



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

INNO
FOND

TAL TECH

II ETAPI ARUANNE

Eesti tingimustesse optimaalse ligniini sisaldusega asfaldi
retsepti rakendusuuring

10.01.2025

Tellija – Riigikantselei

Aruande koostajad

- Karli Kontson
- Kristjan Lill

SISUKORD

Sissejuhatus	3
I Ligniini mõju bituumeni reoloogiale, vananemisele ja kloriididele vastupidavusele	4
Ligniini mõju bituumeni reoloogiale	4
Katsetulemused	6
Ligniini mõju bituumeni vananemisele	10
Ligniini mõju bituumeni vastupidavusele kloriidide keskkonnas.....	11
II Katsetootmine asfalditehases	17
Ligniini doseerimisvõimalused asfalditehases	17
Katsetootmisest saadud asfaltsegude katsete tulemused	19
III Uuendatud retseptid ja nende süsinikjalajälg.....	22
Kokkuvõte.....	23
Kasutatud kirjandus	24

SISSEJUHATUS

Ühe tonni asfaltsegu tootmine emiteerib keskkonda ca 50 kg CO₂-ekvivalendi võrra kasvuhuonegaase [1]. Üks suurimaid tegureid, mis asfaltsegude keskkonnajalajälje suurusesse panustab, on nafta rafineerimise tulemusena saadav bituumen, mida kasutatakse asfaltsegu täitematerjale koos hoidva sideainena. Ameerika Ühendriikides tegutsevaid asfalditootjaid ja teedehitusettevõtteid ühendav erialaliit NAPA (National Asphalt Pavement Association) on välja toonud, et bituumen võib moodustada üle 90% lähtematerjalide emissioonidest ja üle 50% asfaltsegude emissioonidest tehase väravas. Bituumeni enda keskkonnajalajälje kujunemisel mängib suurt rolli nafta pumpamisega ja rafineerimisega kaasnev suur keskkonnamõju. Et bituumeni ja seeläbi ka asfaltsegude keskkonnajalajälge tevikuna vähendada, pööratakse maailmas aina enam tähelepanu biogeenset päritolu alternatiivsete sideainete uuringutele ja kasutusele võtmisele. [2]

Käesoleva aruanne on jagatud kolmeks peatükiks. Esimeses peatükis käsitletakse ligniini mõju bituumeni reoloogiale ja vananemisele ning täiendavalt antakse hinnang ligniini mõjust bituumeni vastupidavusele talvisel libedusetõrjel kasutatava soola keskkonnas (naatriumkloriidile). Teises peatükis kirjeldatakse ligniini sisaldava asfaltsegu tootmise protsessi asfalditehases ning erinevaid võimalusi ligniini doseerimiseks. Samas peatükis käsitletakse ka käesoleva uuringu I etapis väljatöötatud asfaltsegude segamist asfalditehases. Kolmandas peatükis esitatakse teises peatükis esitatud edasiarendatud asfaltsegude retseptid ja CO₂-jalajäljed.

Tegemist on Riigikantselei avaliku sektori innovatsioonifondi projektiga ja seda rahastatakse Euroopa Liidu ühtekuuluvuspoliitika 2021-2027 perioodi vahenditest. Projekti algataja ja koostööpartner on Viimsi Vallavalitsus.

I LIGNIINI MÕJU BITUUMENI REOLOGIALE, VANANEMISELE JA KOLORIIDIDELE VASTUPIDAVUSELE

Käesolevas peatükis analüüsitakse ligniini mõju bituumeni reoloogiale, vananemisele ja kloriididele vastupidavusele.

LIGNIINI MÕJU BITUUMENI REOLOGIALE

Kaks enamlevinud katseseadet, millega mõõdetakse viskoelastsete materjalide, näiteks bituumeni, reoloogilisi omadusi on painduva tala reomeeter (ing. *Bending Beam Rheometer*), lühendiga BBR ning dünaamiline nihke reomeeter (ing. *Dynamic Shear Rheometer*), lühendiga DSR. BBR seadet kasutatakse bituumeni reoloogiliste omaduste määramiseks madalatel temperatuuridel ning DSR seadet reoloogiliste omaduste määramiseks keskmistel ja kõrgetel temperatuuridel. Uuringus kasutatud BBR ja DSR on nähtavad vastavalt Joonisel 1 ja Joonisel 2. Osadel juhtudel olid sideaineid enne katse sooritamist ka laboratoorselt vanandatud. Käesolevas uuringus kasutati pikajalist vanandamist PAV (ing. *Pressure Ageing Vessel*) seadmega, mis on näidatud Joonisel 3.



Joonis 1. BBR seade



Joonis 2. DSR seade



Joonis 3. PAV seade

BBR seadmega sooritatud katse (BBR katse) puhul rakendatakse bituumensideainest valmistatud lihttalale kolme punkti painde geometrias konstantse suurusega koormus.

Katse käigus mõõdetakse nelja minuti jooksul koormusest tingitud läbipaine. Seejuures sooritatakse katse erinevate temperatuuride juures, et leida järgnevad kaks temperatuuri:

- Temperatuur, kus sideainest tala jäikus võrdub 300 MPa.
- Temperatuur, kus sideainest tala roomekiiruse tõus (m-väärtus) võrdub 0.300.

Kui tavapäraselt sooritatakse kõnealune katse ainult pärast 1 tundi madalal temperatuuril konditsioneerimist, siis käesolevas uuringus sooritati sama katse ka pärast 72 tundi konditsioneerimist. Sellisel juhul nimetatakse seda meetodit pikendatud BBR katseks. Pikendatud katse kaasamise eesmärgiks oli uurida, kas ligniinil võib olla negatiivset või positiivset mõju bituumeni reoloogilistele omadustele pikaajalisel madalatel temperatuuridel hoistamisel. Täpsemad kirjeldused nende katsemeetodite kohta on leitavad Tallinna Tehnikaülikooli uuringu aruandest [3]. BBR ja pikendatud BBR katse sooritati 20 tundi PAV vanandatud bituumenitele või bituumeni ja ligniini segudele.

DSR seadmeid kasutatakse väga paljudes valdkondades, kuid bituumensideainete valdkonnas on seda rakendatud nii kõrgete, kui ka keskmiste temperatuuride katsetamiseks. Bituumensideainete puhul on kaheks peamiseks omaduseks, mida vaaldekdatakse kompleksmoodul (G^*) ja faasinurk (δ). Käesolevas uuringus sooritati varieeruva sagedusega (ing. Frequency Sweep) test temperatuuridel 34 °C ja 58 °C. Vaadeldavad sagedused olid 0,1 Hz, 1 Hz ja 10 Hz. Katsetati vanandamata sideaineid.

