi teedehituses.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida biobituumeni kasutamise potentsiaali Eesti teedehituses, asendades traditsioonilist naftapõhist bituumenit, et aidata kaasa keskkonnasõbralikumale infrastruktuurile. Lõputöö keskendus peamiselt bioõli põhise biobituumeni omaduste analüüsile, samuti selle käitumisele teedehituslikes tingimustes.

Töö käigus tehti kindlaks, et biobituumen on võimeline asendama tavapäraselt naftabituumenit teedehituses kasutatavas asfaltsegus. Laboratoorsed testitulemused näitasid, et biobituumenist asfaltsegu säilitas häid füüsikalisi omadusi, nagu külmakindlus, deformatsioonikindlus, mis on Eesti kliimas olulised näitajad. Samuti tõi testitud biobituumeni tootjapoolne info esile biobituumeni parema keskkonnajalajälje, võrreldes traditsioonilise naftabituumeniga.

Kuigi biobituumen ise näitas head külmakindlust, ilmnisid teatud piirangud vananemiskindluses, mis viitavad vajadusele täiendavateks uuringuteks selle koostise ja omaduste muutmiseks. Eelkõige tuleks keskenduda biobituumeni vananemiskindluse parandamisele ja pragunemiskindluse põhjalikumale uurimisele.

Järeldustes leiti, et biobituumen pakub konkurentsi naftabituumenile, kuid tõstatati ka mitmeid soovitusi edasiseks uurimistööks. Biobituumeni kasutuselevõtu laiendamine nõuab rohkem süvitsi katseid ja analüüse, et mõista täielikult selle käitumist mitmesugustes teedehituslikes oludes. Lõputöö tulemused on olulised sammud suunas, kus Eesti teedehitus liigub jätkusuutlikumate ja keskkonnasõbralikumate lahenduste poole.

Kokkuvõttes tõi lõputöö välja biobituumeni potentsiaali kui tõhusat alternatiivi traditsioonilisele naftapõhisele bituumenile, pakkudes lahendust jätkusuutlikumaks ressursikasutuseks teede-ehitussektoris.

SUMMARY

The aim of this thesis was to investigate the potential of using bio-bitumen in Estonian road construction, replacing traditional petroleum-based bitumen to contribute to more environmentally friendly infrastructure. The thesis primarily focused on the analysis of the properties of bio-bitumen based on bio-oil, as well as its behavior under road construction conditions.

The study determined that bio-bitumen can replace conventional petroleum bitumen in asphalt mixtures used in road construction. Laboratory test results showed that the asphalt mixture with bio-bitumen maintained good physical properties, such as frost resistance and deformation resistance, which are crucial indicators in the Estonian climate. Additionally, information from the bio-bitumen manufacturer highlighted its better environmental footprint compared to traditional petroleum bitumen.

Although bio-bitumen itself showed good frost resistance, certain limitations in aging resistance were revealed, indicating the need for further research to modify its composition and properties. Specifically, efforts should focus on improving the aging resistance of bio-bitumen and conducting a more thorough investigation of its crack resistance.

Conclusions indicated that bio-bitumen offers competition to petroleum bitumen but also raised several recommendations for further research. Expanding the use of bio-bitumen requires more in-depth tests and analyses to fully understand its behavior under various road construction conditions. The results of the thesis are important steps towards making Estonian road construction more sustainable and environmentally friendly.

In summary, the thesis highlighted the potential of bio-bitumen as an effective alternative to traditional petroleum-based bitumen, offering a solution for more sustainable resource use in the road construction sector.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] K. L. jt, „Uued viisid bituumensideainete kvaliteediomaduste määramiseks ja võimalused nende rakendamiseks, pidades silmas konkreetsele objektile vastavaid kriteeriume sideaine eeldatavast elueast ja kasutuskohast lähtuvalt,“ 2015.
- [2] C. Group, „A Look into the Refining Process,“ CME Group, 2024.
- [3] S. K. R. Penki Ramu, „Next-generation bitumen: a review on challenges and recent developments in bio-bitumen preparation and usage,“ Springer, 2021.
- [4] Z. M. a. X. C. a. M. R. M. H. Hainian Wang, „Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: A comprehensive review,“ 2020.
- [5] E. G. jt, „Analysis of Fatigue and Healing Properties of Conventional Bitumen and Bio-Binder for Road Pavements,“ MDPI, 2019.
- [6] J. Kukebal, „Asfaltsegudes sisalduva bituumensideaine asendamine ligniiniga,“ 2022.
- [7] X. S. jt, „ACS Sustainable Chemistry & Engineering,“ 2017.
- [8] K. B. jt, „High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders,“ ScienceDirect, 2018.
- [9] G. X. jt, „Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin,“ ScienceDirect, 2017.
- [10] J. W. jt, „Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements,“ ScienceDirect, 2021.
- [11] U. Utrecht, „Collaboration in aspHalt APplications with LIgnin in,“ Circular Biobased Delta, 2021.
- [12] U. University, „The world’s first test road with lignin produced in the Netherlands,“ University, Utrecht, 2021.
- [13] FPIInnovation, „Tackling climate change, one road at a time,“ FPIInnovation, 2022.
- [14] F. X. J. W. L. C. S. A. Ningyi Su, „Productions and applications of bio-asphalts – A review,“ ScienceDirect, 2018.
- [15] J. Sun, „Progress report on biobitumen research,“ Sci Tehnol, 2015.
- [16] S. C. jt, „Biomass energy behavior study during pyrolysis process by intraparticle gas sampling,“ Science Direct, 2014.
- [17] J. A. jt, „Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor,“ Science Direct, 2014.
- [18] X. G. jt, „Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk,“ Science Direct, 2011.
- [19] F. A. jt, „Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process,“ Science Direct, 2011.
- [20] M. H. N. H. N.A.A. Raman, „A Review on the Application of Bio-oil as an Additive for Asphalt,“ Universiti Teknologi Malaysia, 2015.
- [21] E. H. Fini, „Chemical characterization of biobinder from swine manure: Sustainable modifier for asphalt binder,“ Scopus, 2011.
- [22] J. Mills-Beale, „Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder,“ Scopus, 2014.
- [23] F. Yang, „Performance of the heavy fraction of pyrolysis oil derived from waste printed circuit boards in modifying asphalt,“ Science Direct, 2013.
- [24] R. J. jt, „Biopitch produced from eucalyptus wood pyrolysis liquids as a renewable binder for carbon electrode manufacture,“ Scopus, 2002.

