



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

BITUUMENI ASENDAMINE LIGNIINIGA JA SELLE MÕJU ASFALTSEGUDE TOIMIVUSELE

REPLACEMENT OF BITUMEN WITH LIGNIN AND ITS IMPACT TO THE PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Julia Kutsõn

Üliõpilaskood: 182285EATI

Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant

Kaasjuhendaja: Karli Kontson, doktorant

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2023

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Julia Kutsõn

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Bituumeni asendamine ligniiniga ja selle mõju asfaltsegude toimivusele“, mille juhendaja on Kristjan Lill ja kaasjuhendaja on Karli Kontson,
 - 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 loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Julia Kutsõn, 182285EATI

Õppekava, peeriala: EATI02/17 - Teedehitus ja geodeesia

Juhendaja(d): Kristjan Lill, doktorant, +372 5302 2437

Karli Kontson, doktorant, +372 504 7834

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Bituumeni asendamine ligniiniga ja selle mõju asfaltsegude toimivusele

(inglise keeles) Replacement of bitumen with lignin and its impact to the performance of asphalt mixtures

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida bituumeni asendamise võimalusi asfaltsegudes.
2. Anda ülevaade ligniini, selle tootmisviiside ning kasutuse kohta teedehituses.
3. Hinnata ligniini mõju Eestis kasutatavate asfaltsegude omadustele ning nende vastavust Eestis kehtestatud nõuetele.
4. Määrata katseliselt suurim ligniini sisaldus, mille juures asfaltsegu omadused jäävad Eesti asfaltsegudele kehtestatud nõuete piiridesse.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teaduskirjanduse läbi töötamine	10.11.2022
2.	Teooriaosa kirjutamine	8.12.2022
3.	80% tööst on valmis, kaitsmistootluse esitamine	12.12.2022
4.	Katsetulemuste analüüs	22.12.2022
5.	Töö on valmis ning esitatakse retsenseerimisele	02.01.2023

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 09.01.2023 a

Üliõpilane: Julia Kutsõn

..... ".....".....2023 a
/allkiri/

Juhendaja: Kristjan Lill

..... ".....".....2023 a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Karli Kontson

..... ".....".....2023 a
/allkiri/

Programmijuht: Mihkel Kask

..... ".....".....2023 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	6
1 SISSEJUHATUS.....	7
2 TEOREETILISED ALUSED	9
2.1 Bituumeni asendamiseks kasutatavad materjalid	9
2.2 Ligniin	11
2.2.1 Ligniini kirjeldus.....	11
2.2.2 Ligniini tootmine	11
2.3 Ligniini kasutamine teedehituses.....	13
2.3.1 Toimivus kõrgetel teekatte temperatuuridel.....	13
2.3.2 Toimivus madalatel teekatte temperatuuridel	14
2.3.3 Pikaajaline vastupidavus	15
2.3.4 Katselõigud	15
3 KATSELÕIGU KIRJELDUS JA KATSEMETOODIKA.....	17
3.1 Ettevalmistused katselõigu ehituseks	17
3.2 Katselõigu kirjeldus.....	17
3.3 Katsete kirjeldused	21
4 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS	24
4.1 Katsetootmise asfaltsegude katsete tulemused.....	24
4.1.1 Terastikuline koostis.....	24
4.1.2 Sideaine sisaldus.....	25
4.1.3 Jäävpoorsus	28
4.1.4 Veepüsivus.....	29
4.1.5 Järeldused katsetootmisest	31
4.2 Katselõigu asfaltsegude tulemused	31
4.2.1 Terastikuline koostis.....	31
4.2.2 Sideaine sisaldus.....	32
4.2.3 Jäävpoorsus	34
4.2.4 Veepüsivus.....	36
4.2.5 Marshalli stabiilsus ja voolavus	39
4.2.6 Deformatsioonikindlus	43
4.2.7 Vastupidavus naastrehvide toimele.....	44
4.2.8 Järeldused.....	45
KOKKUVÕTE	47
SUMMARY.....	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	50

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli doktorant Kristjan Lill. Lõputöö eesmärk oli uurida bituumeni asendamiseks kasutatavaid materjale. Lähemalt hinnati ligniini mõju asfaltsegude omadustele ja toimivusele.

Autor soovib tänada Kristjan Lille ja Karli Kontsonit, kes olid käesoleva töö juhendajateks ning aitasid ja suunasid kogu lõputöö kirjutamise vältel.

Samuti soovib autor tänada Tallinna Tehnikaülikooli teedelabori meeskonda, kes teostasid lõputöö raames vajaminevad katsed asfaltsegudele ning olid moraalseks toeks.

Suur tänu ka pereliikmetele, kes innustasid kirjutamise jätkamist.

Võtmesõnad: teedehitus, ligniin, bituumen, asfaltsegud, sideaine asendamine, magistritöö

1 SISSEJUHATUS

Bituumen saadakse toornafta rafineerimisprotsessi käigus ning see on laialdaselt kasutuses asfaltsegude ja katusekatete tootmisel. 2021. aastal toodeti ainuüksi Euroopas hinnanguliselt 288 mln tonni asfaltsegu [1], milles bituumenil on sideainena roll siduda end täitematerjaliga, tagada segu sidusus ning asfaltsegule omased omadused.

Viimastel aastatel on ilmnenu peamiselt kaks asjaolu, mis on teedehitussektorit suunanud otsima naftabituumenile alternatiive. Esiteks on toornafta kättesaadavus ja hind olnud varieeruv. Seda mõjutavad toornafta rafineerimisprotsessi tõhusamaks muutumine ning paljuskil ka praegune geopoliitiline olukord. Need tegurid on põhjustanud bituumeni hinna märkimisväärse kallinemise. Näiteks kasvas Eestis bituumeni hind 2022. a teedehitushooajaks 2,8 korda võrreldes kahe aasta taguse ajaga.

Teiseks pööratakse aina enam tähelepanu asfaltsegude tootmisega kaasnevale keskkonnajalajäljele. Bituumeni osa asfaltsegu CO₂ emissioonist on u 25%, olles suuruselt teine tegur pärast täitematerjalide kuivatamiseks ja kuumutamiseks vajaminevast kütusest [2]. Bituumeni osaline või täielik asendamine jätkusuutlikumate, alternatiivsete sideainetega annab hea võimaluse asfaltsegude keskkonnajalajälje vähendamiseks.

Üheks alternatiivsete sideainete allikaks on biomassist toodetavad materjalid nende madala hinna ja laialdase kättesaadavuse tõttu. Lisaks aitab biopõhiste sideainete kasutamine märkimisväärselt vähendada asfaltsegude süsinikujalajälge, mis omakorda toetaks teedehitussektorit tulevaste CO₂ eesmärkide saavutamisel.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida, kuidas mõjutab Eestis kasvanud puidust toodetud ligniini lisamine asfaltsegusse selle omadusi ning vastavust Eestis kehtivatele nõuetele. Samuti määratakse katseliselt suurim ligniini sisaldus, mille juures asfaltsegu omadused jäävad Eesti asfaltsegudele kehtestatud nõuete piiridesse.

Töö esimeses osas on ülevaade erinevate alternatiivsete sideainete kohta, mida bituumeni asendajana maailmas katsetatud on. Seejärel tutvustatakse lühidalt ligniini olemust ning selle enamlevinud tootmisviise. Samuti tehakse lühikokkuvõtte ligniini mõjust bituumeni reoloogilistele omadustele teaduskirjanduses publitseeritud uuringute põhjal ning tutvustatakse erinevates riikides valminud ligniini sisaldavaid katselõike.

Magistritöö teine osa tutvustab Eesti katselõiku, mis rajati käesoleva lõputöö raames. Lisaks kirjeldatakse katselõigule eelnenud katsetootmist, mille alusel valiti sobivad ligniini sisaldused katselõigu asfaltsegudesse.

Kolmas osa käsitleb katsetootmise käigus toodetud ja katselõigult võetud asfaldiproovide katsete tulemusi, nende vastavust Eestis kehtestatud nõuetele ning tulemuste analüüsi.

2 TEOREETILISED ALUSED

2.1 Bituumeni asendamiseks kasutatavad materjalid

Üha enam on hakatud uurima võimalusi kuidas bituumen osaliselt või täielikult asendada. Katsetatud on nii taastuvatest loodusvaradest (vetikad, taimeõlid, ligniin jne), kui ka taastumatutest maavaradest (plastjätmed, rehvid, lendtuhk jne) saadud materjale. Kasutades naftast rafineeritud bituumeni asemel biojätmeid, on võimalik muuta asfalteerimise protsess keskkonnasõbralikumaks, kuna biojätmete näol on tegu taastuvate materjalidega ning nende kasutamine vähendab oluliselt CO₂ emissioone [3]. Käesolevas peatükis tuuakse välja näiteid teaduskirjanduses käsitletud bituumeni asendajate kohta.

Vetikatest biokütuse tootmist on uuritud juba aastakümneid, kuna võrreldes teiste taimedega on seda võimalik kasvatada väiksel alal suurtes kogustes, mis muudab selle majanduslikult mõnevõrra tulusamaks. Varasemalt on välja töötatud teistest taimeõlidest nn biobituumeneid, kuhu on lisatud looduslikud või modifitseeritud vaigud ning polümeerid, et nende reoloogilised omadused oleksid võimalikult sarnased tavapärasele naftabituumenile. Samuti on võimalik toodetud taimset õli kasutada bituumeni osalise asendajana. Sellisel juhul on välja toodud, et tekkinud biobituumenite toimivus kõrgetel temperatuuridel langeb ning, et nad on pehmemad kui naftabituumenid. Toorainena on taimeõlide tootmiseks kasutatud näiteks õlipalmi, rapsi, maapähkleid, sojaube, aga ka puidumassi ja põllumajandusjätmeid. Vetikaid uurides jõuti järeldusele, et nendest on võimalik toota vees lahustumatust materjalist (õlist) ning lahustumatutest tahketest osakestest koosnev materjal, millel on 260°C juures bituumenile sarnased viskoelastsed omadused. Et teada saada, kas seda materjali ka tegelikult bituumeni asemel kasutada saaks, peab arendustegevust jätkama. [4], [5]

Osaliselt on võimalik asfaltsegusse lisatavat uut naftabituumeni kogust vähendada sellesse lisatava ringlussevõetud asfaldi (RAP) arvelt. Sealjuures on aga märgitud, et lisades rohkem kui 25% RAPi muutub segu jäigemaks, mis on põhjustatud RAPi vananenud sideainest ning vastuvõtlikumaks madalatel temperatuuridel pragunemisele ja väsimuspragunemisele. Saha jt uurisid jääktoiduõli ja sojaõli kasutamise võimalikkust RAPiga asfaltsegudes, eesmärgiga toota segu, mille toimivus väsimusele ja madalatele temperatuuridele paraneb ilma segu deformatsioonikindlust alandamata. Selgus, et kasutades asfaltsegudes sideainet, mis lisaks 25% uuele naftabituumenile koosneb 5% toidujääk- või sojaõlist ja 70% RAPist on võimalik toota segu, mille toimivus sarnaneb tavalise (uue) sideainega segule. [6]

Laialdaselt on uuritud erinevate plastjätmete kasutusvõimalust asfaltsegudes. White hindas kahe MacReburi poolt plastjätmetest toodetud graanulite (MR6 ja MR10) mõju asfaltsegule. Sealjuures tuleb märkida, et selles uuringus kasutatud plastgraanulid ei ole enam saadaval. Tulemustest ilmnes, et plastikjätmete lisamine suurendab segu jäikust kahe- kuni kolmekordselt ning parandab asfaltsegude deformatsioonikindlust. Toodi välja ka asjaolu, et MR6 ja MR10 mõju bituumeni ja asfaltsegu käitumisele oli märkimisväärselt sarnane tavapäraselt kasutatava plastomeerse polümeeri EVA mõjuga. [7] MacReburi poolt toodetud plastgraanuleid on kasutatud ka Eestis. Kasutades MR8 graanuleid ehitati katselõigud Reidi teel, Mäeküla-Suurpalu teel ja Roosna-Allikusse.

Hinnatud on ka rehvidest toodetud GTRi (*ground tire rubber*) ja CRi (*crumb rubber*) mõju asfaltsegude toimivusele. Ühes uuringus segus, et lisades 20% GTRi (läbimõõduga kuni 0,6 mm) SMA segusse ei ole vaja sideaine väljanõrgumise takistamiseks täiendavalt lisada tsellulooskiudu. Samuti ilmnes, et GTRi lisamine ei mõjuta märkimisväärselt veepüsivust ning muudab segu deformatsioonikindlamaks. [8] Teisest uuringust ilmnes, et CRi lisamine asfaltsegusse muudab selle deformatsiooni- ja väsimuskindlamaks. Suurim lisatud kummipuru kogus oli selles uuringus 15% sideainest. [9]

Kuigi varasemalt on edukalt kasutatud lendtuhka betooni valmistamisel, pole selle kasutamist teedeehituses bituumeni asendajana laialdaselt uuritud. Uuringus kasutati kahte erinevat kivisöe põletamise käigus tekkinud lendtuhka. Selgus, et lendtuhka on võimalik 15% ulatuses kasutada bituumeni asendajana. Saadud tulemuste põhjal järeldati, et lendtuhal on deformatsiooni parandavad, ehk jäikust tõstvad omadused. Samas lisati, et paremaks lendtuha mõju bituumeni reoloogiliste omaduste hindamiseks, tuleks uurida bituumeni toimivust madalatel temperatuuridel. [10]

Üheks võimalikuks bituumeni asendajaks on ka ligniin. Ligniiniil on bituumenile jäigastav mõju, muutes sellega segu deformatsioonikindlamaks [11]. Samuti on uuringutest selgunud, et ligniiniil on antioksidandi omadused, st vananemiskindlust tõstev mõju [12]. Käesolevas lõputöös uuritakse lähemalt ligniini ning selle mõju asfaltsegude toimivusele.

2.2 Ligniin

2.2.1 Ligniini kirjeldus

Ligniin on aroomne biopolümeer, mis koos tselluloosi ja hemitselluloosiga moodustavad lignotselluloosi, mis on taimede rakukesta põhikomponendiks. Tselluloosi järel on ligniin teine levinuim biopolümeer. Olenevalt taime liigist on ligniini kogused selle rakukestas erinevad, näiteks on puudes ligniini osakaal 18-35% puidu kuivmassist, kõrrelistes aga 12-21% kuivmassist. [13], [14], [15], [16]

Ligniini peamiseks ülesandeks on töötada rakkude vahel sideainena, mis tagab tüve, okste, varte jne jäikuse ja tugevuse. Samuti aitab ligniin reguleerida vee transporti läbi rakuseinte, kaitseb taime bioloogiliste rünnakute eest ja omab antibakteriaalset toimet mikroorganismide vastu. [13]

Põllumajanduses, tselluloosi-, paberi- ja biokütuse tööstuses tekib kõrvalsaadusena biomassi, mille koostises on ka ligniin. Varasemalt liigitati seda tootmisjäätmena, mida osaliselt tselluloosi- ja paberitööstuses kasutati kütusena, kuid üha enam uuritakse, milliste tootmisprotsesside abil ligniini biomassist eraldada ning mis valdkondades seda kasutada saaks. Huvi ligniini vastu on tõusnud, kuna otsitakse alternatiive fossiilsetele kütustele, mis praegu on paljude toodete (kemikaalid, kütus, plastid) algmaterjaliks, tekitades sellega CO₂ heidet ja negatiivset mõju keskkonnale. Kui asendades osa praegu fossiilsetest kütustest saadud toormaterjali biojäätmega, muutub toode keskkonnasõbralikumaks ning selle CO₂ emissioon väheneb, kuna tegu on taastuvate ressurssidega ning kasvades taimed fotosünteesivad, sellega talletades endasse CO₂-te. [3], [17], [18], [19]

Ligniini tootmist ja kasutuselevõttu raskendab asjaolu, et võrreldes teiste biopolümeeridega on ligniini omadusi ja ülesehitust mõnevõrra raskem hinnata kuna need sõltuvad nii biomassi päritolust kui ka tootmisprotsessist. [20], [21]

2.2.2 Ligniini tootmine

Väävlit sisaldavad ligniinid toodetakse tavaliselt tselluloosi- ja paberitööstuses, kus need on tselluloosi tootmise kõrvalproduktiks ning neid on peamiselt kasutatud energia tootmiseks [3].

Kraft ligniin, mida toodetakse *kraft*- ehk sulfaattehnoloogia abil, on kõige levinum toodetava ligniini tüüp (u 85% kogutoodangust). Peamiselt kasutatakse seda tehnoloogiat leht ja okaspuidust tselluloosi- ja paberi tootmisel, kus eesmärgiks on

puitmassist eemaldada võimalikult palju ligniini, et toodetav tsellulooskiud oleks „puhas“ ning sellest saaks toota kõrgkvaliteetset paberit. Ligniini eemaldamiseks töödeldakse puitmassi leeliselises keskkonnas, mille tulemusel nii ligniin kui hemitselluloos lagunevad ning lahustuvad. Seejärel lisatakse tekkinud lahusesse hapet (tavaliselt väävelhape), mille tulemusel ligniin eraldub ning tulemuseks on u 1-2% väävlit sisaldav *kraft* ligniin. Suurem osa toodetavast *kraft* ligniinist kasutatakse tema väävlisisalduse tõttu ära kütusena tselluloosi- ja paberitööstuses. [3], [18], [22], [23]

Teine väävlit sisaldav ligniin, mida tselluloosi- ja pabertööstuses toodetakse on lignosulfonaat. Sulfiitprotsessi käigus töödeldakse puitmassi vääveldioksiidi vesilahusega erinevatel pH tasemetel. Tulemuseks moodustub lignosulfonaat, mis võrreldes looduses esineva ja *kraft* ligniiniga, on vees lahustuv ning selle väävlisisaldus võib ulatuda kuni 5%ni. Kõrgema puhtusastme saavutamiseks viiakse läbi puhastusetapid, mis hõlmavad endas kääritamist, keemilist eemaldamist, sadestamist ja filtreerimist. Lignosulfonaati kasutatakse mitmetes erinevates tööstustes sideainena, liimidena, pindaktiivsete ja dispergeerivate ainetena. [19], [24]

Väävlivabad ligniinid on ülesehituselt sarnased looduses esinevale ligniinile ning oma omaduste tõttu on nad potentsiaalseks madala molaarmassiga fenoolide ja aromaatsete ühendite allikaks [25].