KATSETULEMUSED

Madala temperatuuri omadused

Ligniini mõju hindamiseks ligniini ja bituumeni segude reoloogilistele omadustele madalatel temperatuuridel kasutati kolme erineva ligniini sisaldusega segusid – 15, 30 ja 40%. Katsetustesse kaasati ka ligniinita bituumeni proov (referentsbituumen) margiga 160/220. BBR katsete tulemused on leitavad Tabelis 1, Tabelis 2, Tabelis 3 ja Tabelis 4. Tabelites on toodud nii jäikuse kui ka roomekiiruse tõusu piirväärtused. Tulemused on kokkuvõtvalt kirjeldatud Joonisel 4 ja Joonisel 5.

Tabel 1. Referentsbituumeni BBR tulemused

Näitaja	Temperatuur, °C			
	1		72	
Aeg, h	1		72	
Jäikus	-34,6	-30,6	-30,7	-24,1
Roomekiiruse tõus	-30,6		-24,1	

Tabel 2. Asendusmäär 15% BBR tulemused

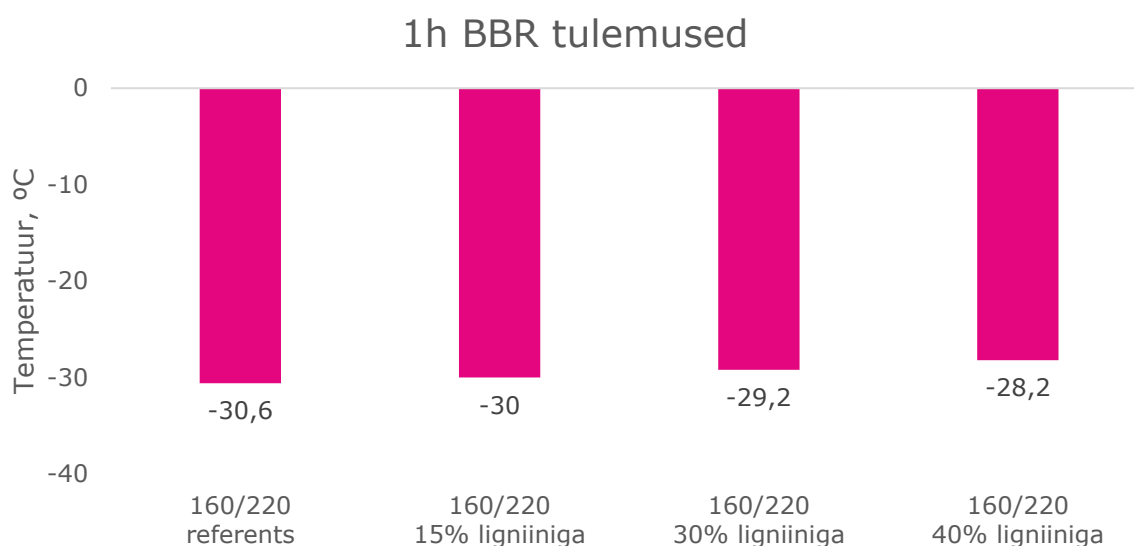
Näitaja	Temperatuur, °C			
Aeg, h	1		72	
Jäikus	-32,8	-30,0	-29,1	-24,4
Roomekiiruse tões	-30,0		-24,4	

Tabel 3. Asendusmäär 30% BBR tulemused

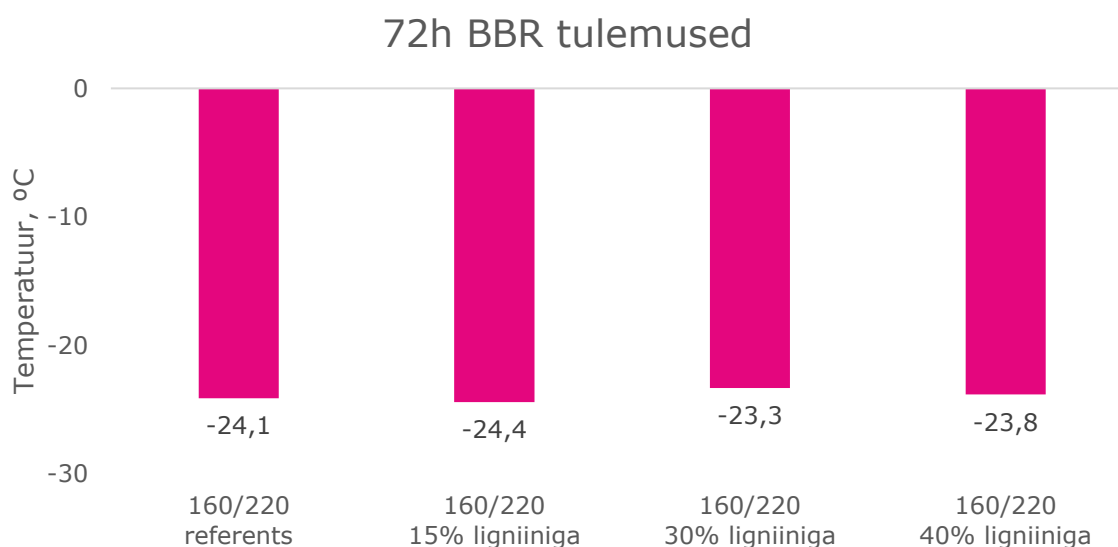
Näitaja	Temperatuur, °C			
Aeg, h	1		72	
Jäikus	-31,3	-29,2	-28,1	-23,3
Roomekiiruse tões	-29,2		-23,3	

Tabel 4. Asendusmäär 40% BBR tulemused

Näitaja	Temperatuur, °C			
Aeg, h	1		72	
Jäikus	-30,5	-28,7	-27,3	-23,8
Roomekiiruse tões	-28,7		-23,8	



Joonis 4. Ühe tunnise konditsioneerimisega proovide BBR tulemused.



Joonis 5. 72 tunnise konditsioneerimisega proovide BBR tulemused.