- [25] Z. Q. X. Yang, „Performance evaluation of asphalt binder modified by bio-oil generated from waste wood resources,” 2013.
- [26] H. Q. Y. S. D. Zhen, „Biofuel preparation with hogwash oil by catalytic,” 2010.
- [27] Y. j. Wan, „Experimental investigation on microwave assisted pyrolysis of algae for rapid bio-oil production,” Scopus, 2010.
- [28] D. Özçimen, „Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials,” Science Direct, 2010.
- [29] W. W. K. Q. Y. Xu, „Vacuum pyrolysis of walnut shell for preparation of biooil,” J. Central South University, 2013.
- [30] R. W. M.A. Raouf, „General physical and chemical properties of biobinders derived from fast pyrolysis bio-oils,” Mid-Continent Transportation Research Forum, 2010.
- [31] M. L. Z. C. Y. Z. J. Z. X. Liao, „Experimental research on the pavement performance of bio-binder mixing asphalt,” 2014.
- [32] FASTTECH, „Pyrolysis and Its Role in Hydrogen Production,” 2024.
- [33] Y. F. J. Y. X. L. Zhengqi Zhang, „A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance,” Science Direct, Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China, 2021.
- [34] M. A. R. M. Metwally, „Development of non-petroleum binders derived from fast pyrolysis bio-oils for use in flexible pavement,” 2010.
- [35] C. Branca, „GC/MS characterization of liquids generated from low-temperature pyrolysis of wood,” Scopus, 2003.
- [36] W. L. jt, „Characteristics of bio-oil from plasma heated fluidized bed pyrolysis of corn stalk,” CABI Databases, 2006.
- [37] A. E. Pütün, „Rice straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis,” Science Direct, 2004.
- [38] X. Miao, „High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*,” Science Direct, 2004.
- [39] A. G. jt, „An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction,” Science Direct, 2016.
- [40] J. G. X. Z. Z. Y. Y. T. H. Wang, „Rheological properties on bio-binder based on DSR and RV,” J. Hunan University, 2015.
- [41] H. Pan, „Aging effects on performance of asphalt binder modified with,” Hunan University, 2016.
- [42] L. N. M. jt, „Laboratory Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Bio-Binder Technologies,” ASCE Library, 2013.
- [43] H. Wang, „Rheological properties of biological modified asphalt,” Journal of China Foreign Highway, 2016.
- [44] H. Z. M. H. X. W. Z. Song, „Study on the properties of asphalt materials and mixtures based on biopyrolysis oil,” 2014.
- [45] S. Cooper, „Laboratory Evaluation of Asphalt Mixtures that Contain Biobinder Technologies,” Sage Journals, 2013.
- [46] A. Y. jt, „Effect of used-tire-derived pyrolytic oil residue on the properties of polymer-modified asphalts,” Science Direct, 2000.
- [47] J. H. J.C. Seidel, „Soy fatty acids as sustainable modifier for asphalt,” 2012.
- [48] Q. Lu, „Study of using waste oil modified asphalt to enhance the low,” 2016.
- [49] R. W. H. S. A. M. J. Peralta, „Combining asphalt T-Rubber (AR) and fast-pyrolysis bio-oil to create a binder for flexible pavements,” 2013.
- [50] F. Ma, „Research progress in road performance of bio-modified asphalt rubber and the mixture,” Scopus, 2015.