Leeliseline protsess on eelistatuim meetod kui on vaja töödelda põllumajandusjääke nagu õled, suhkruroomass jne. Protsess toimub sarnaselt *kraft* tehnoloogiale, kus biomassi töödeldakse leeliselises keskkonnas, kuid erinevus seisneb selles, et väävelhapet selles protsessis ei lisata. Tulemuseks on väävlivaba leeliseline ligniin (*soda lignin*), mida saab kasutada materjalikeemia valdkonnas bioplastide ja komposiitide valmistamisel. [18], [24]

Organosolv ekstraheerimisprotsess põhineb lignotselluloosi hüdrotermilisel töötlusel veega, millele lisatakse orgaanilisi lahusteid. Lahustitena kasutatakse enamasti etanooli, metanooli, atsetooni või äädikhapet ning peale ekstraheerimist on need lahustest destillatsiooni teel eraldatavad ja taaskasutatavad. Protsessi tulemusena eraldatakse lignotselluloosist kõrgkvaliteetne väävlivaba ligniin, mida saaks kasutada polümeeride, nagu fenoolformaldehüüdvaikude, polüuretaani ja polüestri, valmistamiseks. Samuti on samast lahusest kerge eraldada tselluloos ja hemitselluloos. [18], [24], [26]

Auruplahvatuse (*steam explosion*) meetod seisneb sellest, et biomassi töödeldakse kõrgel temperatuuril ja kõrge rõhu all oleva auruga, millele järgneb kiire rõhulangus. Selle tulemusel lagunevad biomassis olevate osakeste keemilised sidemed ning ligniin

eraldatakse segust leeliselise pesu abil. Struktuurilt on auruplahvatuse teel saadud ligniin võrreldes teiste tehniliste ligniinidega kõige sarnasem looduslikule ning puhtuse ja keemilise koostise tõttu saab seda kasutada erinevate fenoolvaikude sünteesiks. [18], [24]

Hüdrolüüsi ligniini on suhkru ja bioetanooli tootmise kõrvalsaadus, mida saadakse tavaliselt puidust, kuid ka maisist ja suhkruroost hüdrolüüsi käigus. Selleks töödeldakse biomassi happelises või ensümaatilises hüdrolüüsis, mille tulemuseks on raskelt lahustuv polümeerne ligniin, mida saab kasutada bioetanooli tootmiseks. [18], [24], [27]

2.3 Ligniini kasutamine teedehituses

Ligniini laialdane kättesaadavus ning selle keemilise ülesehituse sarnasus bituumenile, eelkõige aromaatsete ühendite olemasolu, on tõstnud huvi ligniini kasutamise osas teedehituses. Ligniiniga bituumeni asendamise võimalikkust uuriti juba 40 aastat tagasi, kuid selle uuringu käigus jõuti järeldusele, et kuigi ligniini saaks bituumeni asemel asfaltsegus kasutada, ei ole see majanduslikult otstarbekas ligniini kõrge hinna tõttu võrreldes bituumeniga. Arvestades aga praegust bituumeni tõusvat hinda, kättesaadavuse vähenemist ning sektori soovi vähendada süsiniku jalajälge, on taas alustatud ligniiniga modifitseeritud bituumenite ja asfaltsegude katsetamistega. Näiteks uurisid van Vliet jt nelja erineva ligniini mõju kolmele erineva penetratsioonimargiga bituumenile. Suurim lisatav ligniinisaldus oli 25% ning uuringu käigus ilmnes, et bituumeni viskoelastsed omadused sõltuvad ligniini tüübist. Kusjuures märgati, et kõrgemate ligniinisalduste juures on mõju bituumeni jäikusele suurem. Samuti mõjutab tulemuste erinevust see, millise penetratsioonimargiga bituumenit kasutatakse – jäigem bituumen on ligniini sisaldusele tundlikum. [3], [18], [28], [29]

Kuna teede vastupidavuse seisukohalt on oluline bituumeni reoloogiline käitumine ja seeläbi ka asfaltsegude toimivus kõrgetel ja madalatel teekatte temperatuuridel ning pikaajaline vastupidavus, on ligniiniga segude uurimisel rõhk just nendel aspektidel. Käesolevas peatükis on tehtud kokkuvõtte nendest uuringutest ning samuti on välja toodud teistes riikides tehtud katselõigud ning nende tulemused.

2.3.1 Toimivus kõrgetel teekatte temperatuuridel

Eestis kasutatava penetratsioonipõhise bituumeni hindamismeetodi alusel hinnatakse bituumeni toimivust kõrgetel temperatuuridel pehmenemistäpi abil. Pehmenemistäpp näitab tinglikult temperatuuri, millest alates ei suuda bituumen enam liikluse poolt

põhjustatud koormuseid vastu võtta. Toimivuspõhises süsteemis hinnatakse bituumeni viskoelastseid omadusi kõrgetel temperatuuridel DSR (*dynamic shear rheometer*) katsega. Selle abil saab hinnata bituumeni deformatsioonikindlust ja vastupanu väsimuspragunemisele. Samuti toodi ühes uuringus välja, et pehmenemistäpi alusel toimivuse hindamine võib polümeermodifitseeritud bituumeneid katsetades probleemseks osutada. Seega, kuna ligniin on biopolümeer, tuleks kasutada DSR katset. [30]

Uuringutest selgus, et ligniini lisamisel muutub bituumen jäigemaks. Seda näitavad penetratsiooni langus ja pehmenemistäpi tõus, mis omakorda võimaldab segul võtta vastu suuremaid koormuseid (deformatsioonikindluse paranemine) [11], [12], [31], [32], [33], [34], [35]. Sealjuures tuleb arvestada, et kuigi suuremate ligniinisalduste juures on deformatsioonikindlus kõrgem, mõjutab ligniin suuremate sisalduste juures segu töödeldavust ning võivad halveneda segu teised omadused [34]. Ka DSRi tulemustest tuli välja, et mida suurem on bituumenile lisatav ligniini kogus, seda suurem on deformatsioonikindlus kõrgetele teekatte temperatuuridel [34], [36], [37], [38], [39].

2.3.2 Toimivus madalatel teekatte temperatuuridel

Teekatte toimivust madalatel temperatuuridel hinnatakse penetratsioonipõhise hindamismeetodi alusel Fraassi murdumistäpi ja toimivuspõhisel meetodil painduva tala reomeetri, ehk BBR (*bending beam rheometer*) katse abil. Need näitavad millisest temperatuurist alates muutub bituumen rabedaks (voolavuse ja elastsuse vähenemine), põhjustades sellega temperatuurikahanemisest põhjustatud tõmbepingetest tekkivaid pragusid madalatel temperatuuridel. [40]

Uuringute tulemusi analüüsides selgus, et ligniini mõju bituumeni murdumistäpile ei ole ühene. Kuigi ligniini lisamine muudab bituumenit jäigemaks ning võib sellega põhjustada halvemat toimivust madalatel temperatuuridel, selgus teadusartiklitest, et võrreldes kõrgete teekatte temperatuuride omaduste muutumisele, mõjutab ligniin bituumeni murdumistäppi väga vähesel määral. [31], [41] Eelkõige on märgatud negatiivset mõju toimivusele madalatel temperatuuridel [34], [35], [37], [39], [42], kuid kahes uuringus toodi välja ligniiniga modifitseeritud bituumenite parem vastupidavus võrreldes referentsbituumeniga [38], [43]. Sealjuures tuleb märkida, et puudub seos kasutatud erinevate ligniinide ja bituumeni omaduste muutumise vahel, kuna nii *soda* kui ka *kraft* tehnoloogiaga saadud ligniinid näitasid katsetades erinevaid tulemusi. Samuti olid lisatavad ligniinikogused segus väiksed (kuni 15%), seega peaks

suuremate asenduskoguste juures ligniini mõju bituumeni toimivusele madalatel teekatte temperatuuridel edasi uurima.

2.3.3 Pikaajaline vastupidavus

Pikaajalise vastupidavuse määramiseks uuritakse, kuidas bituumeni omadused ajas muutuvad. Bituumeni vananemist, ehk oksüdeerumist mõjutavad õhuhapniku ligipääs bituumenile, kõrgendatud temperatuurid ja aeg. Oksüdeerumise käigus muutub bituumen üldjuhul rabedamaks ja jäigemaks. Selleks, et hinnata oksüdeerumist, mis toimub segu segamisel, transpordil ja paigaldamisel, vanandatakse segu laboratoorselt RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) seadmes. Pikaajalist vananemist, mis toimub bituumeniga tee eksploatatsiooni käigus simuleeritakse PAV (*Pressure Aging Vessel*) seadmega. Oksüdeerumise mõju hindamiseks võrreldakse bituumeni reoloogilist käitumist enne ja pärast vanandamist. [40]

Ligniini kasutamist antioksidandina uuritakse, kuna selle fenoolsete ühendite olemasolu tõttu võib ligniinil ilmnedu hapniku vabu radikaale neutraliseeriv toime, mis aeglustab bituumeni vananemist. Samuti võib ligniini sisaldus vähendada karbonüülühendite moodustumist vananemise käigus, mis omakorda takistab bituumeni oksüdeerumist. [37] Uuringutes ilmnes, et kuigi ligniinil on vananemist aeglustav mõju, on tulemused suuresti sõltuvad sellest, millist ligniinitüüpi kasutatakse [12], [33], [39], [43]. Näiteks selgus ühes uuringus, kus katsetati nii *soda* kui *kraft* ligniiniga segatud bituumeneid, et *kraft* ligniinil on suurem mõju bituumeni vananemiskindluse tõstmisele. Seda seletati asjaoluga, et *kraft* ligniinis on suurem hulk fenooli hüdroksüülrühmi. [43]

2.3.4 Katselõigud

Laboratoorsete katsete tulemustest ilmneb, et osaline bituumeni asendamine ligniiniga mõjub positiivselt asfaltsegude vastupidavusele kõrgetel temperatuuridel ja bituumeni vananemisele ning mõjud madalatel temperatuuridel on minimaalsed. Selleks, et täpsemini hinnata ligniiniga valmistatud asfaltsegude töödeldavust ja toimivust reaalses tingimustes kogu asfaltkatte eluea jooksul, peab ehitama aga katselõike. Rohkem kajastust ligniini kasutuse kohta asfaltsegudes naftabituumeni asendajana on leidnud Rootsis, Hollandis, Kanadas ja Soomes rajatud katselõigud. Rootsi, Hollandi ja Kanada kogemusi on lähemalt kirjeldatud J. Kukebali lõputöös. Käesolevas peatükis antakse lühiülevaade nendelt katselõikudelt saadud tulemustest.

Hollandis läbiviidud Chaplin XL (*Collaboration in aspHalt APplications with LIgnin in the Netherlands - eXtra Lignin*) programmis uuriti bituumeni asendamist ligniiniga,

eesmärgiga vähendada CO₂ emissioone ning välja töötada tehnoloogia, mis võimaldab võimalikult suurt bituumeni asendusmäära, ilma et see mõjutaks asfaltsegu toimivust negatiivselt. Esimesed katselõigud rajati juba 2015. aastal. Praeguseks on valminud enam kui 10 katselõiku, mis erinevad üksteisest nii liikluskoormuste, asendamiseks kasutatud ligniinitüübi kui ka asfaltsegu tüübi poolest. Samuti uuriti ligniini kasutamise võimalust asfaltsegudes, mis osaliselt koosneb ringlussevõetud asfaldist (RAP). Sellistes segudes võib segule lisatava uue bituumeni kuni 50% ulatuses asendada ligniiniga. Chaplin XL uuringu üldjärelendus on, et ligniiniga asfaltsegusid saab toota kasutades olemasolevaid tootmistehnoloogiaid ja ligniini kasutamine asfaltsegudes ei mõjuta segude omadusi negatiivselt. Lisaks järeldati, et maksimaalse bituumeni asendamine (50%) toob kaasa kulumiskihis 35-70% ja kandevkihis 25-50% CO₂ emissioonide languse. Samas viidati ka, et hetkel pole ligniiniga asfaltsegude tootmine suures ulatuses majanduslikult tulus. See aga võib muutuda bituumeni hinna tõusu ja kättesaadavuse vähenemise tõttu ja/või kui teedehitussektoris võetakse suund keskkonnamõjude vähendamisele. [44]

Rootsis ehitati esimesed ligniiniga katselõigud 2020. ja 2021. aastal. Asfaltsegudes asendati 10% bituumenist ligniiniga ja ühe katselõigu rajamiseks kasutati lisaks ligniinile 30% ringlussevõetud asfaldi (RAP). Peale esimest talve ilmnes, et ligniiniga teekatted on hästi vastu pidanud ilmastiku, naastrehvide ja lumesahkade poolt tekitatud mõjudele. Tähelepanu on juhitud ka sellele, et kuigi toimivuse hindamiseks peaks katselõiku pikema aja jooksul jälgima, on siiani kogutud tulemuste põhjal võimalik öelda, et ligniini sisaldavatel asfaltsegudel on parem stabiilsus, deformatsioonikindlus ja veepüsivus. Samuti on märgitud, et kasutatud *kraft* ligniinil on bituumeni vananemist takistav ning värskendav (omadusi taastav) toime. Selle mõju RAPi sisaldavatele segudele on alles uurimise algusjärgus ning üheseid tulemusi pole võimalik veel välja tuua. [45]

3 KATSELÕIGU KIRJELDUS JA KATSEMETOODIKA

3.1 Ettevalmistused katselõigu ehituseks

Kuna varasemalt ei ole Eestis ligniiniga modifitseeritud asfaltsegudest teid ehitatud, siis ligniini esialgsete koguste valikul lähtuti teadusartiklitest, teistes riikides tehtud katselõikude tulemustest ja 2022. aastal J. Kukebali kirjutatud magistritöös välja toodud järeldustest. Siinjuures tuleb arvestada sellega, et J. Kukebali töös keskenduti AC 20 base tüüpi segule, milles kasutati 160/220 penetratsioonimargiga bituumenit. Lisaks teostati viidatud töös katsed laboratoorselt valmistatud asfaltsegudele. Käesolevas töös sooviti aga saada ülevaadet ligniiniga AC 16 surf ning AC 32 base tüüpi segude omadustest ja toimivusest, mis on valmistatud asfalditehases ja mille sideainena on kasutatud 70/100 penetratsioonimargiga bituumenit. See penetratsioonimark on praegu Eesti asfaltsegudes enim kasutatust leidev. Samuti tuleb ära märkida, et J. Kukebali töös ja katselõigu segudes kasutati sama tüüpi ligniini.

Enne katselõigu ehitust tehti sama asfalditootja poolt, kes ka katselõigu jaoks asfaltsegu tootis, katsetootmine. Katsetootmise eesmärgiks oli hinnata, kas ligniini on võimalik lisada asfaltsegule kasutades tavapäraseid tehnoloogiaid või on vaja rakendada erimetoodikat. Selgus, et ligniini on võimalik doseerida kasutades asfalditehase olemasolevaid doseerimise seadmeid. Lisaks sooviti kindlaks määrata, millisel määral saab bituumenit AC 32 base ja AC 16 surf segudes ligniiniga asendada. Katsetootmisel tehti mõlemat segu 15 ja 20%se asendusmääraga. Toodetud segud katsetati TalTechi teede ja liikluse katse- ja teaduslaboratuurimis, kus segudele määrati terastikuline koostis ja sideaine sisaldus, poorsusnäitajad ning veepüsivus. Katsete tulemused ning nendel tuginevad järeldused on välja toodud peatükis 4.1.

3.2 Katselõigu kirjeldus

Katselõik ehitati Järvamaal Imaveresse ehitatava puidukeemiaga tegeleva ettevõtte Fibenol OÜ katsetehase kõrvale. Valmivas tehases hakatakse lehtpuude jääkidest tootma puidusuhkruid, ligniini ja tselluloosi ning seetõttu on tootjal eesmärk uurida, kas ja millises ulatuses saaks nende poolt toodetud ligniini Eestis asfaltsegude sideaine modifitseerijana või asendaja kasutada.

Katselõigu (vt joonis 3.1 ja 3.2) ehitusel kasutatavad asfaltsegud toodeti Tariston AS-i poolt Rõstla paekarjääris asuvas asfalditehases. Veomaa kaugus oli u 20 km ning aeg tootmisest kuni laotamiseni oli u 45 minutit. Kokku toodeti katselõigu jaoks neli ligniiniga modifitseeritud asfaltsegu (kaks kulumiskihi ja kaks kandevkihi jaoks) ja kaks

ilma ligniinita referentssegu (vt tabel 3.1). Segude proovivõtukohtad on märgitud joonistel 3.3 ja 3.4.

Tabel 3.1 Katselõigu jaoks valmistatud asfaltsegud

Nr	Segu tüüp	Ligniini % kogu sideaine mahust
1	AC 16 surf 70/100	0
2	AC 16 surf 70/100	10
3	AC 16 surf 70/100	15
4	AC 32 base 70/100	0
5	AC 32 base 70/100	5
6	AC 32 base 70/100	10



Joonis 3.1 AC 32 base asfaltsegu paigaldamine objektil



Joonis 3.2 Vaade katselõigule



X-GIS2. Maa-amet. Koik õigused kaitstud.

Joonis 3.3 AC 32 base segude proovivõtukohtad



X-GIS2. Maa-amet. Koik õigused kaitstud.

Joonis 3.4 AC 16 surf segude proovivõtukohtad

Asfaltsegudes kasutati Fibenoli poolt toodetud ligniini, tootenimega Lignova™ Crude. Tegemist on termomehaaniliselt eeltöödeldud hüdrolüüsitud ligniinigiga, mis on ilma ebameeldiva lõhnata ning ehituselt sarnane looduses esineva ligniinigiga [46]. Täiendavad andmed on toodud välja tabelis 3.2.