BBR katsete tulemustest on näha, et ligniini lisamisega kaasneb mõningane bituumeni jäikuse kasv. Kui referentsbituumeni on tulemuseks $-30,6^{\circ}\text{C}$, siis 15, 30 ja 40% asendusmäärade juures on tulemusteks vastavalt $-30,0^{\circ}\text{C}$, $-29,2^{\circ}\text{C}$ ja $-28,7^{\circ}\text{C}$. See teeb muutuseks kuni $1,9^{\circ}\text{C}$. Arvestades, et tegemist on kuni 40% ligniini sisaldusega segudega, siis on selline muutus märkimisväärselt väike. Seda enam, et BBR katse alusel liigitatakse bituumeneid 6-kraadiste intervallidega ja markidena on kasutusel -28°C ja -34°C . Sellest lähtuvalt on näha, et nii referentsbituumeni kui ka kõik kolm osalise asendusega sideainet jäävad vahemikku -28°C kuni -34°C ehk nende margiks on -28°C .

Vaadeldes pikendatud BBR katse ehk 72 tunnise konditsioneerimise läbinud proovikehade katsete tulemusi, siis ka seal ei ole märkimisväärselt erinevusi referentsbituumeni ja osalise asendusega sideainete vahel. Tulemuste absoluutne erinevus on kuni $1,1^{\circ}\text{C}$,

ulatudes -23,3 °C juurest -24,4 °C juurde. Need tulemused jäävad katsetäpsuse piiridesse ehk tulemusi võib lugeda võrdväärseteks.

Kokkuvõtvalt saab BBR katse tulemustest järeldada, et ligniini lisamine omas üllatavalt väikest mõju sideaine jäikusele. Käesoleva uuringu autoritel on varasem kogemus erinevate peeneteraliste mineraalsete fillerite ja täitematerjalide tolmu lisamisega sideainetesse. Sellistes olukordades on sideaine ja filleri/tolmu segud muutunud märkimisväärselt jäigemaks. Eraldi saab välja tuua, et sellistel juhtudel hakkas BBR tulemusi määrama jäikus, mitte roomekiiruse tõus. Ligniini lisamisel seda mõju ei täheldatud, sest madala temperatuuri näitaja on nii referentsbituumenil kui ka osalise asendusega sideainete puhul kontrollitud roomekiiruse tõusu poolt.

Keskmise ja kõrge temperatuuri omadused

Ligniini mõju hindamiseks ligniini ja bituumeni segude reoloogilistele omadustele keskmistel ja kõrgetel temperatuuridel kasutati 0 (referents) ja 20% ligniini sisaldusega proove. Referentsbituumeniks oli sama 160/220 bituumen, mida kasutati ka BBR katsete teostamiseks. DSR seadmega määratud kompleksmoodulite ja faasinurkade tulemused on kirjeldatud Tabelis 5 ja Tabelis 6.

Tabel 5. Referentsbituumeni DSR tulemused - vanandamata

Sagedus, Hz	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °
Temperatuur, °C	34		58	
0,1	635,67	83,43	18,899	90
1	5113,7	83,96	129,93	90
10	42598	80,89	1245,5	90

Tabel 6. Asendusmäär 20% DSR tulemused - vanandamata

Sagedus, Hz	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °
Temperatuur, °C	34		58	
0,1	1556,1	86,81	35,048	77,62
1	13674	84,16	274,97	85,99
10	112240	80,05	2582,4	89,02

Tavapäraselt vaadeldakse bituumensideainetel omadusi 10 Hz juures. Käesoleva uuringu autorid on varasemalt uurinud erinevate fillerite mõju bituumeni vananemisele ning siis kasutati sagedust 1 Hz. Kompleksmoodul on oma olemuselt näitaja, mis kirjeldab mõõdetava materjali jäikust. Seejuures tuleb arvestada, et kompleksmoodul muutub temperatuuri muutudes eksponentsiaalselt. Sellest hoolimata on nii 34 °C kui ka 58 °C juures ligniini sisaldavad sideained jäigemad võrreldes referentsbituumeniga, kuid eksponentsiaalsusest tulenevalt ei saa öelda, et erinevus oleks märkimisväärne.

Faasinurk on näitaja, mis kirjeldab viskoelastse materjali viskoosse ja elastse komponendi suhet. Faasinurk 90 tähendab, et materjal on täielikult viskoosne ning faasinurk 0 tähendab, et materjal on täielikult elastne. Vaadeldes taaskord 10 Hz tulemusi, siis on näha et referentsbituumeni ja 20% asenduse juures on sideained väga sarnaste omadustega, ehk **ligniini lisamise mõju sideaine käitumisele on pigem väike.**

LIGNIINI MÕJU BITUUMENI VANANEMISELE

Ligniini mõju bituumeni vananemisele hinnati PAV ja DSR seadmete abil. Hinnangu andmisel on kasutatud vanandamata sideainete tulemusi Tabelis 5 ja Tabelis 6. Täiendavalt vanandati bituumeneid märkimisväärset PAV seadmest rakendades oksüdeerimist 100 tunni jooksul. DSR tulemused pärast 100 tundi PAV vanandamist on leitavad Tabelis 7 ja Tabelis 8. Vananemist kirjeldavad kokkuvõtvamalt Joonisel 6 ja Joonisel 7.

Tabel 7. Referentsbituumeni DSR tulemused pärast 100 h PAV

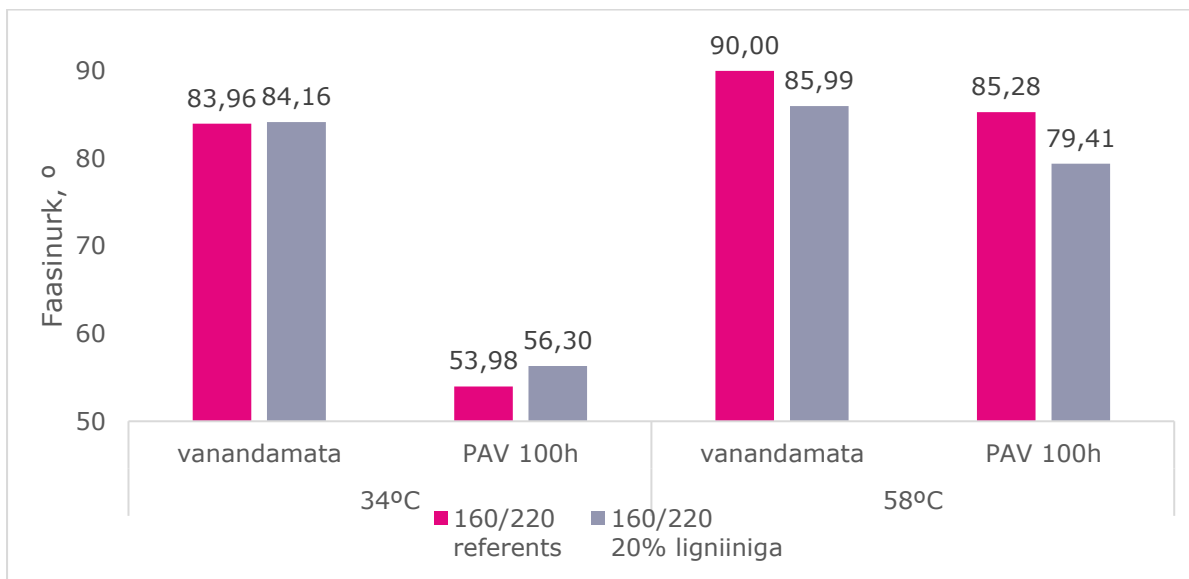
Sagedus, Hz	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °
Temperatuur, °C	34		58	
0,1	74047	62,7	107,64	89,42
1	327460	53,98	981,82	85,28
10	1181700	47,2	8202,4	80,38