- [51] Biofabrik. [Võrgumaterjal]. Available: <https://biofabrik.com/biobitumen/>.
- [52] V. I. Centre, „Rheofalt,” Ventraco Innovation Centre, [Võrgumaterjal]. Available: <https://rheofalt.com/biobit/biobit>.
- [53] B. Group, „Bitumenvrij bindmiddel voor duurzame asfaltmengsels,” Esha.
- [54] Infrasite, „Nieuw soort asfalt zonder fossiele bitumen,” Infrasite, 2022.
- [55] A. / V. Groep, „Material District,” 30 August 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://materialdistrict.com/article/the-first-dutch-fossil-free-road/>.
- [56] A. V. Richard Gosselink, „Wageningen University & Research,” 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mnext.nl/app/uploads/2023/09/230905-Biobased-asphalt-binders-for-road-construction.pdf>.
- [57] Verston, „Roheasfalt,” 2023.
- [58] C. O. R. Abraham A. Abe, „Biomaterials and Their Potentialities as Additives in Bitumen Technology: A Review,” MDPI, 2022.
- [59] b. K. R. Raja Mistry, „Replacing Lime with Rice Husk Ash to Reduce Carbon Footprint of Bituminous Mixtures,” MDPI, 2023.
- [60] D. R. jt, „Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement,” Science Direct, 2014.
- [61] M. Ahmad, „Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review,” Science Direct, 2014.
- [62] J. S. Cha, „Production and utilization of biochar: A review,” Science Direct, 2016.
- [63] A. K. Susanjib Sarkar, „Large-scale biohydrogen production from bio-oil,” Science Direct, 2010.
- [64] S. Masson, „Biogenic Carbon,” 2024.
- [65] P. P. jt, „Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations,” Science Direct, 2013.
- [66] E. H. jt, „Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods,” 2020.
- [67] Silverson, „Laboratory Mixers,” 2024.
- [68] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 1426 Bituumen ja bituumensideained. Nõelpenetratsiooni määramine,” 2015.
- [69] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 1427 Bituumen ja bituumensideained. Pehmenemistäpi määramine. Kuuli-rõnga meetod,” 2015.
- [70] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12593:2015 Bituumen ja bituumensideained Fraass'i murdumistäpi määramine,” 2015.
- [71] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 13399:2017 Bitumen and bituminous binders - Determination of storage stability of modified bitumen,” 2017.
- [72] H. L. H. E. G. G. A.-K. Waleed Zeiada, „Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization,” 2022.
- [73] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12607-1:2014 Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 1: RTFOT method,” 2014.
- [74] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 14769:2023 Bitumen and bituminous binders - Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV),” 2023.
- [75] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 14771:2023 itumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR),” 2023.
- [76] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 14770:2023 Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR),” 2023.

- [77] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN ISO 2592:2017 Petroleum and related products - Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method (ISO 2592:2017),“ 2017.
- [78] Transpordiamet, „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhis (2021),“ 2021.
- [79] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 933-1:2012 äitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod,“ 2012.
- [80] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-35:2016 Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing,“ 2016.
- [81] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-1:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus“.
- [82] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine,“ 2019.
- [83] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator,“ 2018.
- [84] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-30:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga,“ 2018.
- [85] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-5:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine,“ 2018.
- [86] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-6:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine,“ 2020.
- [87] H. Rand, „RINGLUSSVÕETUD ASFALDI SIDEAINE ELAVDAMINE REJUUVENAATORITEGA AC 20 SURF SEGU NÄITEL,“ TalTech, 2023.
- [88] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-8:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine,“ 2018.
- [89] M. Martinson, „Ringluse võetud asfaldi kasutamine uutes asfaltsegudes,“ TalTech, 2023.
- [90] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-12:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine,“ 2018.
- [91] E. S.-. j. A. MTÜ, „Bituminous mixtures - Test method - Part 33: Specimen prepared by roller compactor,“ 2022.
- [92] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS-EN 12697-22:2020+A1:2023 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 22: Rattaroopa katse,“ 2023.
- [93] E. S.-. j. A. MTÜ, „EVS 901-2:2016 Tee-ehitus. Osa 2: Bituumensideained,“ 2016.
- [94] D. W. S. B. John Read, „The Shell Bitumen Handbook,“ Google Books, 2003.

LISAD

Lisa 1. Biobituumenist projekteeritud AC 16 surf seguretsept.

Lisa 2. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf seguretsept.

Lisa 3. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu laboratoorse katsetuse sideaine – ja terakoostise tulemused.

Lisa 4. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu bituumeni toimivusdeklaratsioon.

Lisa 5. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu laboratoorsete katsetuste tulemused.

Lisa 6. Instant Biobitumen tootja poolne keskkonnajalajälje uuring.

Lisa 1. Biobituumenist projekteeritud AC 16 surf seguretsept.