Tabel 3.2 Asfaltsegus kasutatud ligniini andmed [46]

Lignova™ Crude	
Ligniin, %	88
Monomeersed süsivesikud, %	1
Polümeersed süsivesikud, %	5
Tuhk, %	1
Lämmastik, %	<1
Väävel, %	0,15
Molekulmass, kDa	16 000

AC 32 base segu segamisel kasutati ligniini doseerimiseks õhukesti kilekotte, mis asfaltsegu segamise ajal vajalikus koguses koos bituumeniga segurisse lisati. Bituumeni ja täitematerjali temperatuur sulatavad kilekoti ning seetõttu ei ole vaja enne asfaltsegu valmistamist eraldi bituumenit ja ligniini ühtlaseks sideaineks segada. AC 16 surfi puhul lisati ligniini segusse asfalditehases olemasoleva automaatse doseerimise teel.

Objektile võeti asfaltsegust laoturi tiguvõllide juurest proovivõtukühvliga proovid vastavalt standardile EVS-EN 12697-27 [47].

3.3 Katsete kirjeldused

Katsed teostati Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Asfaltsegudele tehti tabelis 3.3 välja toodud katsed.

Tabel 3.3 Asfaltseguga tehtud katsed ja kasutatud meetodid

Nr	Nimetus	Katsestandard
1	Sideainesisaldus ja terastikuline koostis	EVS-EN 12697-1:2020; EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019
2	Näiva erimassi määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-5:2018
3	Mahumassi määramine (meetod B)	EVS-EN 12697-6:2020
4	Poorsusnäitajad	EVS-EN 12697-8:2018
5	Veepüsivuse määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-12:2018
6	Deformatsioonikindlus (meetod B, õhus, väike seade)	EVS-EN 12697-22:2020
7	Marshalli stabiilsuse ja voolavuse määramine	EVS-EN 12697-34:2020
8	Vastupidavus naastrehtide toimele (meetod A)	EVS-EN 12697-16:2016

Sideaine sisaldus ja terastikuline koostis määrati vastavalt standarditele EVS-EN 12697-1 ja -2. Mõlema katse korral rakendatakse massierinevuse meetodit. Selleks eraldatakse ettevalmistatud asfaltsegust ekstraheerimise teel lahustuv sideaine. Sideaine sisaldus arvutatakse massiprotsentides kogu asfaltsegust. Ekstraheerimise käigus sideainest

puhtaks pestud kivimaterjal kuivatatakse, kaalutakse ning seejärel sõelutakse. Sõelkövera saamiseks leitakse sõelte läbindid. Saadud tulemuste põhjal saab hinnata asfaltsegu vastavust kehtestatud nõuetele. Katse sooritamisel kasutati poolautomaatset ekstraktorit. [48], [49]

Asfaltsegude proovikehad poorsusomaduste, kulumiskindluse, veepüsivuse ja Marshalli katse jaoks valmistati löök- või güraatortihendajaga. Olenevalt segu tüübist ja sellest, millise katse jaoks proovikeha valmistati, erines tihendamiseviis ja -energia (vt tabel 3.4). Lööktihendamine toimus standardi EVS-EN 12697-30 ning güraatortihendamine standardi EVS-EN 12697-31 alusel. Segus kasutatud bituumenimargist sõltuv proovikehade tihendamistemperatuur valiti vastavuses standardiga EVS-EN 12697-35. Kuna kõik segud olid valmistatud bituumeniga, mille penetratsioonimark oli 70/100, siis valiti tihendamistemperatuuriks kõigi proovikehade puhul 145°C. [50], [51], [52]

Tabel 3.4 Asfaltsegude tihendamiseviis, -energia ja -temperatuur [53]

Asfaltsegu	Katse	Lööktihendamine, löökide arv	Güraatortihendamine, pöörete arv	Tihendamistemperatuur, °C
AC 16 surf 70/100	poorsusomadused, kulumiskindlus, Marshalli katse	2x50	-	145
	veepüsivus	2x35	-	
AC 32 base 70/100	poorsusomadused	-	60	
	veepüsivus	-	50	
	Marshalli katse	2x50	-	

Asfaltsegu erimass (poorideta mass) leiti vastavalt standardile EVS-EN 12697-5. Näiva erimassi määramiseks kasutati mahulist protseduuri (meetod A), mille korral mõõdetakse teadaoleva kuivmassiga jämedateks osisteks ja aglomeraatideks kobestatud asfaltsegu maht vee väljasurve alusel püknomeetris. [54]

Asfaltproovikeha mahumass määrati proovikeha massi ja mahu põhjal kasutades meetodit B – immutatud ja kuivatatud pinnaga (SSD), mis on kirjeldatud standardis EVS-EN 12697-6:2020. Proovikeha maht saadakse selle kaalumisel õhus ja vees, seejuures enne vees kaalumist immutatakse proovikeha vees ning seejärel see kuivatatakse niiske seemisnahkse lapiga ja kaalutakse uuesti õhus. [55]

Teades asfaltsegu erimassi ja asfaltsegust tehtud proovikeha mahumassi, saab arvutada standardi EVS-EN 12697-8 alusel asfaldist proovikeha poorsusomadused. Jäävpoorsus näitab pooride mahtu asfaldist proovikehas, väljendatuna protsentidena proovikeha üldmahust ning selle põhjal saab otsustada, kas asfaltsegu vastab Eesti rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021 olevatele nõuetele. [56]

Asfaltsegust proovikehade veepüsivus katsetati standardis EVS-EN 12697-12 oleva meetodi A kohaselt. Selleks jagatakse laboratoorselt valmistatud proovikehad kahte mahumassi alusel võrdsesse alagruppi ja viiakse konditsiooni. Ühe alagrupi proovikehad jäetakse kuivalt toatemperatuurile seisma (nn kuiva grupi proovikehad), teise alagrupi proovikehad küllastatakse veega ning hoiustatakse 72 tundi 40°C vees (nn märja grupi proovikehad). Pärast 72 tunni möödumist viiakse mõlemad alagrupi proovikehad katsetemperatuurile, mis Eestis on 15°C. Veepüsivus on määratletud märja ja kuiva alagrupi proovikehade kaudsete tõmbetugevuste suhtena ja seda väljendatakse protsentides. [57]

Kulumiskihis kasutatavale asfaltsegule määrati naastrehvide poolt tekitatava kulumise määr vastavalt standardis EVS-EN 12697-16 kirjeldatud meetodile A. Katse käigus kulutatakse teraskuulide abrasiivsel toimel kindla ajavahemiku jooksul laboratoorselt valmistatud silindrilisi proovikehasid, mis on eelnevalt viidud katsetemperatuurile (5°C). Kulumismäärana protokollitakse proovikeha mahukadu milliliitrites. [58] Katsed viidi läbi Tallinna Teede AS laboris.

Marshalli stabiilsuse ja voolavuse määramiseks katsetati laboratoorselt lööktihendajaga valmistatud proovikehasid standardi EVS-EN 12697-34 kohaselt. Kuigi lööktihendajaga tihendamine sobib ainult segudele, mille suurim teramõõt on kuni 22,4 mm, siis tingitult Marshalli katse nõuetest valmistati AC 32 base kehad siiski lööktihendajaga. Stabiilsuse mõõtmiseks surutakse 60°C vees konditsiooni viidud ja külili katsespetsiifilise surumisseadme keskele asetatud proovikeha seni, kuni jõumõõtesead annab maksimumlugemi. Voolavuse väärtused saadakse jõu vs deformatsiooni graafikult. [59]

Asfaltsegu deformatsioonitundlikust hinnati vastavalt standardile EVS-EN 12697-22. Selleks valmistati laboratoorse rulltihendajaga 145°C juures proovikehad [60], mida katsetati meetodi B kohaselt väikses masinas, õhu keskkonnas. Deformatsioonikindluse määramiseks koormatakse proovikehi korduvate läbikutega 50°C juures ning seejärel mõõdetakse katse käigus tekkinud roopa sügavus [61].

4 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS

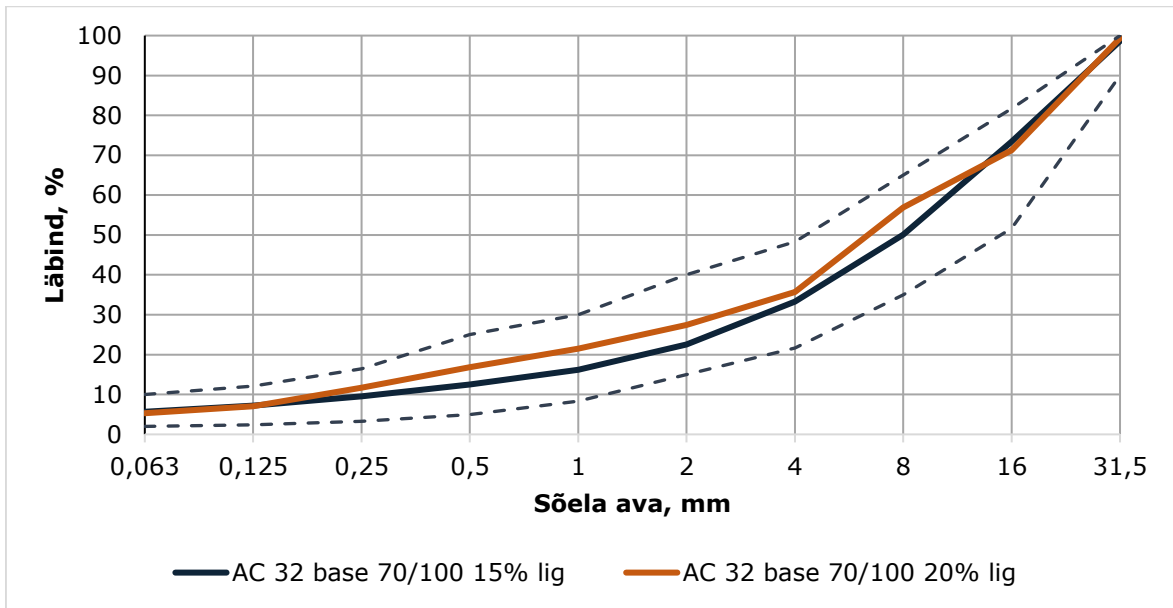
4.1 Katsetootmise asfaltsegude katsete tulemused

Suurima võimaliku ligniini sisalduse määramiseks katselõigule paigaldatavates asfaltsegudes võrreldi katsetootmise käigus segatud erinevate ligniini sisaldustega asfaltsegudele teostatud katsete tulemusi Eestis kasutatava rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021 välja toodud nõuetega. Käesolevas peatükis on välja toodud katsetootmise käigus toodetud asfaltsegudest võetud proovide katsete tulemused.

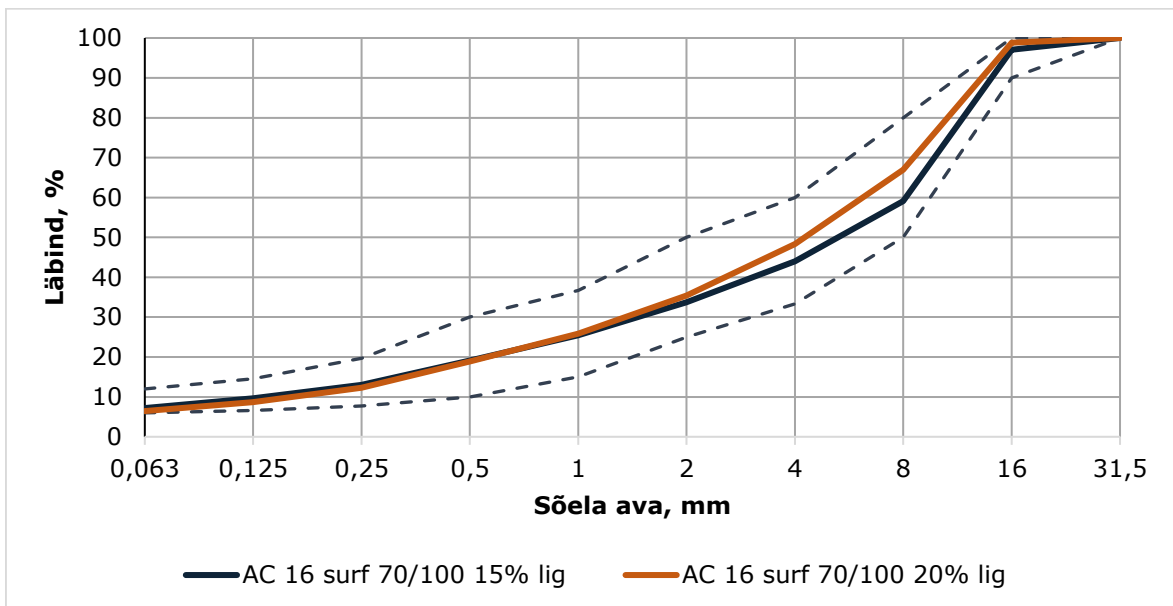
Asfaltsegude katsetootmine viidi läbi Tariston AS-i Harkus asuvas asfalditehases. Iga uuringusse kaasatud segust valmistati üks seguritais (u 2,5-3 tonni) proovisegu, millest võeti proov vastavalt standardile EVS-EN 12697-27 vahetult pärast segurist väljastamist. Proovid transporditi Tallinna Tehnikaülikooli laborisse katsetamiseks.

4.1.1 Terastikuline koostis

Jooniste 4.1 ja 4.2 abil saab hinnata katsetootmise käigus valmistatud segude terastikulise koostise vastavust standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetele. Graafikutelt on näha, et kõikide segude sõelkõverad on lubatud sõelkõveraväljas. Samuti on võimalik terakoostise ja bituumeni sisalduse tulemuste põhjal hinnata kaudselt ka teisi segu toimivusega seonduvaid näitajaid. Kui terastikuline koostis ei vasta projekteeritule, siis suure tõenäosusega tekivad erinevused või mittevastavused ka teiste segu nõutud omaduste osas.



Joonis 4.1 AC 32 base segude terastikuline koostis koos standardis EVS 901-3:2021 välja toodud piiridega



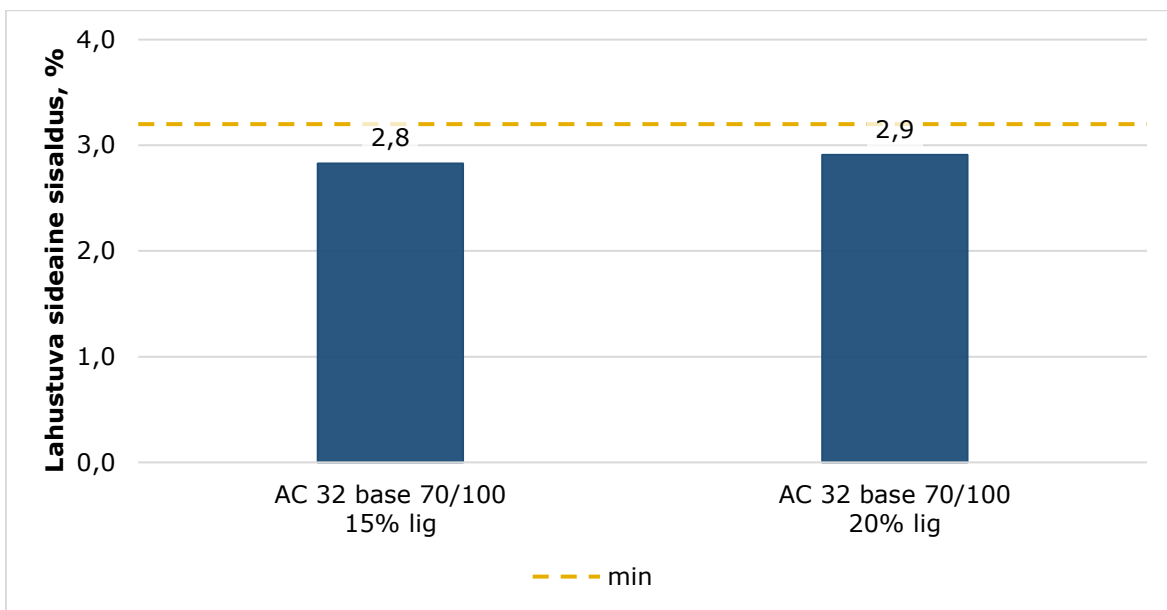
Joonis 4.2 AC 16 surf segude terastikuline koostis koos standardis EVS 901-3:2021 välja toodud piiridega

4.1.2 Sideaine sisaldus

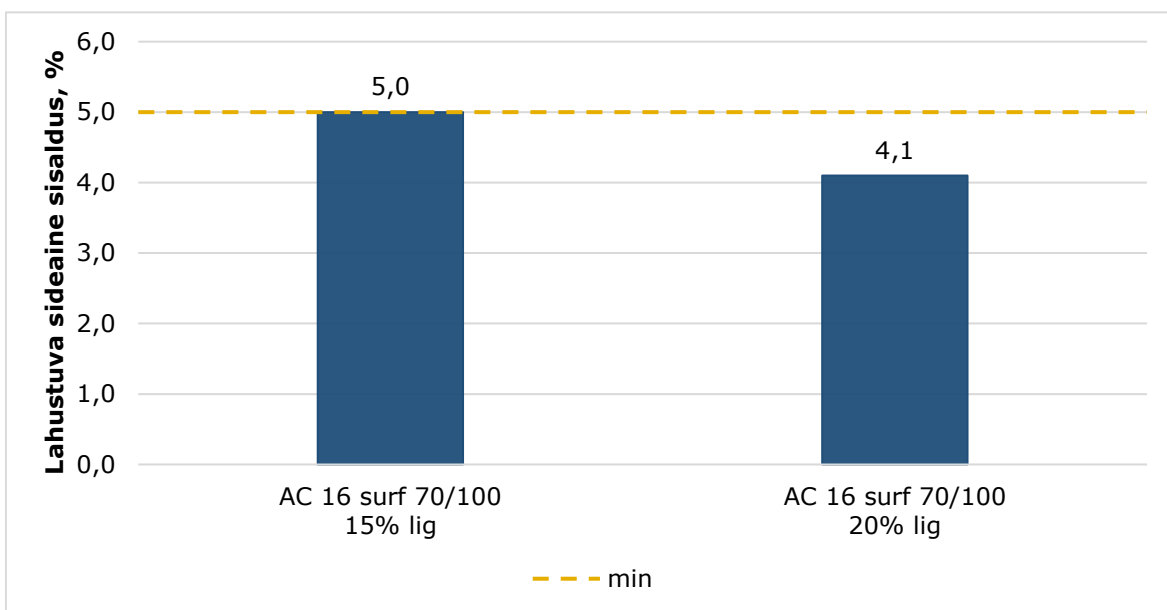
Eesti rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021 on iga asfaltsegu tüübi jaoks kirjeldatud minimaalsed sideaine (bituumeni) sisalduse alampiirid, millele asfaltsegud vastama peavad. Need piirid on kogemuslikud ja nende määramisel ei ole arvestatud sellega, et lisaks tavapärastele asfaltsegu lähtematerjalidele kasutatakse segu koostises teisi koostisosi, nagu näiteks ligniini, mis võib täita bituumeniga sarnast rolli. [53]

Bituumeni sisaldus on üks olulisemaid asfaltsegu näitajaid. Kui asfaltseguisse lisatav bituumeni kogus on väiksem minimaalsest nõutavast sideaine sisaldusest, siis võib valminud segu osutada liiga kuivaks ja poorsusomadustelt nõuetele mittevastavaks. Liiga kuiva ja poorse segu paigaldamine ja tihendamine võib olla raskendatuks. See omakorda võib halvendada asfaltkate vastupidavust liikluse ja ilmastiku poolt põhjustatud defektidele (nt väsimuspragunemine, veepüsivus, pikaajaline vastupidavus bituumeni oksüdeerumisele). Liiga suure bituumeni koguse kasutamine ei ole aga ökonoomne, sest bituumen on üks kalleim komponent asfaltsegust. Samuti võivad liigse sideaine korral liikluskoormuse mõjul tekkida asfaltkattes plastsed deformatsioonid või asfaltkate võib hakata „higistama“. [62]

Joonistel 4.3 ja 4.4 on näha uuringusse kaasatud segude lahustuva sideaine sisalduste katsetulemused ning nende võrdlus standardis EVS 901-3:2021 välja toodud nõuetega. AC 32 base segude puhul peab lahustuva sideaine sisaldus olema vähemalt 3,2%, AC 16 surf segudel 5,0% [53]. Kuna segudes kasutati ligniini, ei ole võimalik ühest vastavus standardile hinnata, kuid saadud tulemusi saab kasutada segureseptiga võrdluseks ning teiste näitajate tulemuste analüüsiks.