Tabel 8. Asendusmäär 20% DSR tulemused pärast 100 h PAV

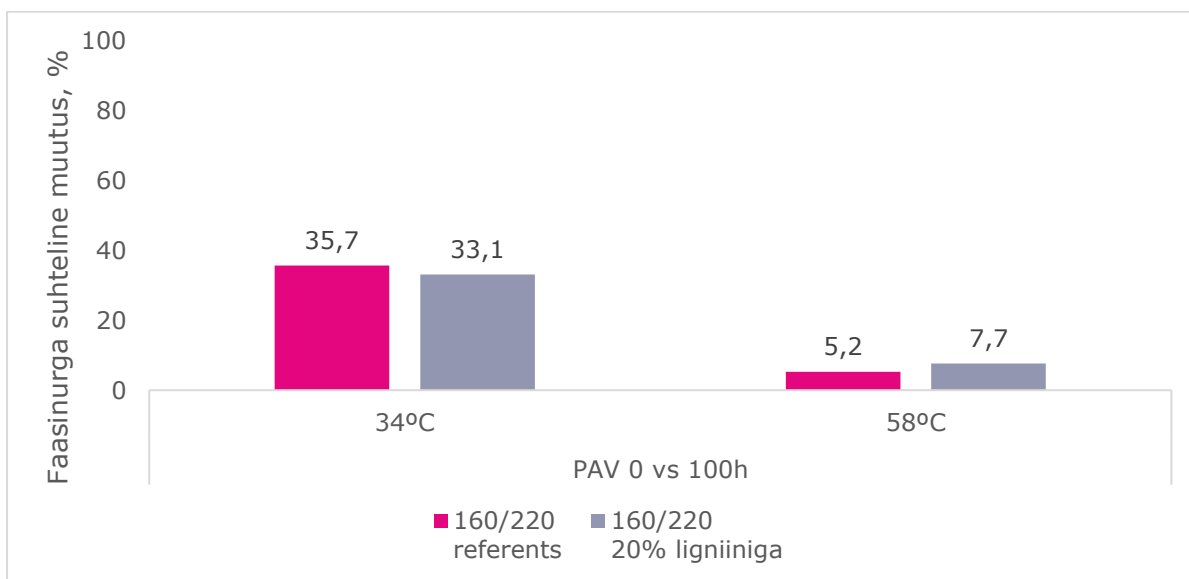
Sagedus, Hz	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °
Temperatuur, °C	34		58	
0,1	108550	65,02	885,66	84,64
1	509640	56,3	7222,2	79,41

Sagedus, Hz	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °	Kompleksmoodul, Pa	Faasinurk, °
10	1929100	48,63	49699	72,06

Vaadeldes tulemusi 34 °C juures, siis sarnaselt vanandamata bituumenile, on vahed pigem väikesed kompleksmooduli puhul ja ja veel väiksemad faasinurga puhul. **Tulemustest järeldub, et ligniinil ei ole bituumeni vananemist kiirendav ega aeglustav mõju.**



Joonis 6. Referentsbituumeni ja 20% ligniiniga bituumeni faasinurga tulemused 34°C ja 58°C juures enne ja pärast 100h PAV vanandamist. Katsetamise sagedus 1 Hz.



Joonis 7. Referentsbituumeni ja 20% ligniiniga bituumeni faasinurga suhteline muutus 34°C ja 58°C juures enne ja pärast 100h PAV vanandamist. Katsetamise sagedus 1 Hz.

LIGNIINI MÕJU BITUUMENI VASTUPIDAVUSELE KLORIIDIDE KESKKONNAS

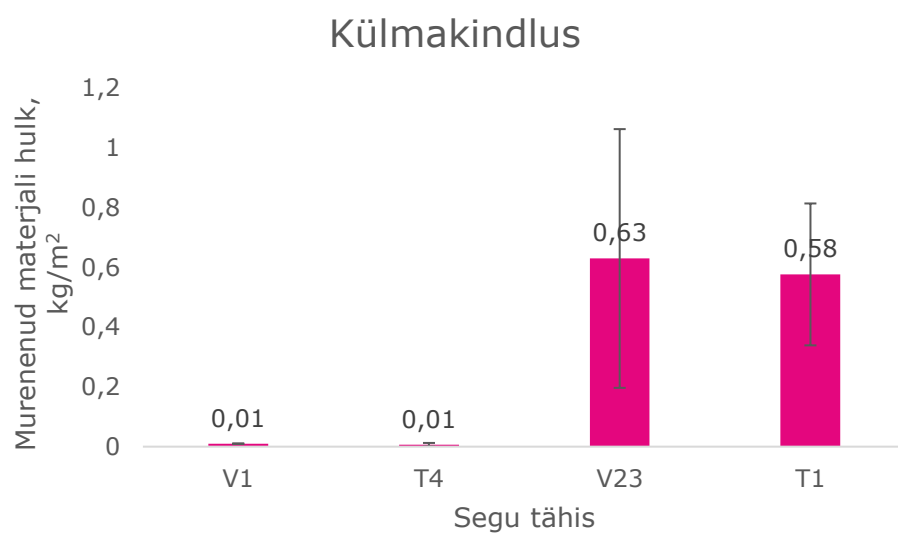
Üldiselt loetakse bituumeneid teede hooldusel kasutatavate teesoolade (kloriidide) vastu inertseteks, st soolases keskkonnas bituumeni omadused ja vastupidavus ei muutu. Soola mõju on suurem täitematerjalide vastupidavusele külmumis- ja sulamistsüklite tingimustes. Soolade mõju väljaselgitamiseks teostati täiendavad katsetused ligniiniga ja ligniinita asfaltsegudele. Katsetustesse kaasati järgnevad segud:

- V1 – AC 16 surf 70/100 referentssegu (laborisegu)
- T4 – AC 16 surf 70/100 28% asendusmäär (tehasesegu)
- V23 – AC 16 base 70/100 referentssegu (laborisegu)
- T1 – AC 16 base 70/100 27% asendusmäär (tehasesegu)

Laboratoorsete katsetuste plaani kaasati kaks erinevat katsemeetodit. Üheks neist oli standardi EVS 814 järgne külmakindlus, mida kasutatakse tegelikult betooni külmakindluse hindamiseks. Katseks vajalikud silindrilised proovikehad valmistati standardi EVS-EN 12697-30 järgi ning proovikehadel saeti üks ots ära, et paljastada täitematerjalid (Joonis 9). Iga kaasatud asfaltsegu kohta valmistati kolm proovikeha. Selle katse puhul hinnatakse pärast külmutus- ja sulatustsükleid proovikeha pinnalt koorunud materjali mass pinnaühiku kohta, kusjuures proovikeha peal oli katse käigus 3% NaCl lahus. Käesolevas uuringus sooritati 14 külmutus- ja sulatustsüklit. Kirjeldatud katse tulemused on esitatud Joonisel 8.

Ootuspäraselt on tulemustest näha, et külmakindluse tulemust dikteerib kasutatud täitematerjal, mitte ligniini kasutamine. AC 16 surf segude koostises on kasutatud tardkivikillustikku ning AC 16 base segude koostises lubjakivikillustikku. Lubjakivikillustikul on märkimisväärselt madalam vastupidavus külmumis- ja sulamistsüklitele, eriti kloriidide (soola) keskkonnas. Tulemustest järeldub, et AC 16 surf segudel, mis koosnevad tardkivikillustikust, oli murenenud materjali hulgaks nii referentskui ka ligniini sisaldaval segul 0,01 kg/m² ehk tulemused olid võrdväärsed. AC 16 base segu puhul registreeriti ligniinita ja ligniiniga segude murenenud materjalide hulgaks vastavalt 0,63 ja 0,58 kg/m² kohta. Kuigi ligniini sisaldava segu tulemus on mõnevõrra parem, kui ligniinita segu tulemus, siis on oluline juhtida tähelepanu tulemuste suurele varieeruvusele (standardhälbele). Sellega arvestades võib öelda, et AC 16 base segude külmakindluste tulemused on võrdväärsed.

Kokkuvõttes saab külmakindluse tulemustest järeldada, et käesoleva projekti jaoks väljatöötatud kahe segu puhul ei oma ligniini kasutamine bituumeni osalise asendajana negatiivset mõju vastupidavusele kloriidide keskkonnas.



Joonis 8. Asfaltsegu külmakindluse tulemused

Katse läbinud proovikehad on esitatud Joonisel 9, Joonisel 10 ja Joonisel 11.



Joonis 9. AC 16 surf segude (V1 & T4) proovikehad pärast katset



Joonis 10. AC 16 base referentssegu (V23) proovikehad pärast katset

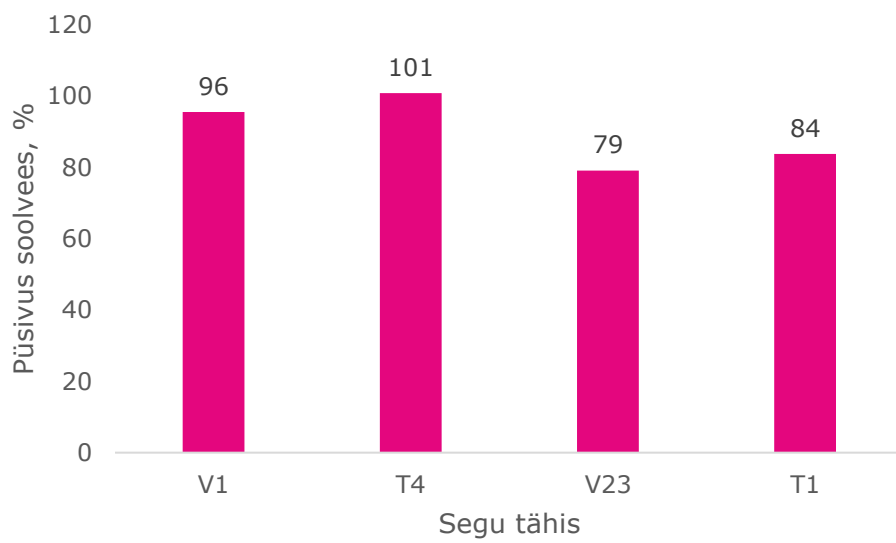


Joonis 11. AC 16 surf ligniiniga (T1) proovikehad pärast katset

Teine sooritatud katsemetoodika töötati välja aruande koostajate poolt. Selle katse jaoks valmistati lööktihendajaga standardi EVS-EN 12697-30 järgi laboratoorsed silindrilised proovikehad. Proovikehadelt saeti ühest otsast umbes 1 cm paksune kiht maha, et paljastada täitematerjal (Joonis 13). Iga kaasatud asfaltsegu kohta tehti proovikehasid 6 tk, millest 3 tk jäeti toatemperatuurile õhu kätte ja ülejäänud 3 tk pandi 3% NaCl lahusesse toatemperatuurile. Selliselt konditsioneeriti proovikehasid 14 ööpäeva.

Pärast konditsioneerimist määrati kõikidele proovikehadele 15 °C juures kaudne tõmbetugevus vastavalt standardile EVS-EN 12697-23. Arvutati soolalahuses asetsenud proovikehade kaudsete tõmbetugevuste suhe kuivas olnud proovikehade kaudsete tõmbetugevustega protsentides. Kuna meetodikal on mõningaid sarnasusi veepüsivuse katsega (EVS-EN 12697-12), siis nimetatakse leitavat näitajat püsivuseks soolvees. Kirjeldatud katse tulemused on leitavad Joonisel 12.