Tootja: Karl-Kristjan Smitt

AC 16 surf 70/100 (biobituumen)

Vastavalt standardile:

Tehas: As Trev 2 Grupp labor

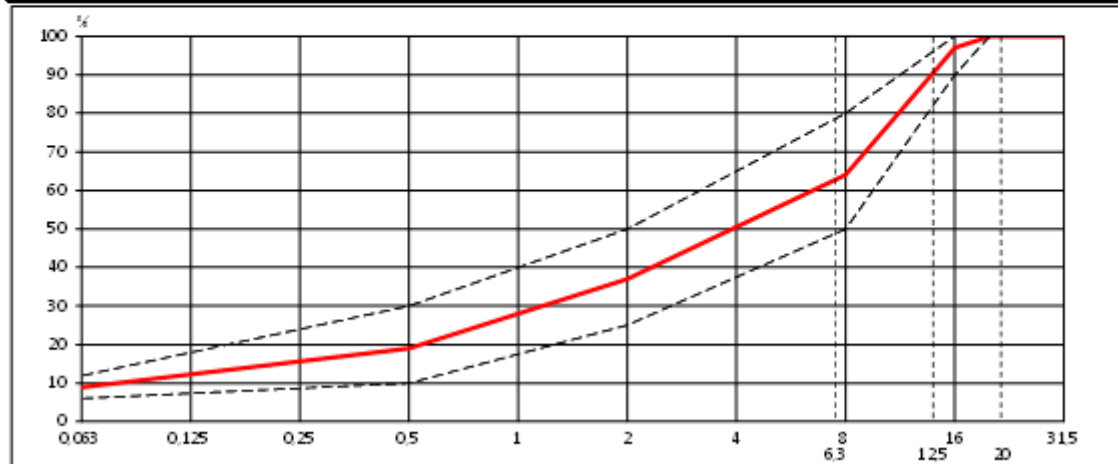
Seguretsept nr:

1

EVS 901-3:2021

Lõputöö raames projekteeritud biobituumenist asfaltsegu

Täitematerjalid												
Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Tertih Mg/m ³	LA	A _N	F _I	C	f	MB _F	F	F _{N,10}	
TAU tardkivi	0/5	TA EE 000005.11.043.003	2,80	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4	
TAU tardkivi	5/8	TA EE 005008.0.043.003	2,78	15	7	25	100/0	4	NPD	NPD	4	
TAU tardkivi	8/11	TA EE 008011.0.043.003	2,78	15	7	25	100/0	4	NPD	NPD	4	
TAU tardkivi	11/16	TA EE 011016.0.043.003	2,78	15	7	25	100/0	4	NPD	NPD	4	
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD	
Kaalutud keskmine osakeste näivihedus p_s			2,786	Korrigeerimistegur α			0,951	Korrigeeritud $B_{(max)}$, %				4,6
Sideaine												
Deklaratsiooni nr	Biobituumen				Nake, rullpudel 24h							
Tootja	Biofabrik/ B2Square				Elastne taastuvus							
Mark	70/100											
Muud tooted	Täitematerjali lisand			Sideaine lisand			Looduslik asfalt					
Deklaratsiooni nr												
Toode												
Osakaal %												
Projekteeritud segu koostis				Segu terastikaline koostis								
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal %		Sõelaava mm		Segu terastikaline koostis						
		Täitematerjal	Segu	Norm	min	0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
TAU tardkivi	0/5	44	41,7	min	6,0	10	25	50	90	100	100	
TAU tardkivi	5/8	13	12,3	max	12,0	30	50	80	100	100	100	
TAU tardkivi	8/11	7	6,6	Normkoostis								
TAU tardkivi	11/16	30	28,4	8,9	19	37	64	97	100	100	100	
Projekteeritud segu omadused				Projekteeritud segu omadused								
				Mahumass, Mg/m ³	Erismass, Mg/m ³	Poisus V ₁₀ , %	Veepisvus r73R, %	Def. kindlus w75 ₁₀₀ , mm	Def. kindlus PRD ₁₀₀ , %	Kulumis kindlus ALX ₁₀ , ml	Sideaine väljapõngumine D ₁ , %	Kaudne tõmbetugevus r75, kPa
0	0	0	0,0									
0	0	0	0,0									
Rakke	filler	6	5,7									
Doseeritav sideaine sisaldus		5,2										
Lahustuv sideaine sisaldus		5,0		2,462	2,546	1,6	106	0,08	7,7	31	NR	NR
SUMMA		100	100,0	Nõue		1,5-4,5	≥ 90	NR	7	32	NR	NR