Joonis 4.3 Kandeakhi asfaltsegude lahustuva sideaine sisaldus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega



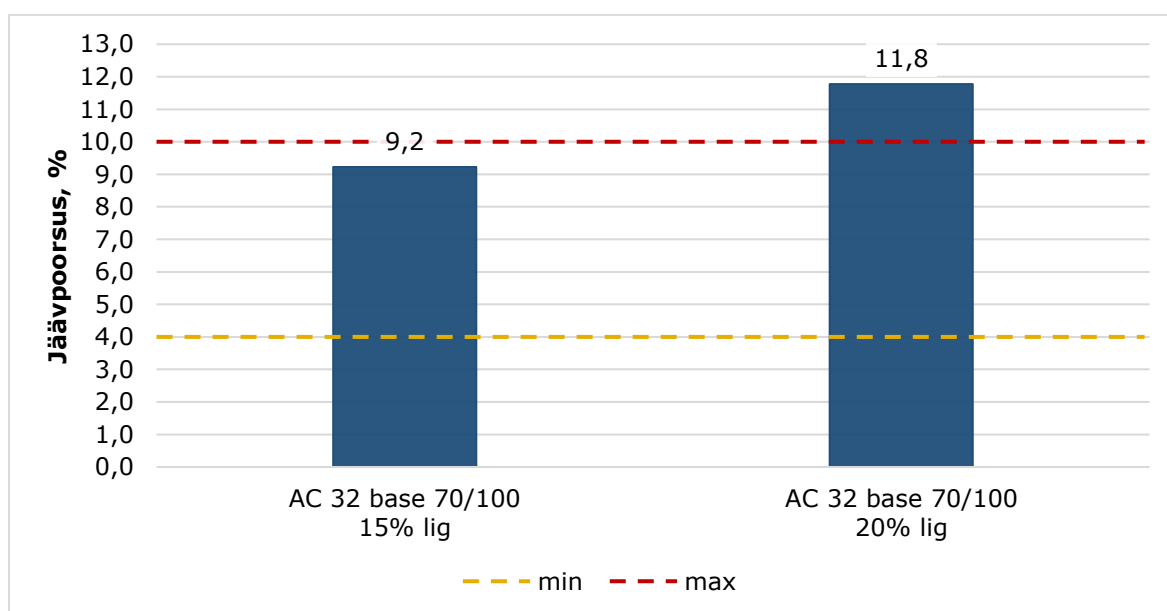
Joonis 4.4 Kulumiskihi asfaltsegude lahustuva sideaine sisaldus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

Mõlema asfaltsegu katsete järel ilmnas (vt joonised 4.3 ja 4.4), et bituumeni asendamine ligniiniga vähendas lahustuva sideaine määra asfaltsegus. Samas on näha, et AC 16 surf 20% ligniinisaldusega segu lahustuva sideaine sisaldus on märkimisväärselt madalam kui teistel segudel. Kuna lisatava ligniini erinevus 15% ligniiniga segust oli kõigest 5%, ei peaks see tulemusi sedaviisi mõjutama. Sellist tulemuse erinevust võis põhjustada segu erinevus retseptist või proovivõtt asfalttehasest.

4.1.3 Jäävpoorsus

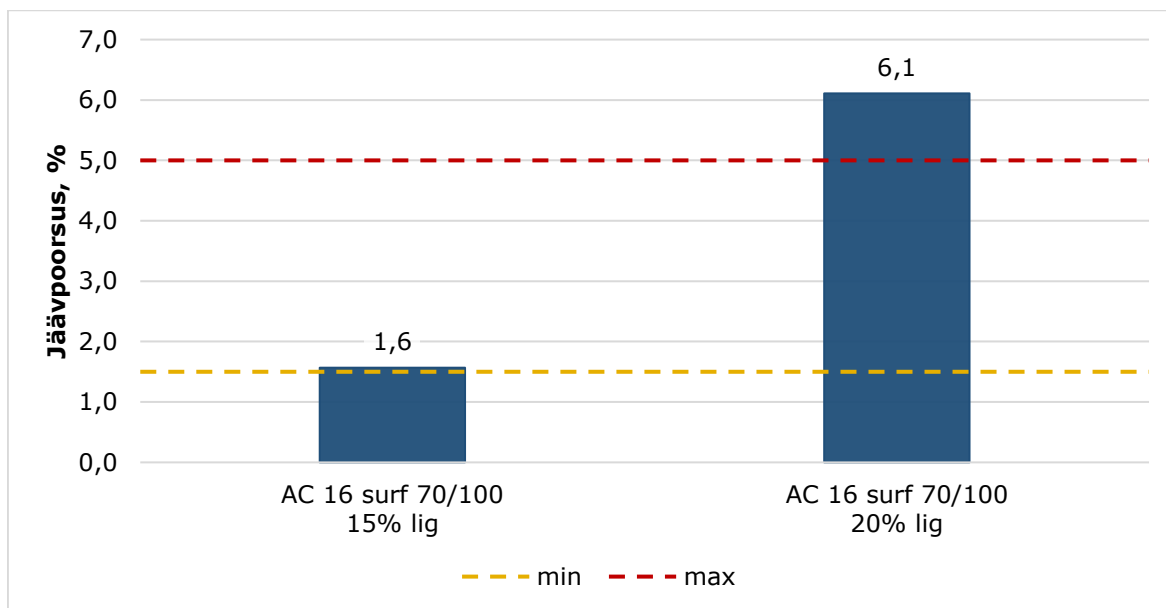
Asfaltsegude lubatud jäävpoorsuse vahemikud on välja toodud Eestis kehtivas rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021 ning on üheks asfaltsegude omaduste põhinõudeks. Kui asfaltsegude jäävpoorsused ei ole optimaalsetes piirides, siis võib sellega kaasneda teekatte eluea lühenemine. Liigtihe kate kaotab eksploatatsiooni käigus oma deformatsioonikindluse ning liigpoorne kate on vastuvõtlikum ilmastikust tingitud lagunemisele. [62]

Joonistel 4.5 ja 4.6 on AC 32 base ja AC 16 surf segude jäävpoorsused ning nende võrdlus standardis EVS 901-3:2021 välja toodud nõutava jäävpoorsuse vahemikuga, mis AC 16 surf segude puhul on 1,5 kuni 5,0% ning AC 32 base segude puhul 4 kuni 10% [53].



Joonis 4.5 Ligniinigamodifitseeritud kandevkihi asfaltsegude jäävpoorsus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetega

Joonis 4.5 näitab, et 15%se ligniinisalduse juures on AC 32 base jäävpoorsus 9,2% ning see jääb nõutud piiridesse. 20%se ligniinisaldusega asfaltsegu jäävpoorsus on 11,8%, mis ületab jäävpoorsuse nõude ülempiiri.



Joonis 4.6 Ligniinigiga modifitseeritud kulumiskihi asfaltsegude jäävpoorsus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetega

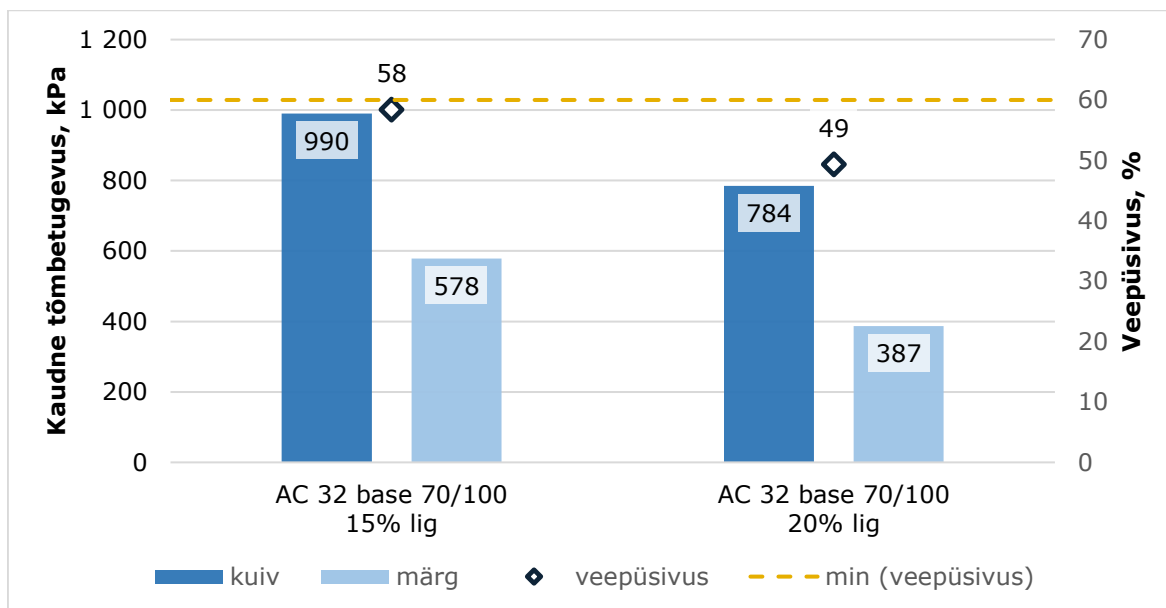
Jooniselt 4.6 selgub, et 15%se ligniinisaldusega segul on jäävpoorsus 1,6%, mis jääb napilt üle jäävpoorsuse nõude alampiiri. 20%se ligniinisaldusega segul on tulemus 6,1%, mis juba ületab lubatud ülempiiri.

Tulemused viitavad, et ligniini sisalduse suurenemisega kaasneb ka jäävpoorsuse tõus, mis on kooskõlas ka J. Kukebali lõputöös tehtud katsetega. Nende tulemuste põhjal võib järeldada, et optimaalne ligniini kogus AC 32 base segude puhul saab olla maksimaalselt 15% ja AC 16 surf segude puhul peaks lisatav ligniini kogus jääma 15 ja 20% vahele.

4.1.4 Veepüsivus

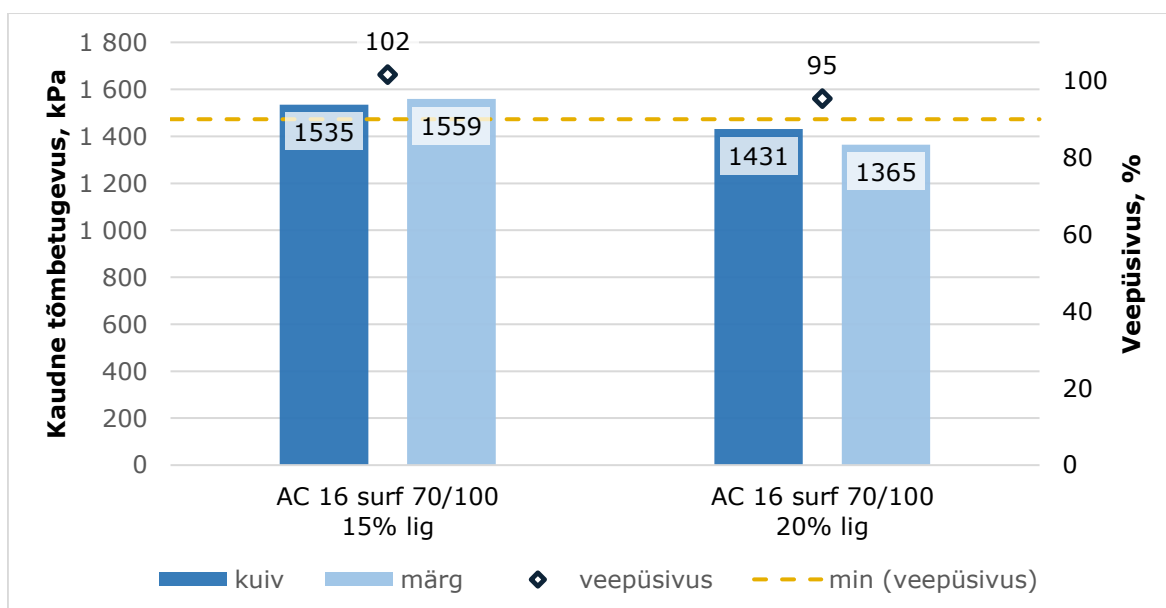
Asfaltsegude veepüsivuse alampiirid on määratletud Eestis kehtivas rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021. Madalamate veepüsivuse tulemuste juures on vee mõju asfaltsegudele suurem ning see võib põhjustada sideaine ja täitematerjali eraldumist teineteisest, lühendades teekatte eluiga [62].

Joonistel 4.7 ja 4.8 on AC 32 base ja AC 16 surfi segude veepüsivuse ja kaudsete tõmbetugevuste tulemused ning standardis EVS 901-3:2021 välja toodud miinimumnõuded segudele. Selle kohaselt peab AC 32 base segu veepüsivus olema vähemalt 60% ja AC 16 surfi veepüsivus vähemalt 90% [53]. Asfaltsegude kuiva ja märja grupi proovikehade tõmbetugevustele ei ole ette nähtud nõudeid, kuid nende tulemuste põhjal on võimalik hinnata segude käitumist.



Joonis 4.7 Ligniiniga modifitseeritud kandevkihi asfaltsegude veepüsivus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

Joonisel 4.7 kirjeldatud katsetulemused viitavad sellele, et 15% ligniinisaldusega AC 32 base asfaltsegu veepüsivus on 58 ja 20% ligniinisaldusega segul 49%, ehk kumbki segu ei täida EVS 901-3:2021 välja toodud 60% nõuet.



Joonis 4.8 Ligniiniga modifitseeritud kulumiskihi asfaltsegude veepüsivus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

Joonis 4.8 näitab, et 15% ligniinisaldusega AC 16 surf asfaltsegu veepüsivus on 102 ja 20% ligniinisaldusega segul 95%, täites standardis EVS 901-3:2021 nõutava miinimumpiiri ($\geq 90\%$). Nendele tulemustele tuginedes võib öelda, et mõlemad segud sobiksid selle näitaja alusel kulumiskihis kasutamiseks.

Võrreldes segude kaudse tõmbetugevuse tulemusi selgub, et ligniini sisalduse kasvades langeb mõnevõrra jõu suurus, mida on vaja rakendada proovikeha purustamiseks. Samuti on näha, et ligniini sisaldusel on suurem mõju kandevkihi segudele, mis on tõenäoliselt põhjustatud AC 32 base kehade suuremast jäävpoorsusest. Veepüsivuse tulemuste põhjal saab öelda, et AC 32 base standardikohaste miinimumnõuete täitmiseks peab ligniinisaldust asfaltsegudes vähendama alla 15% ning, et AC 16 surf puhul võib asfaltsegusse lisatav ligniini kogus olla vähemalt 20%.