Ka nendest tulemustest on järeldatav, et AC 16 surf segude puhul annab nii referentssegu kui ka ligniini asendusega segu sarnaseid tulemusi, kusjuures ligniini sisaldav segu püsivus soolvee toimele paistab veidi parem. Need järeldused on üle kantavad ka AC 16 base segule. Kokkuvõtvalt saab tulemuste põhjal järeldada, et bituumeni osaline asendamine ligniiniga ei mõjuta asfaltsegu vastupidavust kloriidide keskkonnas ning pigem on määravaks segus kasutatavad täitematerjalid.



Joonis 12. Püsivus soolvees

Katse läbinud proovikehad on esitatud Joonis 13, Joonis 14, Joonis 15 ja Joonis 16.



Joonis 13. AC 16 surf referentsegu (V1) proovikehad pärast katset



Joonis 14. AC 16 surf ligniiniga (T4) proovikehad pärast katset



Joonis 15. AC 16 base referentssegu (V23) proovikehad pärast katset



Joonis 16. AC 16 base ligniiniga (T1) proovikehad pärast katset

II KATSETOOTMINE ASFALDITEHASES

Käesoleva uuringu teise etapi eesmärgiks oli uurida võimalusi ligniini tööstuslikuks doseerimiseks asfalditehases. Enne lõpliku doseerimismeetodi valiku langetamist analüüsiti nelja erinevat võimalust ligniini doseerimiseks, mis on kirjeldatud järgmises peatükis.

Ligniinigasfaltsegude katsetootmine teostati Tariston AS-i Harkus asuvas asfalditehases. Katsetootmise aluseks olnud retseptid koos väljundnormkoostistega on esitatud käesoleva aruande **lisades 1 kuni 4**. Igast katsetootmisega valmistatud segust võeti Teede Tehnokeskuse AS esindaja poolt seguproovid, mis viidi Teede Tehnokeskuse AS laborisse. Laboris kontrolliti tehases valmistatud segude vastavust retseptile ning nõutud omadustele. Kui segude katsete tulemuste põhjal leiti, et katsetootmises valminud segud ebaõnnestusid, korrigeeriti vajadusel retsepti ning korrati segamist. Katsetootmisega valminud asfaltsegude tulemused on kirjeldatud ülejärgmises peatükis.

LIGNIINI DOSEERIMISVÕIMALUSED ASFALDITEHASES

Lõpliku ligniini doseerimismeetodi valiku langetamiseks analüüsiti alljärgnevat erinevat praktikas kasutatud või potentsiaalseid doseerimisvõimalusi:

- **Doseerimine käsitsi (manuaalne) otse asfalditehase segistisse.** Üldiselt on asfalditehastes loodud ligipääs otse segistile, mis võimaldab ligniini doseerimist käsitsi eelnevalt valmis kaalutud ja vajadusel pakendatud kogustena. Seda lähenemist on varasemalt kasutatud näiteks 2022 ja 2023. a Eestis valmistatud ligniiniga asfaltsegude tootmisel. Siiski pole tegemist lahendusega, mis oleks suurtes kogustes (tööstuslikult) ratsionaalne valik. Ligniini käsitsi doseerimine eeldab ühe täiendava isiku pidevat valmisolekut tootmise käigus õigete ajahetkedel ligniini doseerimiseks. Meetod sobib pigem katsetootmise või väiksemas mahus tootmise jaoks.
- **Doseerimine muude asfaltsegude lisandite doseerimisliiniga.** Kaasaegsetel asfalditehastel on erinevat võimalusi, kuidas doseerida asfaltsegude koostises kasutatavaid tahkeid lisandeid. Üheks kõige levinumaks lisandiks on granuleeritud tselluloosikiud, mida kasutatakse näiteks SMA tüüpi asfaltsegudes, et vältida segusse doseeritud bituumeni välja nõrgumist. Eestis on varasem kogemus ligniini doseerimisega läbi granuleeritud lisandite doseerimisliini näiteks 2023 ja 2024. aastatest. Antud lähenemise peamiseks puuduseks on asjaolu, et lisandite dosaatorite kaaludel on üldiselt piiratud maht, mistõttu peab ligniini lisama mitmes osas. Praktikas tähendab see mitme ligniini kaalumise ja doseerimise tsükli

teostamist. See omakorda vähendab märkimisväärselt asfalditehase tootlikkust. Suurte asfaltsegu tootmiskoguste korral oleks vajalik suurendada liini kaalu mahtu.

- **Doseerimine ringlussevõetud asfaldi doseerimisliiniga.** Paljud kaasaegsed asfalditehased on varustatud ringlussevõetud asfaldi (freespuru) taaskasutamiseks doseerimisliiniga, mis võimaldab doseerida freespuru otse segistisse. Tegemist on sisuliselt täisautomaatse doseerimisliiniga. See on üheks võimaluseks ka ligniini doseerimiseks ning seda lähenemist kasutati ka käesoleva uuringu katsetootmise etapis. Selle meetodi puuduseks on asjaolu, et freespuru ja ligniin on terastikuliselt koostiselt erinevad. Kui freespuru teradest ca $\geq 95\%$ moodustavad üle 0,063 mm terad, siis Fibenol Lignova Crude ligniini puhul on olukord vastupidine, st enamus teradest on väiksema diameetriga kui 0,063 mm. Lisaks on freespuru tihedus oluliselt suurem, ehk materjal on raskem. Katsetootmisel ilmnes, et freespuru doseerimisliini kasutamisega kaasnevad selged piirangud ilmastikule, eelkõige sademed ja tuule kiirus. Ka väikese tuulekiiruse korral võivad ilmned kaod, kui doseerimisliin ei ole otsast lõpuni korralikult varjestatud (Joonis 17). Nende riskide maandamiseks tasuks kaaluda ligniini pakendamist väiksemateks kogusteks (nt 5-10 kg). Uuringu autoritele teadaolevalt on Fibenol tarninud Lignova Crude ligniini ka eelnevalt pakendatud väikeste kogustena.
- **Doseerimine asfaldi koostises kasutatava filleri doseerimisliiniga.** Kõik asfalditehased on varustatud vähemalt ühe nn filleri siloga, kus hoiustatakse asfaltsegu koostisesse doseeritavat fillerit. Filler on olemuselt peeneteraline jahvatatud mineraalne täitematerjal, mille terastikuline koostis on sarnane Fibenol Lignova Crude ligniinile. Sellest tulenevalt oleks üheks võimalikuks doseerimisviisiks filleri doseerimisliini kasutamine. Siiski kaasneb selle meetodiga kaks olulist probleemi:
 - Filler on ligniiniga võrreldes märkimisväärselt suurem tihedus (ja on seega raskem materjal), mis võib mõjutada doseerimisliini töökindlust ja täpsust.
 - Tingimustes, kus võivad olla kuumad pinnad ning staatiline elekter või sädemed võib ligniin õhuga segunemisel tekitada tolmu, mis on plahvatusohtlik. Filleri silo kasutamise korral peavad olema täidetud Euroopa Liidu ATEX direktiivides 114 ja 137 ettenähtud nõudeid.