Koostanud: Karl-Kristjan Smitt

Lisa 2. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf seguretsept

Tootja Verston Ehitus OÜ
Tehas Benninghoven MBA-160

Kooskõlastanud
omanikujärelevalve

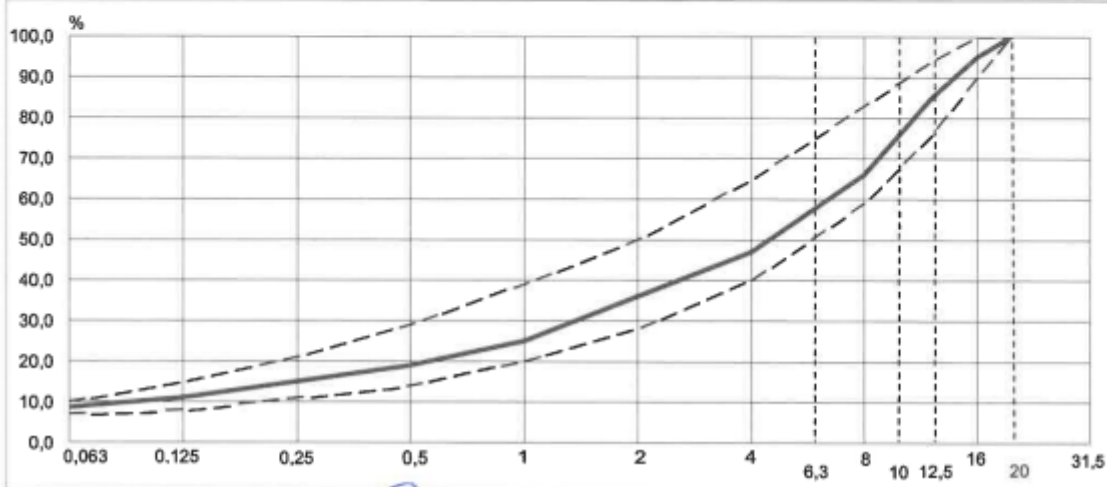
AC 16 surf 70/100

(nimi, allkiri, kuupäev)

Segu paigaldamise koht
Seguretsept Verston

T-2, Võõbu-Mäo
nr.: 21-22(161ORL)

Täitematerjalid													
Nr	fr	Tüüp	Tootja, dekl / karjäär	Ter tih Mg/m ³	Lamin	A _{Nmin}	f	MB _F	C	F _{min}	F	F _{NaCl}	
1	0/5	tardkivi	Norsk- Stein/Tau	2,79	NR	NR	10	NR	NR	NR	NR	1	
2	4/10	tardkivi	Verston Ehitus/ TAU	2,77	15	7	2	NR	100/0	10	NR	1	
3	6/12	tardkivi	Verston Ehitus/ TAU	2,77	15	7	2	NR	100/0	10	NR	1	
4	10/20	tardkivi	Verston Ehitus/ TAU	2,77	15	7	2	NR	100/0	10	NR	1	
5													
6	filler	filler	Nordkalk/Rakke	2,73	NR	NR	NR	10	NR	NR	NR	NR	
Lisandid	Mark	Tootja		%	Projekteeritud segu koostis.								
					Materjal		Materjali osakaal %			Materjali vajadus kg/t			
Sideaine					Nr	fr	Täitematerjal	Segu					
		Tootja	Orlen Lietuva		1	0/5	47	44,6	445,6				
		Mark	70/100		2	4/10	14	13,3	132,7				
		Nake	≥ 50		3	6/12	8	7,6	75,8				
					4	10/20	27	25,6	256,0				
Sideaine lisandid					5	0	0	0,0	0,0				
		Mark	Tootja		6	filler	4	3,8	37,9				
		Wetfix BE	Nouryon		0	B doseeritav		5,2	52,0				
					B katseline		5,1	51,0					
Terastikuline koostis					SUMMA		100	100,0					
Nr	Materjal	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	12,5	16	20	31,5
1	0/5	6,3	10	16	26	40	62	84	100	100			
2	4/10	1,2	1	1	1	2	2	2	87	100			
3	6/12	0,9	1	1	1	1	1	1	11	98	100		
4	10/20	1,5	2	2	2	2	2	2	3	39	90	100	
5	0												
6	filler	83,0	94	100									
Norm	min	7,0	8	11	14	20	28	40	59	76	90	100	
	max	10,0	15	21	29	39	50	65	83	94	100	100	
Normkoostis		8,6	11	15	19	25	36	47	66	85	95	100	
Projekteeritud segu omadused													
Mahu-mass	Eri-mass	VMA %	V %	VFB %	V10G % *	WTS mm* _{max}	PRD % * _{max}	D %	ITSR % *	Abr _A ml * _{max}			
2,501	2,547	14,30	1,8	87,6	NR	0,08	6,3	NR	95	22			
Nõue		NR	1,5-4,5	NR	NR	NR	7	NR	≥ 90	AbrA32			



Koostis: G. Tolma

Lisa 3. Riigimaantee T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu laboratoorse katsetuse sideaine – ja terakoostise tulemused

V7.2-(P1-700)_Asfaltsegu sideaine ja terakoostis



TREV2

Ver. 01.01.2019

lk 1/1

KATSEPROTOKOLL NR 2019/1387

Kuupäev: **30.08.19**

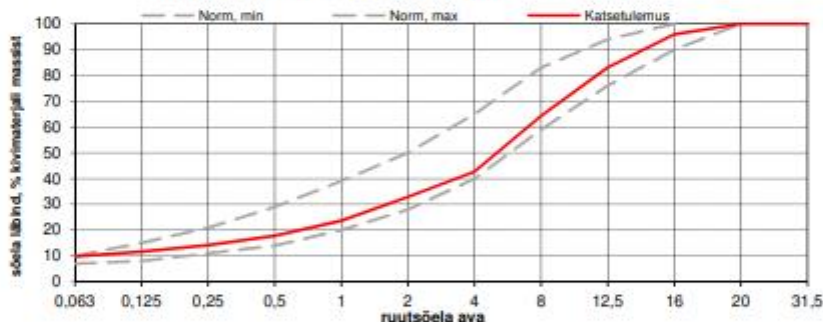
Tellija: **Mart Arusoo**
VERSTON EHITUS OÜ