4.1.5 Järeldused katsetootmisest

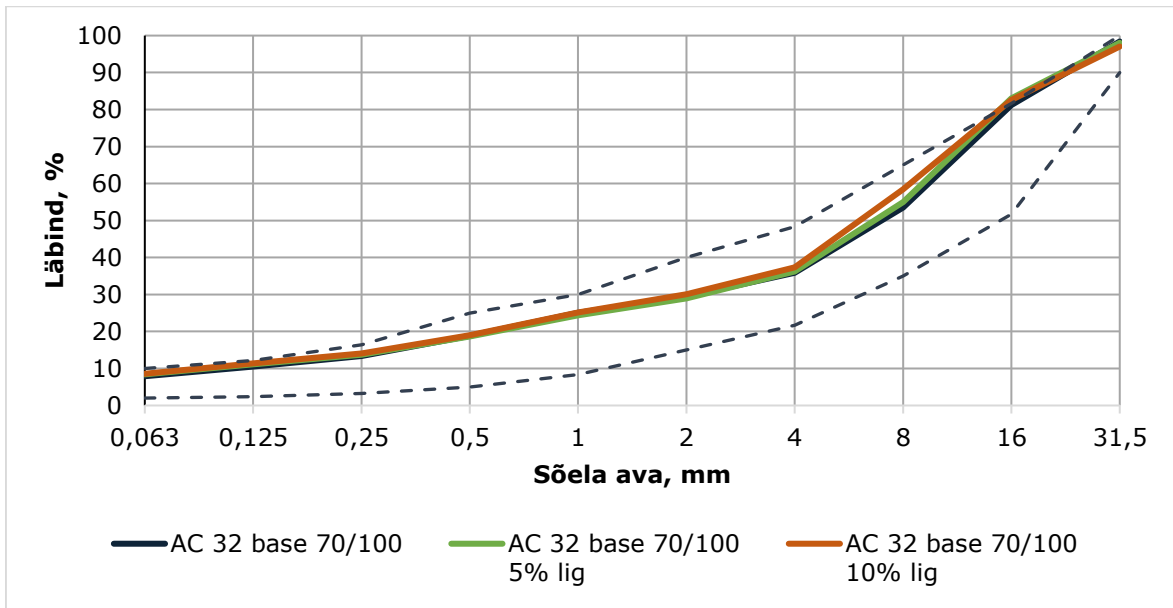
Arvestades nii poorsusnäitajate kui ka veepüsivuse katse tulemusi tervikuna ning nende vastavust Eestis kehtivatele nõuetele, selgus katsetootmise käigus, et AC 32 base segu korral on 15%ne ligniinisaldus liiga suur ning, et AC 16 surf puhul saab ligniiniga asendada kuni 15% sideainest. Need järeldused olid aluseks katselõigu asfaltsegudes ligniini asendusmäärade valikul. Katselõigu tulemusi on käsitletud järgnevas peatükis 4.2.

4.2 Katselõigu asfaltsegude tulemused

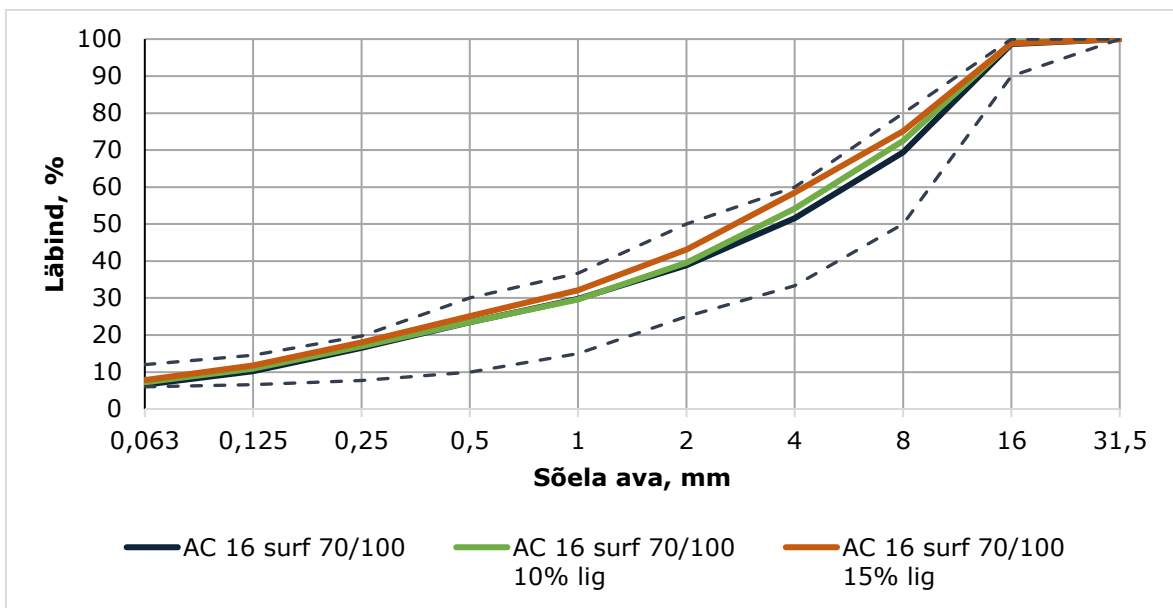
Sarnaselt katsetootmisele, oli ka katselõigu asfaltsegude katsetamise eesmärgiks selgitada välja ligniini mõjud AC 32 base ning AC 16 surf tüüpi asfaltsegudele ning võrrelda tulemusi katsetootmises saadud tulemustega ja EVS 901-3:2021 nõutud toimivusnäitajatega. Kuna katsetootmises teostati iga uuringusse kaasatud segude tootmine ühe seguritäre kaupa, võib see tingida ettenähtud retseptist hälvimist, sest nii väikese toodetud partii lõikes ei pruugi tootmine olla hästi kontrollitav. Erinevalt katsetootmisele võimaldab aga katselõigule toodetud asfaltsegude tootmine paremini hinnata segu omadusi tavapärasel tootmisprotsessis.

4.2.1 Terastikuline koostis

Järgneval kahel joonisel (vt joonis 4.9 ja 4.10) on näha katselõigule paigaldatud asfaltsegude terastikulised koostised. Kõikide uuritud segude terakoostised on standardis EVS 901-3:2021 lubatud piirides ja väga sarnased, mis omakorda annab hea aluse omaduste võrdlemiseks erineva ligniini sisaldusega segude vahel.



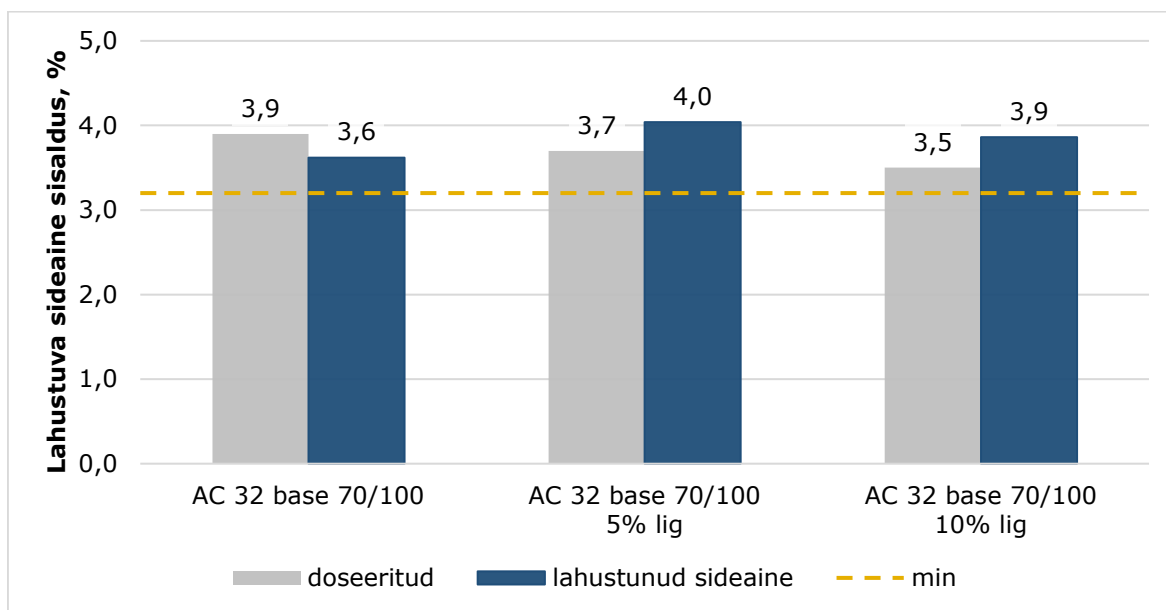
Joonis 4.9 AC 32 base segude terastikuline koostis koos standardis EVS 901-3:2021 välja toodud piiridega



Joonis 4.10 AC 16 surf segude terastikuline koostis koos standardis EVS 901-3:2021 välja toodud piiridega

4.2.2 Sideaine sisaldus

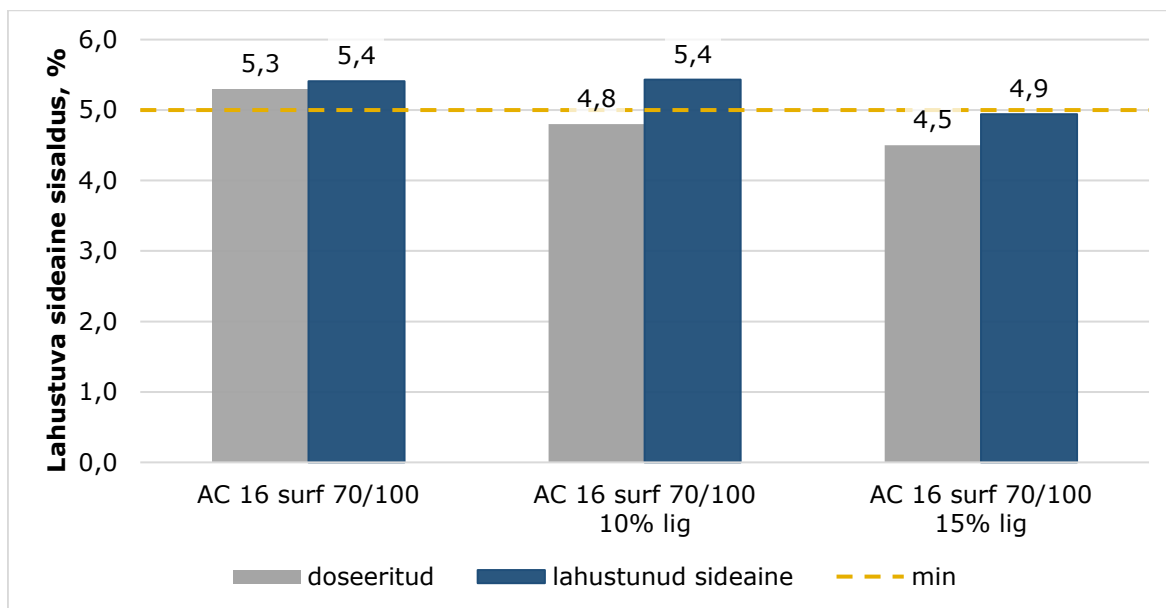
Joonistel 4.11 ja 4.12 on esitatud katsetatud katselõigu asfaltsegude lahustuva sideaine sisalduse tulemused ning nende võrdlus standardis EVS 901-3:2021 olevate nõuetega. Lahustuva sideaine sisalduse mõju asfaltsegu omadustele on täpsemalt lahti seletatud jaotises 4.1.2.



Joonis 4.11 Doseeritud ja lahustuva sideaine sisaldus kandevkihi asfaltsegudes võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

Kuna ligniini lisatakse asfaltsegule bituumeni arvelt ja ligniin ei lahustu ekstraheerimisel kasutatavas lahustis, siis kõigi eelduste kohaselt peaks ligniini sisalduse kasvades lahustuva sideaine sisaldus vähenema. Sarnane trend joonistus välja näiteks J. Kukebali ja ka käesoleva uuringu raames tehtud katsetootmisel (vt joonis 4.3 ja 4.4). Suurim bituumenisalduste erinevus on AC 16 surf segude puhul ning on põhjustatud sellest, et kulumiskihi segudes kasutatakse mahuliselt rohkem sideainet kui kandevkihtides.

Joonisel 4.11 on näha, et AC 32 base puhul on tulemus vastupidine. Kõrgemat bituumenisaldust kõigi segude puhul võib põhjendada sellega, et segu terastikuline koostis on tavapärasest sõelkõverast peenem (vt joonis 4.9), kuid see ei seleta, miks ligniiniga modifitseeritud asfaltsegude bituumenisaldus on kõrgem kui referentssegul ning suurem kui segusse doseeritud bituumeni hulk. Üheselt ei ole võimalik põhjust määrata, kuid kõrgendatud bituumenisaldust ja peenema terakoostisega asfaltsegu põhjuseks võib olla asfaltsegu segregeerumine transpordil tehases objektile, proovivõtt objektile või retsepti sõelkõverast hälbimine segude kokkusegamisel asfalttehas.



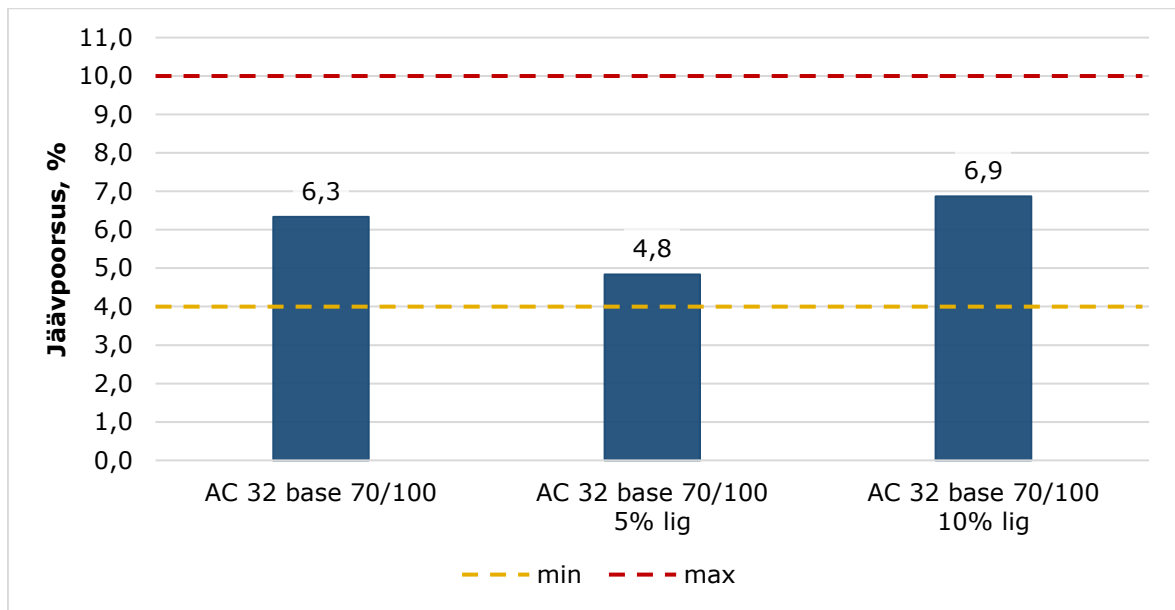
Joonis 4.12 Doseeritud ja lahustuva sideaine sisaldus kulumiskihi asfaltsegudes võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

Joonisel 4.12 on näha, et nii referentssegu kui ka 10%se ligniinisaldusega segu bituumenisisaldus on 5,4%. Nagu katsetootmise segude puhul, peaks ka siin olema sarnane kahanev sideainesalduse trend, mida on näha vaadates 15%se ligniinisaldusega segu, millel bituumenisisaldus on 4,9%. Samuti ilmneb, et kõikides segudes on lahustuvat sideainet rohkem kui seda sisse doseeriti. Tulemuste põhjuseks võivad olla samad tegurid, mis kandevkihi asfaltsegude puhul välja on toodud.

Lisaks eelnimetatud põhjustele võib katselõikude segude tulemuste erinevus katsetootmise omadest erineda selle tõttu, et nende proovivõttud olid teostatud erinevatel töötappidel. Nimelt võeti katsetootmisel segust proovid vahetult peale nende kokku segamist tehases, katselõigu proovid aga objektilt asfaldilaoturi tiguvõllide juurest, st ajaline vahe tootmisest kuni proovi võtuni oli u 45 minutit. Käesolevas töös on tõstatatud hüpotees, et nende 45 minuti jooksul reageeris ligniin bituumeniga viisil, mis muudab selle koos bituumeniga paremini segunevaks. Kuna teaduskirjanduses selle kohta andmed puuduvad, tuleks tulevikus tehtavates uuringutes keskenduda ka ligniini ja bituumeni omavahelisele käitumisele segamise ja transpordiga seonduvatel temperatuuridel.

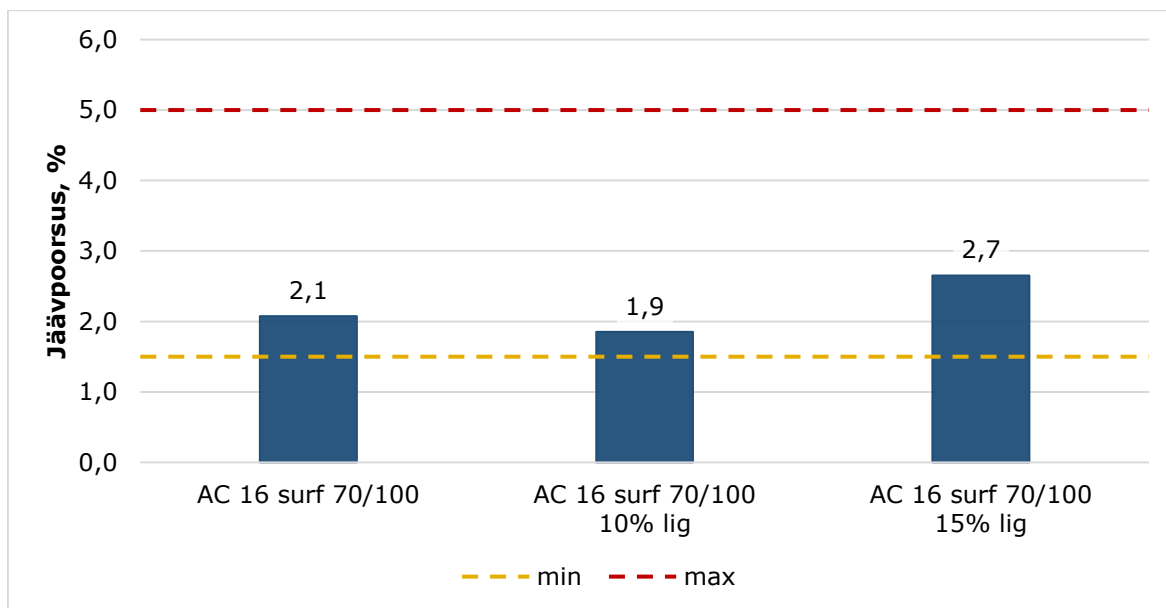
4.2.3 Jäävpoorsus

AC 32 base ja AC 16 surf segude jäävpoorsused ja nende võrdlus standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud jäävpoorsuse vahemikega on esitatud joonistel 4.13 ja 4.14. Lubatud vahemikud ning jäävpoorsuse mõju asfaltsegule on pikemalt kirjeldatud jaotises 4.1.3.