Käesoleva uuringu alguses oli eesmärk leida võimalusi, kuidas saaks ligniini doseerida läbi filleri doseerimisliini. Teadaolevalt ei arvestata täna asfalditehastes, et filleri doseerimisliin oleks vaja projekteerida ATEX nõudeid järgides. Sellest tulenevalt ei saanud käesoleva töö raames katsetootmist filleri doseerimisliiniga ka korraldada. Uurides võimalusi ATEX nõuetele vastava filleri doseerimisliini soetamiseks selgus, et liini hinnanguline maksumus on ca 400 000 €.



Joonis 17. Ligniini doseerimine freespuru doseerimisliiniga otse segistisse. Parempoolsel pildil on näha ligniini kadusid tootmises.

KATSETOOTMISEST SAADUD ASFALTSEGUDE KATSETE TULEMUSED

Katsetootmise aluseks olnud asfaltsegude retseptid on esitatud standardi EVS 901-3:2021 retseptinäidise põhjal ning on lisatud aruandele (lisad 1 kuni 4). Võrreldes teiste asfaltsegudega on AC 16 base segus täiendavalt arvestatud ringlussevõetava asfaldi kasutamisega.

Retseptide alusel koostatud asfaltsegude jäävpoorsuste ja veepüsivuste tulemused on esitatud Tabel 9. SMA 12 segu jäävpoorsuse määramiseks valmistati proovikehad EVS-EN 12697-31 järgi tihendusenergiaga 120 pööret ning veepüsivuse määramiseks tihendusenergiaga 50 pööret. AC surf ja AC base segude jäävpoorsuste määramiseks valmistati proovikehad EVS-EN 12697-30 järgi tihendusenergiaga 2x50 lööki ning veepüsivuse määramiseks tihendusenergiaga 2x35 lööki.

Proovid võeti Teede Tehnokeskus AS esindaja poolt kohe pärast asfaltsegu segamist ja tehasesst väljastamist tehase laadurisse. Proovid võeti vastavalt standardile EVS-EN 12697-27.

Eestis peavad avalikult kasutatavate teede asfaltsegud vastama standardile EVS 901-3:2021. Standardis kehtib nõue, et AC 8 surf tüüpi asfaltsegu poorsus peab jääma vahemikku 1,0 kuni 5,0%. AC 16 surf ja SMA 12 tüüpi segu poorsus peab jääma vahemikku 1,5 kuni 5,0%. Kandevkihi asfaltsegu AC 16 base poorsuse lubatav vahemik

on 4 kuni 10%. **Tabelis 9 viidatud tulemused kinnitavad, et katsetootmises saadud segude poorsused jäävad nõutud vahemikesse.**

Standardis EVS 901-3:2021 on kehtestatud ka minimaalsed veepüsivuse tulemused, mis määratakse vastavalt standardile EVS 12697-12. AC surf ja SMA tüüpi asfaltsegude veepüsivuse miinimumpiiriks on 90% ning AC base tüüpi asfaltsegude miinimumpiiriks on 60%. **Tabelis 9 viidatud tulemused kinnitavad, et katsetootmises saadud segude veepüsivused on tagatud.**

Tabel 9. Katsetootmise käigus valmistatud segude jäävpoorsuste ja veepüsivuste katsete tulemused. Kõik segud vastavad nõuetele.

Segu	Jäävpoorsus	Veepüsivus
SMA 12	2,7% <i>Nõue 1,5-5,0%</i>	94% <i>Nõue ≥ 90%</i>
AC 16 surf	3,0% <i>Nõue 1,5-5,0%</i>	97% <i>Nõue ≥ 90%</i>
AC 8 surf	2,7% <i>Nõue 1,0-5,0%</i>	101% <i>Nõue ≥ 90%</i>
AC 16 base	5,8% <i>Nõue 4,0-10,0%</i>	78% <i>Nõue ≥ 60%</i>

Käesolevas aruandes ei kajastu nende segude tulemused, mis katsetootmisel ebaõnnestusid. Katsetootmisel ilmnas, et temperatuuridel üle 170°C kaasnes risk, et segu poorsus ei vastanud enam projekteeritud poorsusele. Ilmselgelt on üheks ligniiniga asfaltsegude tootmise kitsaskohaks ligniini potentsiaalne termiline lagunemine (söestumine) kõrgetel, üle 170°C temperatuuridel (Joonis 18). Sellest tulenevalt tuleks ligniiniga asfaltsegude tootmisel lähtuda võimalikult madalatest tootmistemperatuuridest.



Joonis 18. Liiga kõrge segamistemperatuuri tulemusena ebaõnnestunud asfaltsegu. Pildil on visuaalselt näha suitsemist, mis on tingitud ligniini söestumisest.

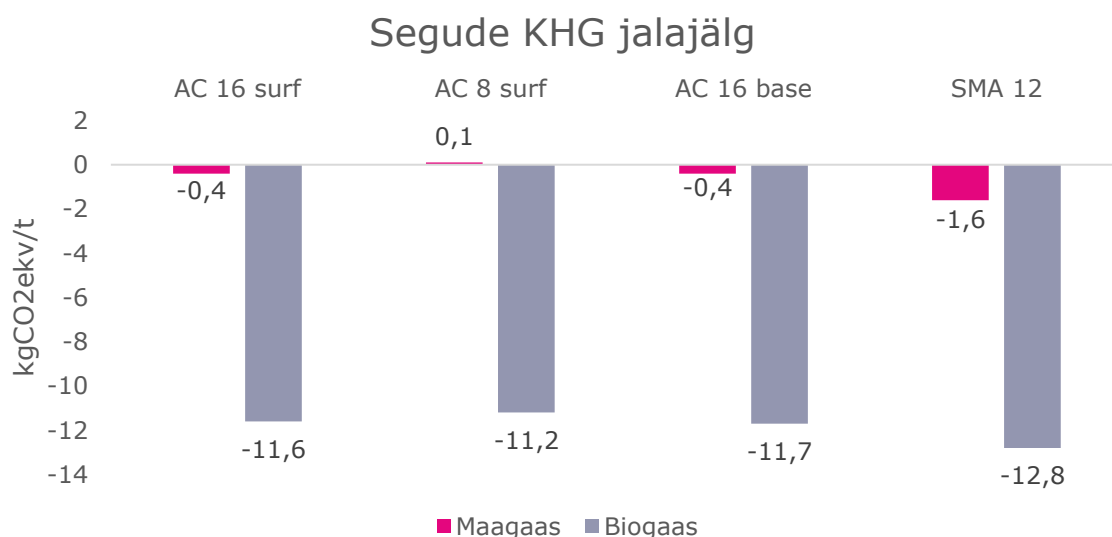
III UUENDATUD RETSEPTID JA NENDE SÜSINIKJALAJÄLG