Katselabor: **TREV-2 GRUPP AS**
Tallinn, Pärnu mnt 463

Objekt:	-		
Võtmise koht:	TREV-2 Grupp AS labor, Pärnu mnt 463		
Võtja firma:	TREV-2 GRUPP AS	Tooja firma:	VERSTON EHITUS OÜ
Võtja nimi:	M. EVART	Tooja nimi:	-
Kuupäev:	15.08.19	Kell:	-
Materjali nimetus ja tähistus:	AC 16 surf 70/100 (tardkivi) laborisegu	Proovi reg nr:	01/305
Märkused:	Asfaltsegu segati Tellija poolt laborisse toodud lähtematerjalidest Infratest seguriga (mehaaniline) vastavat EVS-EN 12697-35 (ei kuulu labori akrediteerimisulatusse)		

KATSETULEMUSED

Terastikulise koostise määramine (EVS-EN 12697-2)



Sõela ava, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	12,5	16	20	31,5
sõela läbivad, % kivimaterjali massist												
Norm, min	7,0	8	11	14	20	28	40	59	76	90	100	
Norm, max	10,0	15	21	29	39	50	65	83	94	100		
<i>Segu väija piirid (min ja max) on võetud standardist EVS 901-3:2009</i>												
Katsetulemus	9,8	12	14	18	24	33	43	64	83	96	100	100

Lahustuva sideaine sisaldus (EVS-EN 12697-1)

S = **5,0** %

Märkus: Massierinevuste meetod (tsentrifuug seadmel)

Katsetamise kuupäev: 15.08.19

Protokolli allkirjastaja:
(allkirjastatud digitaalselt)

Silver Siht
Tootearendusjuht

Tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta. Katseprotokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba

AS TREV-2 Grupp
Registrikoode 10047362
KMKK EE100280335

Pärnu mnt 463, 10916 Tallinn
www.trev2.ee
trev2@trev2.ee

Telefon +372 677 6500
Faks +372 677 6501

Lisa 4. T-2 Vööbu – Mäo AC 16 Surf segu bituumeni toimivusdeklaratsioon

TÖLGE INGLISE KEELEST

[logo: CE]
1567

[logo: ORLEN Lietuva]

TOIMIVUSDEKLARATSIOON nr 03-70/100-CPR-2018

Toote kirjeldus:

- **Nimi, tüüp:** sillutusklassi bituumen 70/100
- **Standard:** LST EN 12591:2009

Mõeldud kasutamiseks: teede, lennuväljade ja muude asfalteeritud alade ehitamisel ja hooldamisel

Tootja: Aktsiaselts ORLEN Lietuva, Juodelkiai küll., LT-89467 Mažeikiai raj., Leedu
Tootmiskoht: Aktsiaselts ORLEN Lietuva, Juodelkiai küll., LT-89467 Mažeikiai raj., Leedu

Toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise süsteem: +2

Teave teavitatud asutuse kohta: Teavitatud sertifitseerimisasutus nr 1567 - Riigiettevõtte *Problematika*, Galves tn 2, LT-02241 Vilnius, Leedu - teostas tehase ja tehase tootmise kontrolli esmase ülevaatusena ning teostab tehase tootmise kontrolli pidevat järelevalvet, hindamist ja heakskiitmist ning 4. oktoobril 2010.a. väljastas tehase tootmise kontrolli sertifikaadi nr 1567-CPD-0064.

Deklareeritud toimivus

Oiulised omadused	Toimivus	Ühtlustatud standard
Penetratsioon temperatuuril 25 °C	70 - 100 x 0,1 mm	LST EN 12591:2009
Pehmenemispunkt	43-51 °C	
Leekpunkt	≥ 230 °C	
Lahustuvus	≥ 99,0 %	
Penetratsiooni indeks	NR (nõue puudub)	
Kinemaatiline viskoossus 135 °C juures	≥ 230 mm ² /s	
Dünaamiline viskoossus 60 °C juures	≥ 90 Pa*s	
Fraas habras punkt	≤ miinus 10 °C	
Kõvastumiskindlus 163 °C juures:		
säilinud penetratsioon 25 °C juures	≥ 46 %	
pehmenemistemperatuuri tõus	≤ 9 °C	
massimuutus	≤ 0,8 %	

Viited: Siin viidatud toote toimivus on kooskõlas kõigi siin deklareeritud toimivuse omadustega. Käesolev toimivusdeklaratsioon esitatakse vastavalt määrusele (EL) nr 305/2011. Vastutus sellele sisule eest lasub ainult selles viidatud tootjal.