Joonis 4.13 Kandevekihi asfaltsegude jäävpoorsus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetega

Joonisel 4.13 näeb, et J. Kukebali lõputöös ning katsetootmisel välja tulnud seos jäävpoorsuse vähenemise kohta väiksemate ligniini sisalduse juures ei ole niivõrd ühene. Referentssegu ning 5 ja 10% ligniinisaldusega asfaltsegude jäävpoorsused on vastavalt 6,3, 4,8, ja 6,9% ning kõik tulemused jäävad optimaalse jäävpoorsuse vahemikku. Seosega vastuolus on 5% ligniinisaldusega asfaltsegu, mille jäävpoorsus on referentsist 24% võrra väiksem. Tulemust võib seletada asjaoluga, et 5% segu bituumenisisaldus on referentssegu omast kõrgem ning seetõttu on asfaltsegu paremini töödeldav (tihendatav) ning rohkem poore bituumeniga täidetud. 10% ligniinisaldusega segu jäävpoorsus on 8% võrra suurem referentssegu omast. Kuigi ka sellel segul oli bituumenisisaldus suurem, tuleb arvestada, et ligniini lisamisel muutub bituumen mõnevõrra jäigemaks ning seetõttu ka raskemini töödeldavaks.

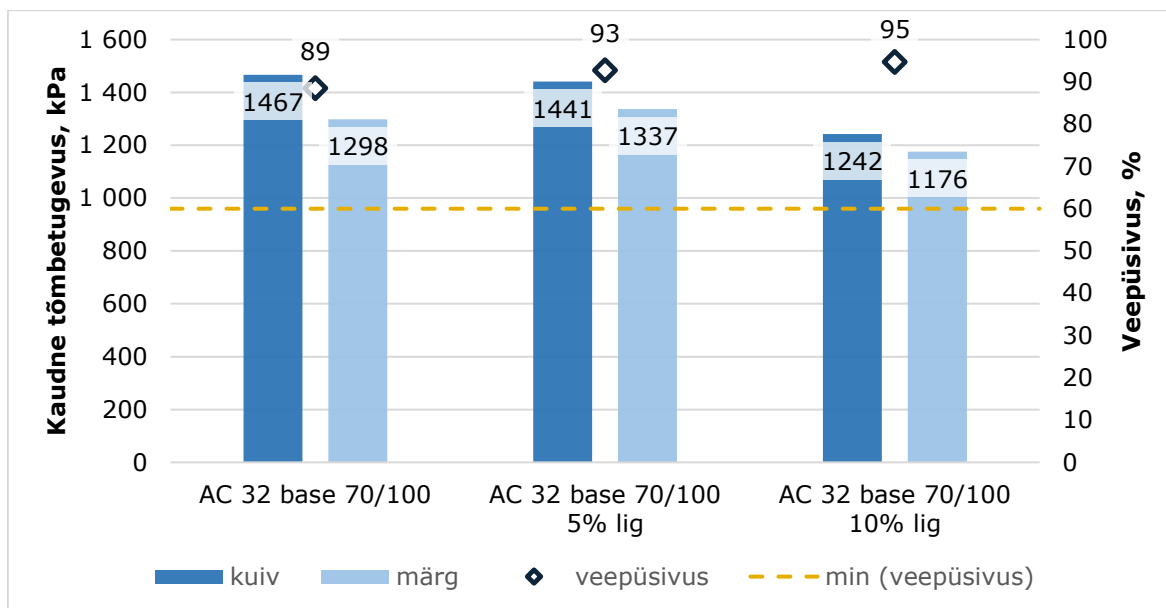


Joonis 4.14 Kulumiskihi asfaltsegude jäävpoorsus võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetega

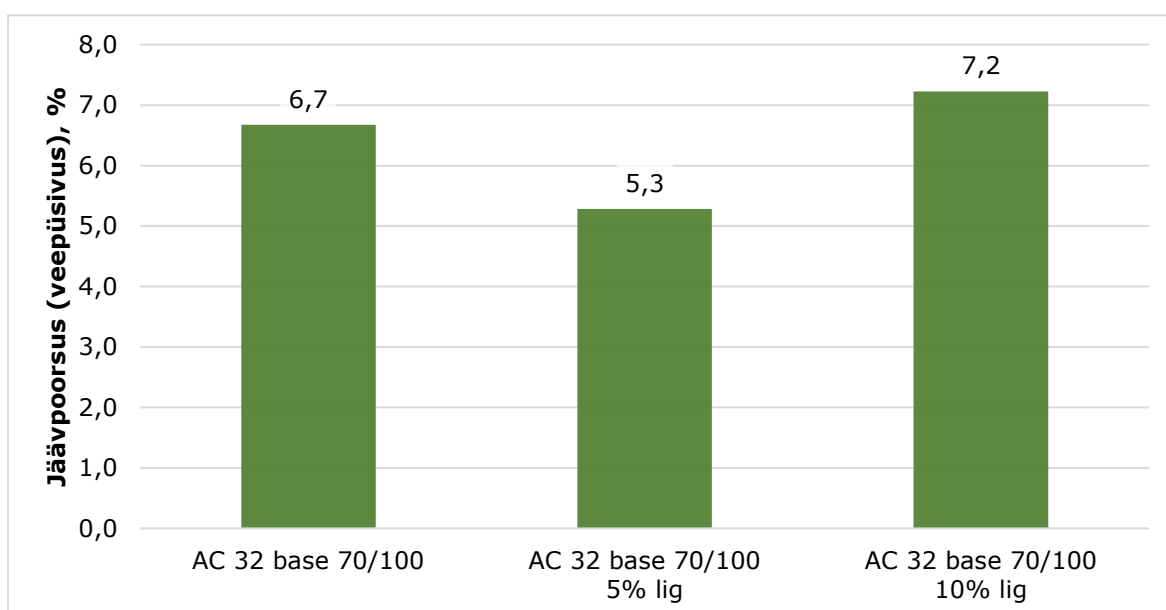
AC 16 surf segude jäävpoorsus on nii referentsegul kui ka 10% ligniini sisaldusega segul üsna sarnane, vastavalt 2,1 ja 1,9%. 15% ligniiniga segul on jäävpoorsus 2,7%, mis on referentssegust 28% võrra suurem. Siiski jäävad kõikide segude jäävpoorsused lubatud vahemikku (vt joonis 4.14). Sarnaselt kandevkihi segude tulemustele võib referentssegu ja 10% ligniini sisaldusega segu jäävpoorsuse tulemuste sarnasusi seostada asjaoluga, et nende segude sideaine sisaldus on võrdne. Ka 15% ligniini sisaldusega segu 28% suurust erinevust referentssegu tulemusest võib seletada sellega, et sideaine sisalduse vähenemise ja ligniinisalduse suurenemise tõttu, on segu raskemini töödeldav.

4.2.4 Veepüsivus

Joonistel 4.15 ja 4.17 on asfaltsegude kaudsete tõmbetugevuste suurused, veepüsivuse tulemused ning nende võrdlus standardis EVS 901-3:2021 olevate nõuetega. Nõuete ning vee mõjust asfaltsegule saab täpsemalt lugeda jaotises 4.1.4. Samuti on käesolevas peatükis eraldi välja toodud veepüsivuse määramiseks kasutatud katsekehade jäävpoorsused (joonised 4.16 ja 4.18), kuna asfaltsegude veepüsivuse tulemused on nendest mingil määral mõjutatud.



Joonis 4.15 Kandevkihi asfaltsegude veepüsivus koos standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõudega

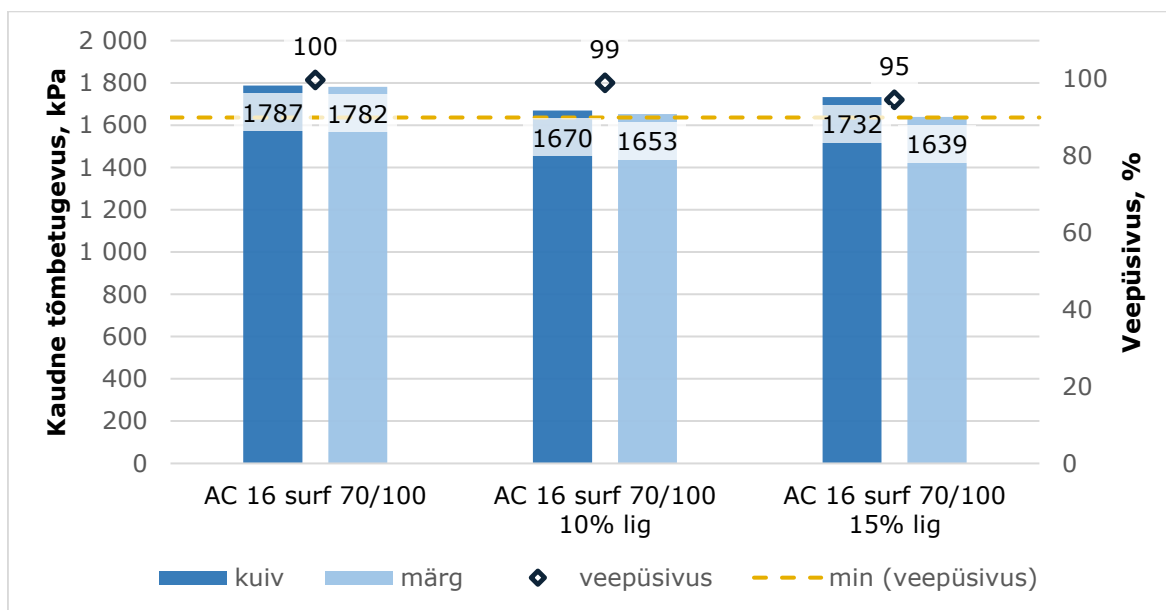


Joonis 4.16 AC 32 base veepüsivuse katsekehade jäätveepüsivused

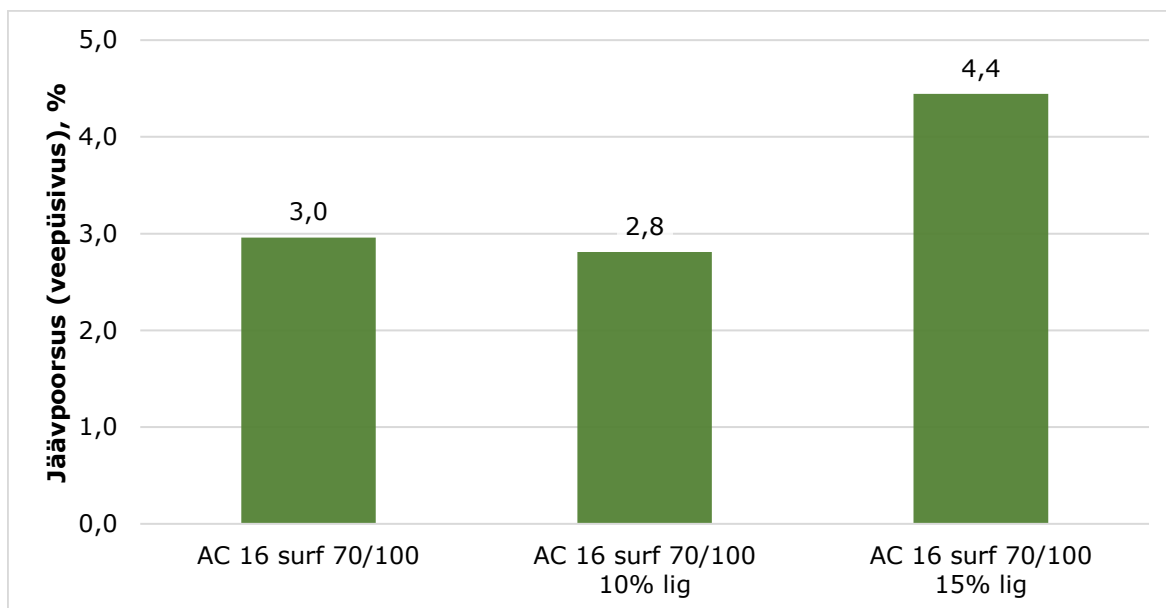
Referentssegu ning 5 ja 10% ligniini sisaldusega kandevkihi segude veepüsivused on vastavalt 89, 93 ja 95% ning kõik tulemused on märkimisväärselt suuremad standardis EVS 901-3:2021 nõutud alampiirist (60%).

AC 32 base segu veepüsivuse tulemustest ilmnes, et ligniini sisalduse kasvuga paranes ka veepüsivuse protsentuaalne näitaja. AC 32 base segude kaudseid tõmbetugevusi võrreldes on näha (vt joonis 4.15), et ligniini sisaldus üle 5% mõjutab mõnevõrra maksimaalset purustusjõudu, mida on vaja proovikehade purustamiseks. Samuti ilmneb, et ligniini 5% sisaldusel on märja grupi proovikehade kaudne tõmbetugevus suurem referentssegu märja grupi kaudsest tõmbetugevusest. Siinkohal on oluline

märkida, et 5% ligniiniga segu veepüsivuse proovikehade jäävpoorsus oli vaadeldud segudest kõige madalam (vt joonis 4.16), vähendades sellega vee ligipääsu proovikehadele. Suurim kuiva ja märja grupi proovide kaudsete tõmbetugevuste erinevus referentssegude tulemustest oli oodatult 10% ligniini sisalduse juures. Selle põhjuseks võib olla asjaolu, et ligniinisalduse kasvades ja bituumeni vähenedes võib segu muutuda kuivemaks ning raskemini töödeldavaks, muutes sellega katsekehad poorsemaks ning seetõttu väiksematel koormustel purustatavaks.



Joonis 4.17 AC 16 surf segude veepüsivus koos standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud miinimumnõuetega

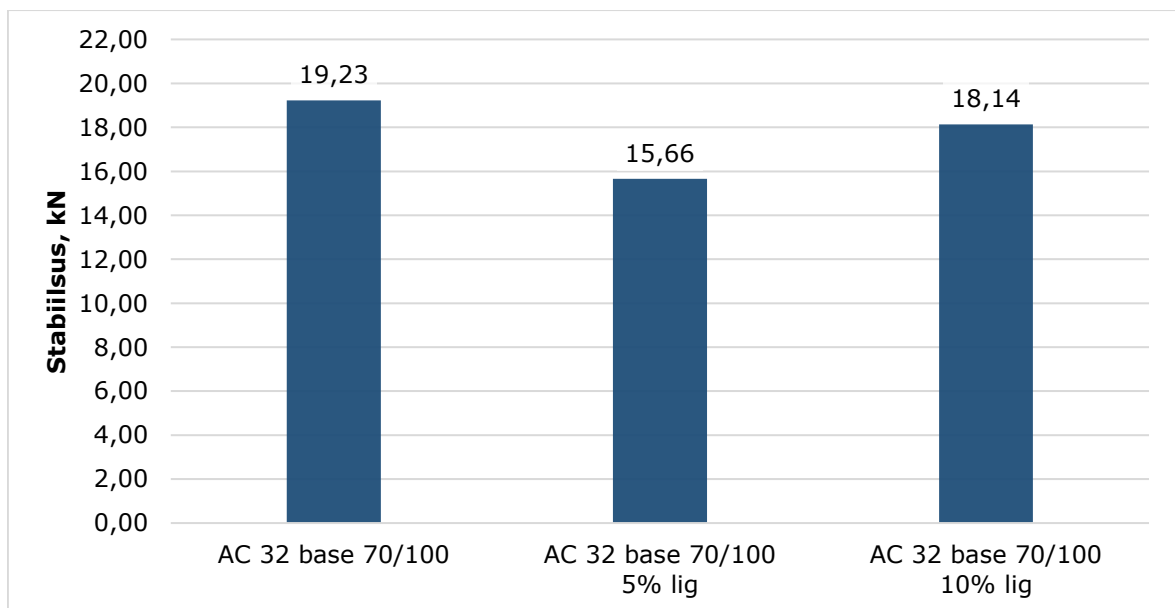


Joonis 4.18 AC 16 surf veepüsivuse katsekehade jäävpoorsused

AC 16 surf segude veepüsivuse ja kaudse tõmbetugevuse tulemused on kirjeldatud joonisel 4.17. Referentssegul ning 10 ja 15% ligniini sisaldusega segudel on veepüsivus vastavalt 100, 99 ja 95% ning tulemused vastavad standardis EVS 901-3:2021 nõutud alampiirile (90%). Referentssegu ja 10% segu veepüsivuse tulemused on sisuliselt võrdsed, kuid ligniiniga segu kuiva ja märja grupi kaudsed tõmbetugevused on mõnevõrra väiksemad. 15% ligniiniga segu veepüsivus on küll referentssegust viie ühiku võrra madalam, kuid selle kuiva proovikehade grupi kaudne tõmbetugevus on suurem kui 10% ligniiniga segul ning sarnane referentssegu tulemusega. Analoogselt AC 32 base segule on ka joonistel 4.17 ja 4.18 tulemustes näha seost kehade jäävpoorsuste ja veepüsivuse ning kaudsete tõmbetugevuste tulemuste vahel.