Arvutused on teostatud neljale erinevat tüüpi asfaltsegule:

- SMA 12
- AC 16 surf
- AC 8 surf
- AC 16 base.

Asfaltsegude retseptid on esitatud standardi EVS 901-3:2021 retseptinäidise põhjal ning on lisatud aruandele (lisad 1 kuni 4). Võrreldes eelnevas etapis esitatud retseptidega vajasid korrigeerimist SMA 12 ja AC 8 surf retseptid. Kõikide segutüüpide tootmisel on arvestatud, et kasutatakse soojade asfaltsegude (WMA) tehnoloogiat. AC 16 base asfaltsegus on täiendavalt arvestatud ringlussevõetava asfaldi kasutamisega.

Retseptide KHG arvutuste tulemused on esitatud Joonisel 19. Arvutuste aluseks on varasemal esitatud CO₂ arvutusmetoodika. Arvutused tehti kahe stsenaariumi korral. Ühel juhul arvestati, et tootmiseks kasutatakse fossiilset päritolu maagaasi ning teisel juhul arvestati, et tootmiseks kasutatakse biometaanit (biogaasi). Maagaasiga tootmisel on retseptidega saavutatud süsinikneutraalsus. Biogaasiga tootmisel oleks vaadeldud asfaltsegude süsinikjalajälg asfalditehase väravas ca -10 kgCO₂ekv ühe toodetud tonni kohta.



Joonis 19. Uuringusse kaasatud retseptide süsinikjalajäljed fossiilset päritolu maagaasiga ning biometaaniga (biogaasiga) tootmisel.

KOKKUVÕTE

Käesolevas aruandes on kirjeldatud uuringu teise etapi katsetootmist, valituks osutunud ligniini doseerimismeetodit ning katsetootmisest saadud asfaltsegude tulemusi. Täiendavalt on käsitletud ligniini lisamise mõju bituumeni reoloogilistele omadustele ning ligniiniga valmistatud asfaltsegude vastupidavust libedusetõrjel kasutatavate kloriidide (naatriumkloriidi) keskkonnas. Üllatuslikult mõjutab ligniini lisamine bituumeni reoloogilisi omadusi võrdlemisi vähe, ehk ligniini-bituumeni segude omadused ei erine märkimisväärselt bituumeni algsetest reoloogilistest omadustest. Samuti ei täheldatud uuringuga, et ligniini kasutamine mõjutaks bituumeni vananemist. Laboratoorsed katsed viitavad, et ligniiniga asfaltsegude vastupidavus soolasele keskkonnale (sh külmumis- ja sulamistsüklitele) on võrdväärne tavalise asfaltseguga.

Katsetootmisest saadud tagasiside põhjal saab öelda, et ligniiniga asfaltsegud on tundlikud kõrgetele tootmistemperatuuridele. Liiga kõrgetel temperatuuridel tootmisel võib tekkida oht, et ligniin söestub. Sellisel juhul kannatavad asfaltsegu omadused, mis omakorda mõjutab ligniiniga segu poorsuse nõuetele vastavust. Hinnanguliselt on kõrgeimaks aktsepteeritavaks tootmistemperatuuriks 170°C, kuid pigem peaks lähtuma madalamatest temperatuuridest (soovitavalt **kuni** 165°C). Täiendava meetmena on soovitatav lisada ligniin koos või pärast bituumeni lisamist asfaltsegu segistisse. See võimaldab vähendada kõrgetest temperatuuridest põhjustatud mõjusid ligniini omadustele.

Kõik uuringus kaalutud ligniini doseerimismeetodite korral, mis erinevates asfalditehastes täna olemas on, peab kaaluma nende meetodite optimeerimist ligniini kasutamiseks sobivamaks. Parim viis ligniini doseerimiseks oleks ligniini granuleerimine või eelnev pakendamine väiksemateks kogustes (5-10 kg).

Uuringu teises etapis välja toodud retseptide alusel katsetootmises valmistatud segude lõppomadused vastava Eestis kehtestatud nõuetele ning sobivad Viimsisse rajatavatel katselõikudel kasutamiseks. Käesolevas aruandes välja toodud tulemused annavad aluse lugeda teise etapi eesmärgid täidetuks ning võimaldavad liikuda edasi projekti järgmisse etappi, mis käsitleb katselõikude rajamist Viimsisse. Katselõikude rajamiseks on koostatud nõuded, mis on osaks hanke tehnilisest kirjeldusest.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] R. Toom, "ÜLEVAADE CO₂ EMISSIOONIDEST ASFALTSEGUDE TOOTMISEL EESTIS NING MEETODID EMISSIOONIDE VÄHENDAMISEKS SOOJA ASFALTSEGU TEHNOLOOGIATEGA," Tallinn University of Technology, Tallinn, 2022.
- [2] J. Shacat, J. R. Willis, and B. Ciavola, "GHG emissions inventory for asphalt mix production in the United States. Current industry practices and opportunities to reduce future emissions," 2022.
- [3] A. Aavik *et al.*, "UUED VIISID BITUUMENSIDEAINETE KVALITEEDIOMADUSTE MÄÄRAMISEKS JA VÕIMALUSED NENDE RAKENDAMISEKS, PIDADES SILMAS KONKREETSELE OBJEKTILE VASTAVAD KRITEERIUME SIDEAINE EELDATAVAST ELUEAST JA KASUTUSKOHAST LÄHTUVALT," Tallinn, 2015.