Allkirjastatud tootja nimi

Tehnoloogia direktor

(allkirjastaja ametinimetus)

[allkiri]

Linās Čiapas

(nimi, perekonnanimi)

Juodelkiai küll., LT-89467 Mažeikiai raj., Leedu 25.10.2018

Lisa 5. T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu laboratoorsete katsetuste tulemused

V7.3-(P1-700)_Asfaltsegud



TREV2

Ver. 10.06.2019

lk 1/2

KATSEPROTOKOLL NR 2019/1388

Kuupäev: 30.08.19

Tellijä: **Mart Arusoo**
VERSTON EHTUS OÜ

Katselabor: **TREV-2 GRUPP AS**
Tallinn, Pärnu mnt 463

Objekt:	-		
Võtmise koht:	TREV-2 Grupp AS labor, Pärnu mnt 463		
Võtja firma:	TREV-2 GRUPP AS	Tooja firma:	VERSTON EHTUS OÜ
Võtja nimi:	M. EVART	Tooja nimi:	-
Kuupäev:	15.08.19	Kell:	-
Kuupäev:	15.08.19	Kell:	-
Materjal nimetus ja tähistus:	AC 16 surf (tardkivi) laborisegu	Proovi reg nr:	01/305

Märkused: Asfaltsegu segati Tellija poolt laborisse toodud lähtematerjalidest Infratest seguriga (mehaaniline) vastavat EVS-EN 12697-35 (ei kuulu labori akrediteerimisulatusse)

KATSETULEMUSED

Asfaltproovikehade mahumassi määramine (EVS-EN 12697-6)

katse protseduur: Protseduur B mahumass (p_{bsd}) 2,501 Mg/m³

Näiva erimassi määramine (EVS-EN 12697-5)

katse protseduur: Protseduur A (mahuline) , kasutati vett näiv erimass (p_{mw}) 2,547 Mg/m³
vee temperatuur: 20,0 °C

Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine (EVS-EN 12697-8)

Jäävpoorsus (Vm)	1,8	%
Skeletipoorsus (VMA)	14,3	%
Bituumeniga täidetud poorid (VFB)	87,6	%

Lahustuva sideaine sisaldus (EVS-EN 12697-1)

Lahustuva sideaine sisaldus (S) 5,0 %

Proovikehade valmistamine lööktihendamisega (EVS-EN 12697-30)

lööklite arv: 2x50 löökil proovikehad valmistatud: asfaltsegu
tihendamistemperatuur: 145±5 °C seadme tüüp: puitaluseluga lööktihendaja

Rattaroopa katse (EVS-EN 12697-22)

Proovikehade valmistamine rulltihendajaga (EVS-EN 12697-33)

Proovikehade valmistamise meetod: EVS-EN 12697-33 (kontrollitud tihendusenergia meetod)

Valmistamise kuupäev	16.08.19	Säilitamine	< 25	°C
Mass (M)	12486	Nominaalpaksus	60	mm
Tihendamise temperatuur	145±5	Tihendusvormi suurus	320x260	mm
Tihendamise katseseadme tüüp	sile terasrull	Segu segamise tüüp	Laborisegu	

Tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta. Katseprotokollil osaliseks kopeerimiseks tuleb teatleda labori kirjalik luba

AS TREV-2 Grupp
Registrikoode 10047362
KMKR EE100280335

Pärnu mnt 463, 10916 Tallinn
www.trev2.ee
trev2@trev2.ee

Telefon +372 677 6500
Faks +372 677 6501

Lisa 5. T-2 Võõbu – Mäo AC 16 Surf segu laboratoorsete katsetuste tulemused

V7.3-(P1-700)_Asfaltsegud



TREV2

Ver. 10.06.2019

lk 2 / 2

Tihenduspea ja vormide eelsoojendus temperatuur °C

Rattarooma katse protseduur: Protseduur B (õhus, väike seade)

Katsetamise kuupäev

Katsetamise temp. °C

Proovikeha nr	1	2	
Vanus katsetamisel	5		päeva
Mahumass (EVS-EN 12697-6 protseduur D) ($\rho_{b,kin}$)	2,486	2,486	Mg/m ³
Paksus	60,1	60,2	mm
Maksimaalne jäljesügavuse juurdekasv 10^3 koormustsõtki kohta (WTS_{AN})	0,08	0,08	mm
Maksimaalne jäljesügavuse juurdekasv 10^3 koormustsõtki kohta, keskmine (WTS_{AN})	0,08		mm
Maksimaalne suhteline jäljesügavus (PRD_{AN})	6,7	6,0	%
Maksimaalne suhteline jäljesügavus, keskmine (PRD_{AN})	6,3		%
Maksimaalne jäljesügavus (RD_{AN})	4,0	3,6	mm
Maksimaalne jäljesügavus, keskmine (RD_{AN})	3,8		mm

Veepüsilvuse määramine (EVS-EN 12697-12 meetod A) (Katse ei kuulu labori akrediteerimisulatusse)							
Grupp	Nr	Kõrgus (mm)	Diameeter (mm)	Mahumass Mg/m ³	Purunemise tõiip	Kesk. kaadne tõmbetugevus	ITSR, %
Kuiv	7	62,9	101,6	2,499	C	2511 kPa	95
	10	62,8	101,5	2,492	C		
	11	63,1	101,7	2,500	C		
	12	62,7	101,7	2,504	C		
Märg	5	62,3	101,7	2,503	C	2395 kPa	
	6	63,3	101,5	2,504	C		
	8	62,5	101,7	2,502	C		
	9	62,6	101,6	2,503	C		