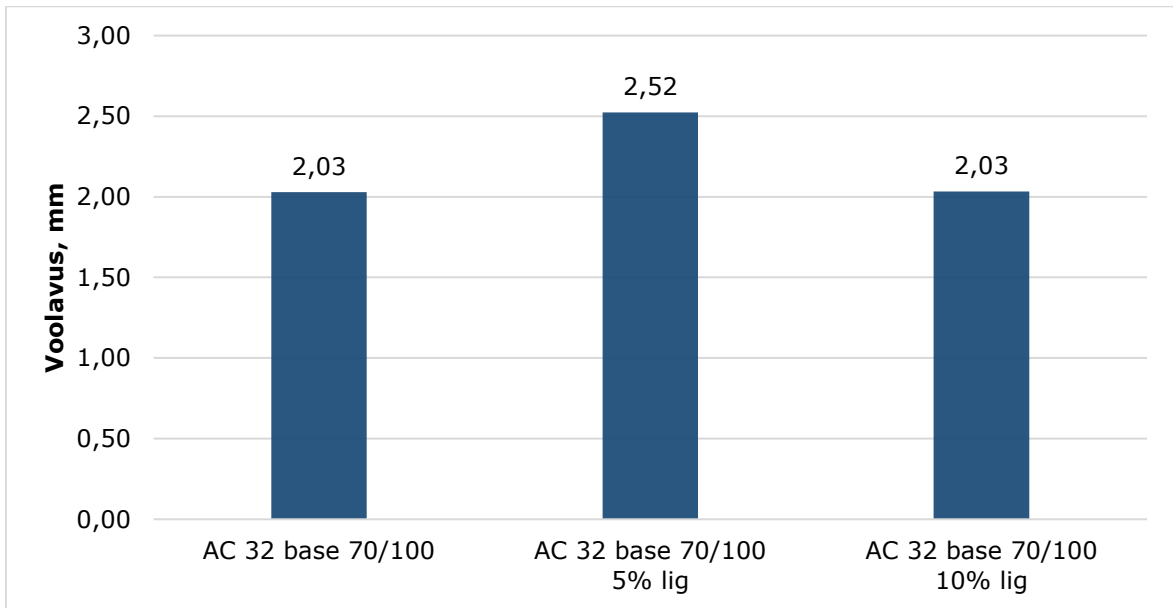
4.2.5 Marshalli stabiilsus ja voolavus

Eestis puuduvad Marshalli stabiilsuse ja voolavuse nõuded, kuid need omadused annavad head informatsiooni asfaltsegu käitumisest kõrgetel teekatte temperatuuridel (60°C). Marshalli stabiilsus ja voolavus võimaldavad kaudselt hinnata asfaltsegu deformatsiooniga seonduvaid omadusi viidatud temperatuuril. [63]



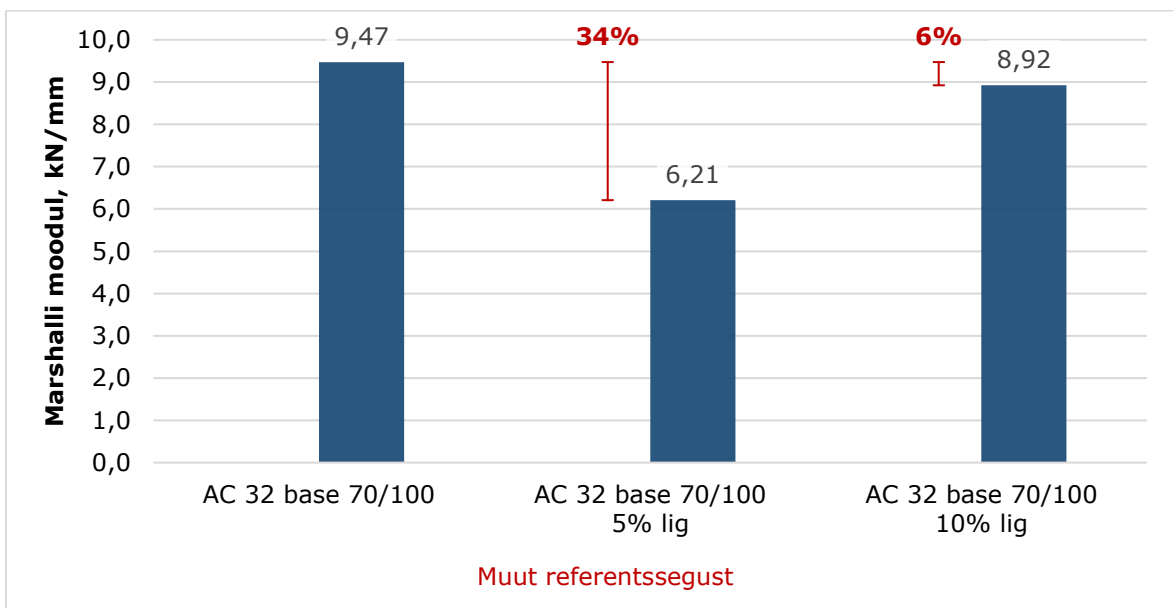
Joonis 4.19 Kandevkihi asfaltsegude stabiilsus

Jooniselt 4.19 selgub, et AC 32 base ligniiniga modifitseeritud asfaltsegude Marshalli stabiilsused on referentssegu tulemusest väiksemad. Madalaim stabiilsus oli 5% ligniiniga segul, mille tulemus oli referentsist 19% võrra väiksem. 10%se ligniinisaldusega segu tulemuste erinevus referentssegust oli kõigest 6%. 5% ligniiniga segu tulemuse erinevust referentssegust ja 10%sest segust võib seletada selle väiksema jäävpoorsusega (vt joonis 4.13).



Joonis 4.20 Kandevkihi asfaltsegude voolavus

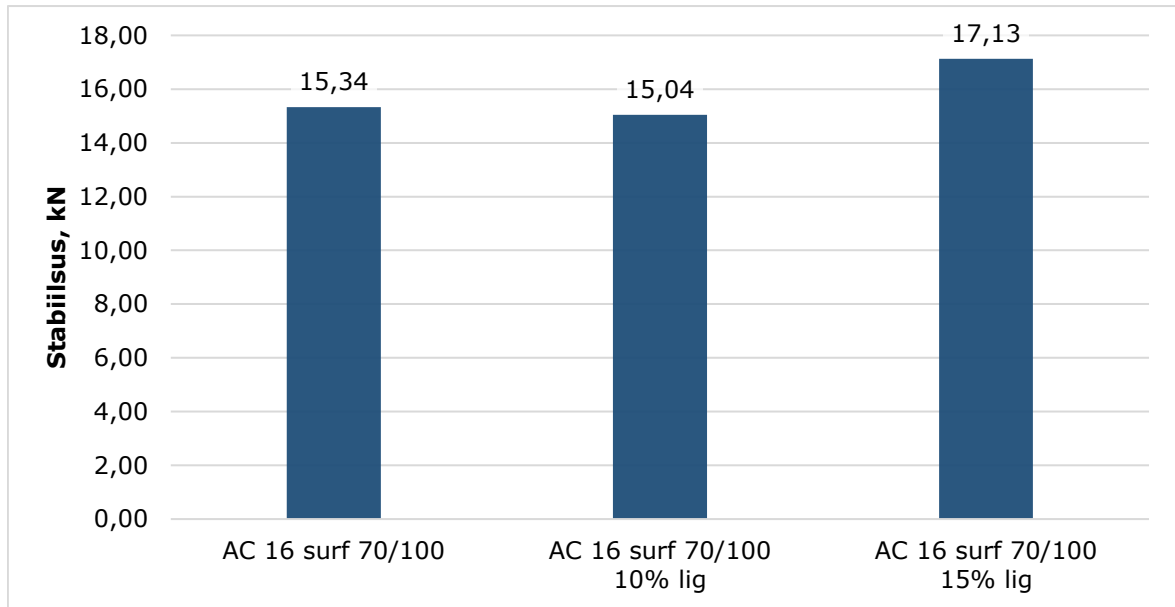
Referentssegu ja 10% ligniiniga segu voolavus on 2,03 mm, ehk identsed ning 5% ligniiniga segu voolavus on neis 24% võrra suurem. Sarnaselt stabiilsuse tulemustele on ka joonisel 4.20 oleva 5% ligniini sisaldusega segu voolavuse erinevus referentssegust ja 10% ligniini segust seletatav selle madalama jäävpoorsusega.



Joonis 4.21 Kandevkihi asfaltsegude Marshalli moodul

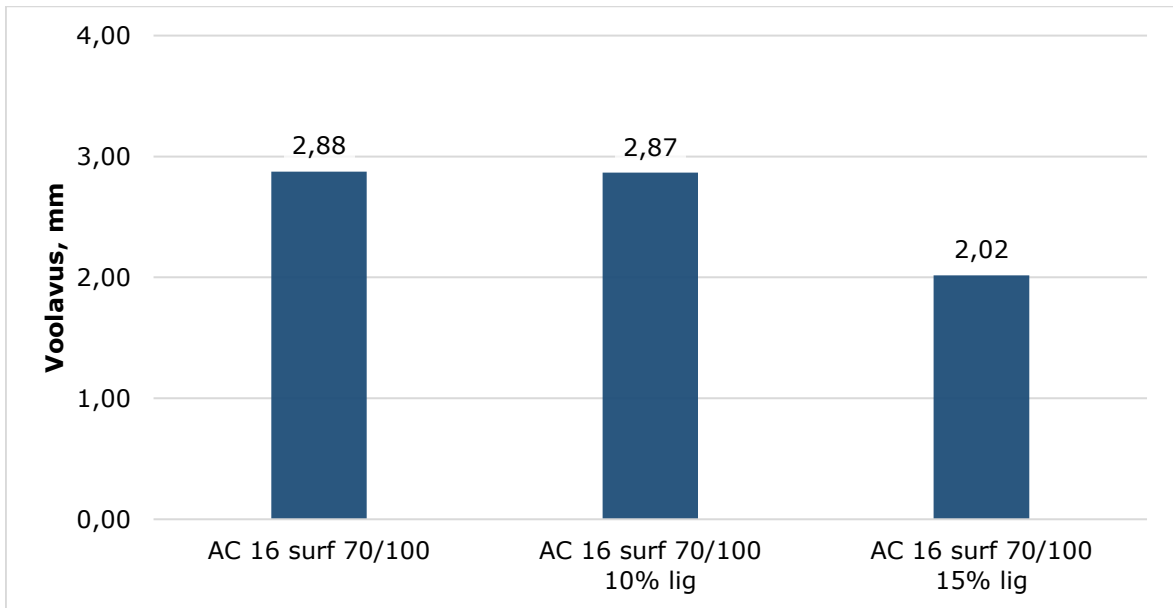
Marshalli moodul on stabiilsuse ja voolavuse suhe ning on segu jäikusega seonduv parameeter. Mida suurem on Marshalli suhe, seda suurem on ka asfaltsegu jäikus. Jooniselt 4.21 selgub, et tulenedes selle väikseimast Marshalli stabiilsusest ja suurimast voolavusest, on 5% ligniiniga segu Marshalli moodul 34% võrra väiksem referentssegust. Samuti on joonisel näha, et referentssegu ja 10% ligniinisaldusega

segu Marshalli moodulite erinevus on 6% ning, et segudest jäigim on referentssegu. Selline tulemus võib olla seletatav sellega, et kuigi ligniini lisamisel muutuvad segud mõnevõrra jäigemaks, on siinsete segude summaarne sideaine sisaldus doseeritavast oluliselt suurem, mistõttu ligniini mõju ei pruugi kajastuda nendes nii märgatavalt kui 15% ligniiniga AC 16 surf segus.



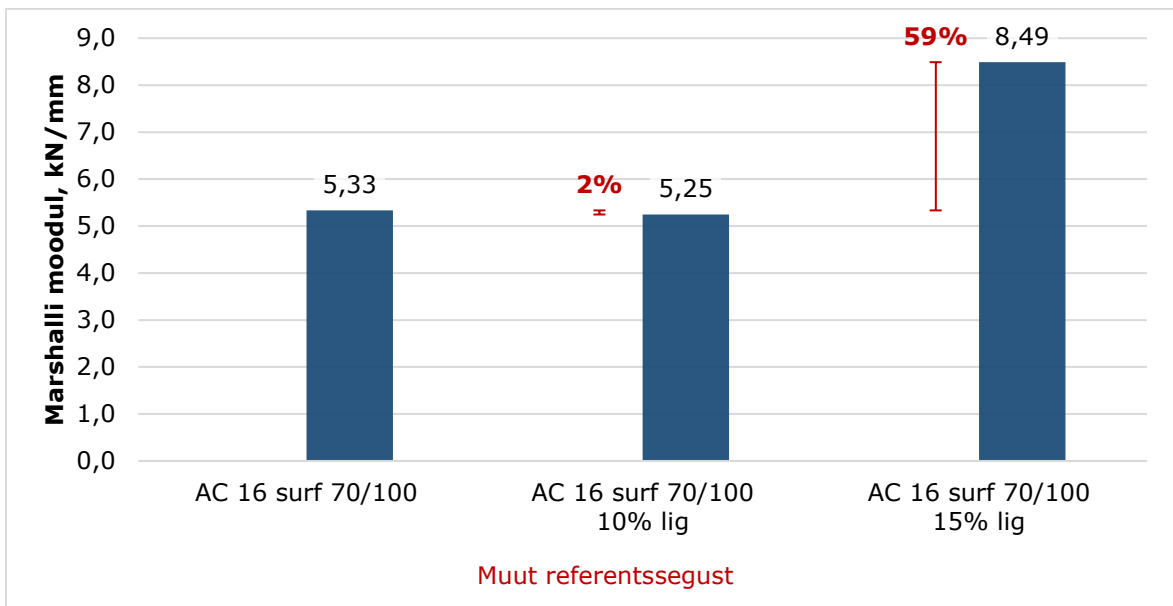
Joonis 4.22 Kulumiskihi asfaltsegude stabiilsus

AC 16 surf segude Marshalli stabiilsused on välja toodud joonisel 4.22. Referentssegu ja 10% ligniiniga segu Marshalli stabiilsuse tulemuste erinevust on peaaegu olematu, vastavalt 15,34 ja 15,04 kN ning on seletatav nende segude sarnase jäävpoorsusega. 15% ligniinisisaldusega segu stabiilsus on 17,13 kN ehk 12% võrra kõrgem referentssegust.



Joonis 4.23 Kulumiskihi asfaltsegude voolavus

Sarnaselt stabiilsuse tulemustele on joonisel 4.23 olevad AC 16 surf referentsegu ja 10% ligniiniga segu voolavuse tulemused sisuliselt võrdsed. 15%se ligniinisaldusega segu voolavus on 2,02 mm, mis on referentssegust 0,86 mm ehk 30% võrra väiksem.



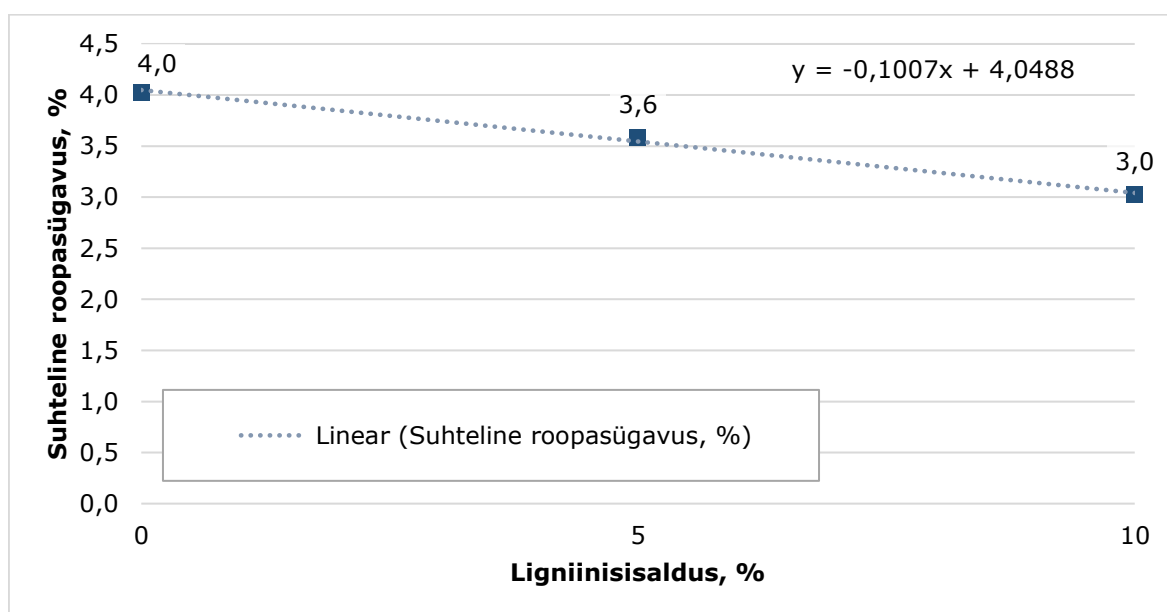
Joonis 4.24 Kulumiskihi asfaltsegude Marshalli moodul

Joonisel 4.24 on näha, et 15% ligniinisalduse segu Marshalli suhe on 59% võrra suurem referentssegu ja 10% ligniiniga segu suhtest. Seega on 15% ligniiniga segu teistest oluliselt jäigem. Selline tulemus on seletatav nii 15% segu väiksema bituumeni sisaldusega kui ka ligniini jäigastava mõjuga bituumenile. Samuti on saadud tulemus seoses ka deformatsioonikindluse tulemustega, mida käsitletakse jaotises 4.2.6.

4.2.6 Deformatsioonikindlus

Roobaste teket kattes mõjutavad ilmastik, liikluskoormus ja -sagedus ning asfaltkattes kasutatavate materjalide ja asfaltkatte enda omadused. Kuna roobaste teke mõjutab liiklusohutust ja katte eluiga on segude projekteerimisel oluline arvestada segude deformatsioonikindlusega. [64] Eestis hinnatakse asfaltsegu deformatsioonikindlust rattarööpa katse abil, mille käigus mõõdetakse koormatud ratta korduvaläbikute tõttu proovikehas tekkinud roobas. Standardis EVS 901-3:2021 on määratud olenevalt liiklussagedustest asfaltsegude maksimaalsed suhtelised jäljesügavused. [53]

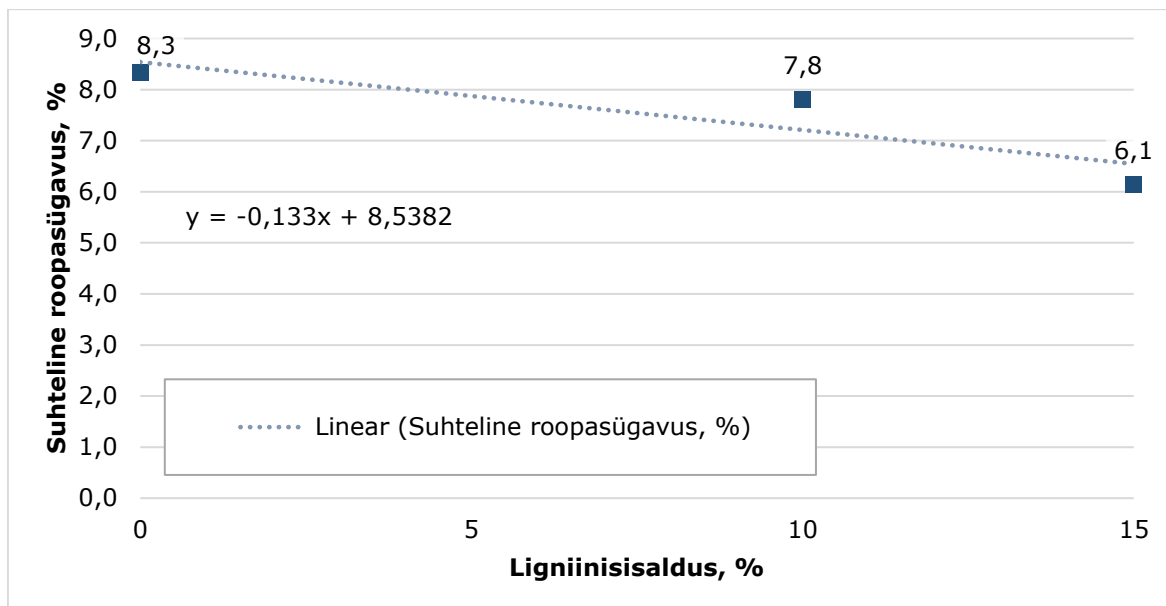
Rattarööpa katse tulemused on esitatud joonistel 4.25 ja 4.26.