Katse temperatuur 15 °C Proovikehade vanus 8 päeva

Proovikehade valmistamine: asfaltsegu EVS-EN 12697-30 2x50 lööki

Vastupanu naastrehtide toimele (EVS-EN 12697-16)					
Katse teostati airtöövõrja Teede Tehnokeskus AS laboratooriumis (labori protokoll 3365/19 29.08.19)					
Teede Tehnokeskus AS labor on EAK poolt akrediteeritud labor (L036).					
mahumass ($\rho_{b,ssd}$)	2,498	2,503	2,505	2,504	Mg/m ³
mahumass ($\rho_{b,ssd}$), keskmine	2,503				Mg/m ³
Vastupanu naastrehtide toimele ($A_{0,ss}$)	22,0	22,0	23,3	22,5	ml
Vastupanu naastrehtide toimele ($A_{0,ss}$), keskmine	22				ml

Protokolli allkirjastaja:
(allkirjastatud digitaalselt)

Silver Siht
Tootearendusjuht

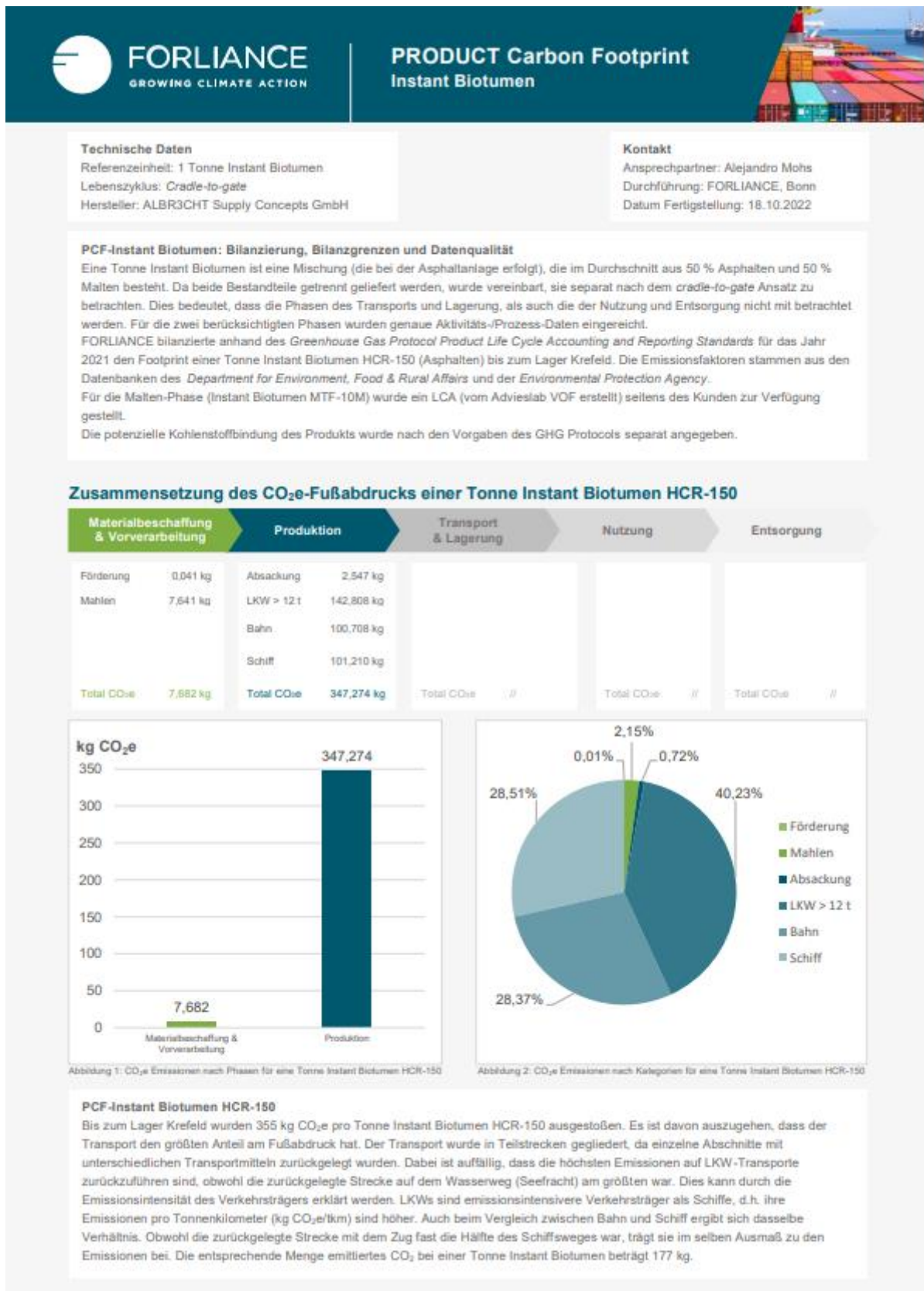
Tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta. Katseprotokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba

AS TREV-2 Grupp
Registrikood 10047362
KMKR EE100280335

Pärnu mnt 463, 10916 Tallinn
www.trev2.ee
trev2@trev2.ee

Telefon +372 677 6500
Faks +372 677 6501

Lisa 6. Instant Biotumen tootja poolne keskkonnajalajälje uuring



Lisa 6. Instant Biotumen tootja poolne keskkonnajäljälje uuring