Joonis 4.25 AC 32 base segude suhteline roopasügavus

Joonisel 4.25 on välja toodud AC 32 base segude rattarööpa katse tulemused, mis on väljendatud katse käigus tekkinud jäljesügavuse ja proovikeha paksuse suhtena. Referentssegul, 5 ja 10% ligniiniga segude suhtelised roopasügavused on vastavalt 4,0, 3,6 ja 3,0%. 10% ligniiniga segu suhteline roopasügavus on 25% võrra väiksem referentssegust, 5% ligniinisaldusega segul on erinevus referentsist 11%. Seega on tuvastatav, et ligniini kasutamine asfaltsegudes muudab need deformatsioonikindlamaks, kusjuures suurem ligniini kogus annab paremaid tulemusi. Tulemusi saab seletada sellega, et ligniini lisamine asfaltsegule muudab seda jäigemaks ning seetõttu ka kõrgendatud temperatuuridel raskemini deformeeruvaks. Samuti on AC 32 base tulemusi vaadates näha, et kuigi bituumenisisaldus on kõrgem ja jäävpoorsus madalam kui referentssegul, ei mõjutanud see 10% ligniiniga segu deformatsioonikindlust negatiivselt, kuigi tavasegu puhul võib suurem sideaine sisaldus

põhjustada deformatsioonikindluse vähenemist. Seega on siin näha ka ligniini jäigastav mõju segule.



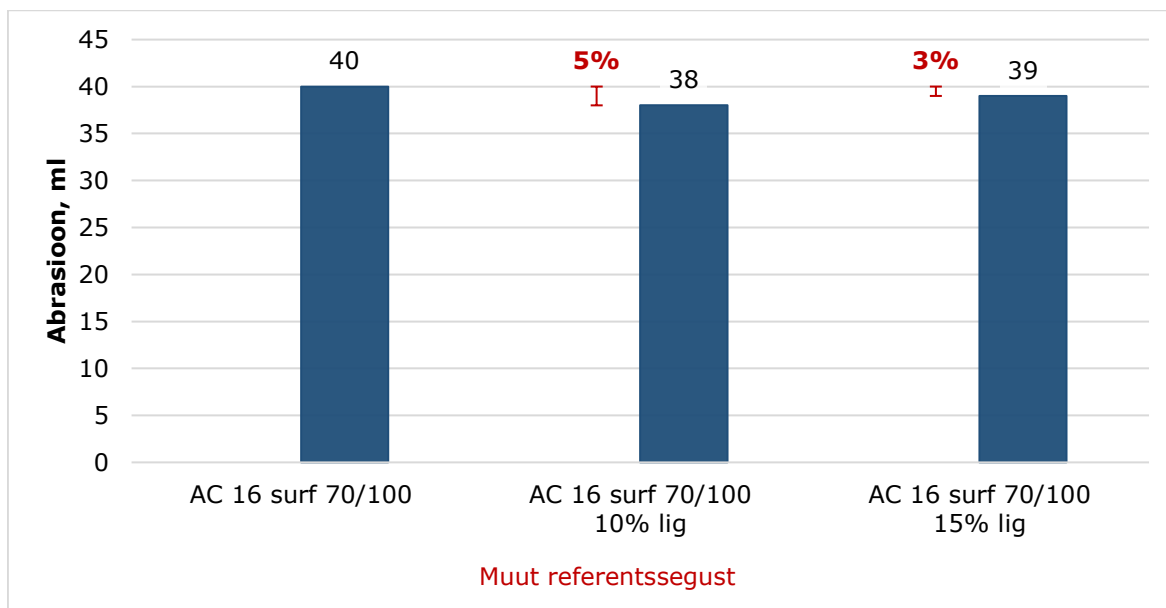
Joonis 4.26 AC 16 surf segude suhteline roopasügavus

Jooniselt 4.26 selgub, et referentssegu ja 10% ligniiniga AC 16 surf suhtelised roopasügavused on võrdlemisi sarnased (8,3 ja 7,8%). 15% ligniinisaldusega segul on suhteline jäljesügavus aga 6,1%, mis on referentssegust 26% võrra madalam.

Kui vaadata joonistel 4.25 ja 4.26 olevaid trendijooni on näha selge lineaarne kahanemistrend ligniinisalduse suurenemise ja suhtelise roopasügavuse kahanemise vahel. Nende abil saaks arvutada ligikaudseid tulemusi suuremate ligniinisalduste juures, kuid sealjuures tuleb arvestada sellega, et teatud ligniinisaldusest muutub segu liiga kuivaks ja raskesti töödeldavaks ning nake sideaine ja täitematerjali vahel väheneb.

4.2.7 Vastupidavus naastrehvide toimele

Lisaks jaotises 4.2.6 kirjeldatud deformatsioonikindlusele on üks teekatetel ilmnevate pikiroobaste tekkimise põhjuseks ka teekatte kulumine, mis on põhjustatud talvekuudel kasutatavatest naastrehvidest. Sarnaselt deformatsioonikindlusele, on Eestis kehtivas rahvuslikus standardis EVS 901-3:2021 esitatud nõuded abrasiioonile vastavalt segu suurimast teramõõdust ja liikluskoormusest [53].



Joonis 4.27 Kulumiskihi vastupidavus naastrehvide toimele

AC 16 surf segu vastupidavus naastrehvidele on välja toodud joonisel 4.27. 10 ja 15% ligniiniga segude vastupidavus naastrehvide toimele on sisuliselt identne referentsseguga. Kulumiskindluse katse tulemusi hinnates saab öelda, et ligniini mõju asfaltsegu kulumiskindlusele on peaaegu olematu.

4.2.8 Järeldused

Katselõigult võetud seguproovide katseandmetele tuginedes saab järeldada, et uuringusse hõlmatud asendusmäärade korral vastavad peaaegu kõik segude omadused Eestis kehtivatele nõuetele. Ainus nõuetele mittevastav tulemus oli AC 16 surf 15% ligniiniga segu lahustuva sideaine sisaldus, mis oli lubatust väiksem.

Ligniini mõjust asfaltsegude toimivusele saab välja tuua järgneva:

- Asfaltsegude terastikuline koostis ei ole ligniini sisaldusest mõjutatud.
- Lahustuva sideaine kogus ligniini sisaldavates segudes oli suurem kui segudesse doseeritud bituumeni hulk. Tulemus võib olla tingitud ligniini ja bituumeni omavahelisest segunemisest, mille tulemusel osa ligniini muutub koos bituumeniga lahustuvaks.
- Ligniini ja bituumeni omavaheline segunemine võib sõltuda ajavahemikust, mille ajal segu püsib kõrgendatud temperatuuridel (segamine, transport) ning vajaks tulevikus lähemat uurimist.

- Ligniini jäigastav mõju võib muuta segud raskemini töödeldavaks ning seetõttu võivad suuremad ligniini sisaldused suurendada segude jäävpoorsust. See omakorda mõjutab teisi segu toimivuse ja vastupidavusega seotud omadusi.
- Veepüsivuse tulemused ei ole ühesed. AC 32 base puhul veepüsivus paraneb ligniinisalduse suurenemisega, AC 16 surf puhul on tulemus vastupidine. Tulemused on suuresti mõjutatud jäävpoorsusest.
- AC 16 surf 15% ligniiniga segu tulemus näitab, et suurema ligniini sisalduse juures on segu jäigem. AC 32 base puhul sarnast käitumist ei täheldatud.
- Nii AC 16 surf kui ka AC 32 base segud muutuvad ligniinisalduse suurenedes jäigemaks ja deformatsioonikindlamaks.
- Ligniiniil ei ole märkimisväärset mõju AC 16 surf kulumiskindlusele.

Kui katsetootmisel selgus, et AC 32 base segude korral oleks maksimaalne bituumeni asendusmäär 10% ja AC 16 surf segude korral kuni 15%, siis katselõigu andmetele tuginedes saaks ligniini sisaldust tõsta nendest piiridest mõnevõrra kõrgemaks. Siinjuures tuleb arvestada ligniini lisamisega kaasneva segu võimaliku jäigenemisega, mis võib hakata mõjutama segu töödeldavust, omadusi ja seeläbi ka vastupidavust.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti bituumeni asendamise võimalusi asfaltsegudes. Eelkõige keskenduti ligniinile, mis on taime rakukestades esinev biopolümeer.

Lõputöös anti ülevaade ligniini olemusest ning selle erinevatest tootmisviisidest. Samuti tehti kokkuvõtte teaduskirjanduses olevatest tulemustest, mis puudutasid ligniini mõju bituumeni reoloogilistele omadustele. Lühemalt kirjutati ka teistes riikides paigaldatud katselõikusid ning nende tulemusi.

Hindamaks ligniini mõju asfaltsegudele rajati Eestis katselõik, kus osa bituumenist oli asendatud ligniiniga. Eesmärgiks oli hinnata asfaltsegude omadusi ning nende vastavust Eestis kehtivale rahvusliku standardi EVS 901-3:2021 nõuetele. Katselõigule eelnevalt tehti katsetootmine, mille tulemuste põhjal määrati suurim ligniinisaldus, mille juures asfaltsegud vastavad neile seatud nõuetele. Katselõigu ehituseks kasutati nelja ligniiniga segu ning kahte referentssegu. Asfaltsegudele määrati laboratoorselt terastikuline koostis ja sideaine sisaldus, poorsusomadused, veepüsivus, Marshalli voolavus ja stabiilsus, deformatsioonikindlus ning kulumiskindlus. Katsetamise käigus selgus, et AC 32 base ja AC 16 surf ligniiniga segude tulemused olid lubatud piirides ning tulevikus oleks võimalik lisatavat ligniini kogust suurendada. Sealjuures tuleb meeles pidada, et ligniini jäigastav mõju võib mõjutada segu töödeldavust ning sellega ka segu omadusi ja vastupidavust.

Autori ettepanekud järgnevateks uuringuteks on järgnevad:

- Uurida käesolevas töös kasutatud ligniini mõju bituumeni pikaajalisele vastupidavusele.
- Teha perioodilisi katselõigu kontrole, et näha, kuidas see ilmastikule ning liikluskoormusele vastu peab.
- Uurida ligniini ja bituumeni omavahelist käitumist kõrgetel, segamise ja transpordiga seonduvatel temperatuuridel tuvastamaks selle mõju bituumeniga segunemisele.
- Uurida ligniini mõju SMA segudele, kuna nende bituumenisisaldus on kõrgeim, asendusmäär teoreetiliselt suurem ning ligniini jäigastav ja bituumeni vananemist aeglustav mõju bituumenile võib positiivselt mõjuda teekatte vastupidavusele.

SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to investigate the possibility of replacement of bitumen in asphalt concrete mixtures. In particular, the focus was on lignin, a biopolymer present in plant cell walls.

The thesis provided an overview on the nature of lignin and its different production methods. The effect of lignin on the rheological properties of bitumen were summarized based on findings of the scientific literature. A brief overview of the test sections installed in other countries, as well as their results, was also made.

In order to assess the effect of lignin on asphalt concrete, a test section was constructed in Estonia, where some of the bitumen had been replaced by lignin. The aim was to evaluate properties of asphalt mixtures and their compliance with the requirements of the national standard EVS 901-3:2021 valid in Estonia. A test production was carried out before the construction of the test strips to determine the highest lignin content at which the asphalt mixtures meet the requirements set for them. Four mixtures with lignin and two reference mixtures were used to construct the test section. Determination of particle size distribution, soluble binder content, void characteristics, water sensitivity, Marshall stability and flow, susceptibility to deform under load and abrasion by studded tyres were carried out in laboratory. Based on the results obtained from the laboratory tests, it is feasible to use lignin as bitumen substitute in AC 32 base and AC 16 surf mixtures because all test results were in acceptable limits. In the future it would be possible to increase the amount of lignin used as substitute of bitumen. Nevertheless, the stiffening effect of lignin may affect the workability of the mixture, and therefore its properties and durability.

The author's suggestions for the following research activities are as follows:

- Research the effect of lignin used in this study on the long-term ageing of bitumen.
- Carry out periodic test strip checks to see how it can withstand the weather and traffic loads.
- Study the interaction between lignin and bitumen at high, mixing and transport-related temperatures to detect its effect on mixing with bitumen.
- Study the effects of lignin on SMA mixtures due to their highest bitumen content therefore theoretically highest substitution rates, because lignin's stiffening and

anti-ageing effect on bitumen may have a positive effect on asphalt concrete durability.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E. A. P. Association, „Asphalt in Figures,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>. [Kasutatud 29. 12. 2022].
- [2] R. Toom, „Ülevaade CO2 emissioonidest asfaltsegude tootmisel Eestis ning meetodid emissioonide vähendamiseks sooja asfaltsegu tehnoloogiatega,” magistritöö, Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2022.
- [3] D. van Vliet, T. Slaghek, C. Giezen and I. Haaksman, „Lignin as a green alternative for bitumen,” *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2016.
- [4] M. Audo et al, „Subcritical Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Residues as a Green Route to Alternative Road Binders,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 583-590, 2015.
- [5] N. Su, F. Xiao, J. Wang, L. Cong and S. Amirhanian, „Productions and applications of bio-asphalts – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 183, pp. 578-591, 2018.
- [6] R. Saha, R. S. Melaku, B. Karki, A. Berg and D. S. Gedafa, „Effect of Bio-Oils on Binder and Mix Properties with High RAP Binder Content,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 3, 2020.
- [7] G. White, „A Synthesis on the Effects of Two Commercial Recycled Plastics on the Properties of Bitumen and Asphalt,” *Pavement Design, Analysis and Material Characterization*, vol. 12, no. 20, p. 8594, 2020.
- [8] C.-T. Chiu and L.-C. Lu, „A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 1027-1033, 2007.
- [9] G. Al-Khateeb and K. Z. Ramadan, „Investigation of the Effect of Rubber on Rheological Properties,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 127-135, 2015.
- [10] K. Sobolev, I. F. Vivian, R. Saha, N. M. Wasiuddin (Wasi) and N. E. Saltibus, „The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials,” *Fuel*, vol. 116, pp. 471-477, 2014.
- [11] J. Kukebal, „Asfaltsegudes sisalduva bituumensideaine asendamise ligniiniga,” magistritöö, Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2022.
- [12] C. Xu, D. Wang, S. Zhang, E. Guo, H. Luo, Z. Zhang and H. Yu, „Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture,” *Polymers*, vol. 13, no. 7, p. 1083, 2021.
- [13] D. Kai, M. J. Tan, P. L. Chee, Y. K. Chua, Y. L. Yap and X. J. Loh, „Towards lignin-based functional materials in a sustainable world,” *Green chemistry: an international journal and green chemistry resource: GC*, vol. 18, no. 5, p. 1175–12, 2016.
- [14] T. Saito et al, „Turning renewable resources into value-added polymer: Development of lignin-based thermoplastic,” *Green chemistry: an international journal and green chemistry resource: GC*, vol. 14, no. 12, p. 3295–3303, 2012.
- [15] D. Watkins, M. Nuruddin, M. Hosur, A. Tcherbi-Narteh and S. Jeelani, „Extraction and characterization of lignin from different biomass resources,” *Journal of materials research and technology*, vol. 4, no. 1, pp. 26-32, 2015.
- [16] S. H. Ghaffar and M. Fan, „Lignin in straw and its applications as an adhesive,” *International journal of adhesion and adhesives*, vol. 48, pp. 92-101, 2014.
- [17] I. P. Pérez, A. M. R. Pasandín, J. C. Pais and P. A. A. Pereira, „Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 87-98, 2019.
- [18] S. Mastrolitti et al, „Sustainable lignin valorization. Technical lignin, processes and market development,” IEA Bioenergy, 2021.

- [19] R. J. A. Gosselink, "Lignin as a renewable aromatic resource for the chemical industry," doktoridissertatsioon, Wageningen Ülikool, Wageningen, Holland, 2011.
- [20] S. K. Singh and P. L. Dhepe, "Isolation of lignin by organosolv process from different varieties of rice husk: Understanding their physical and chemical properties," *Bioresource technology*, vol. 221, p. 310–317, 2016.
- [21] S. Constant et al, "New insights into the structure and composition of technical lignins: A comparative characterisation study," *Green chemistry : an international journal and green chemistry resource : GC*, vol. 18, no. 9, p. 2651–2665, 2016.
- [22] R. P. Wool, "16 - LIGNIN POLYMERS AND COMPOSITES," *Bio-Based Polymers and Composites*, pp. 551-598, 2005.
- [23] W. O. S. Doherty, P. Mousavioun and C. M. Fellows, "Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers," *Industrial Crops and Products*, vol. 33, no. 2, pp. 259-276, 2011.
- [24] L. A. Zevallos Torres et al, "Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review," *Journal of cleaner production*, vol. 263, p. 121499, 2020.
- [25] S. Laurichesse and L. Avérous, "Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers," *Progress in Polymer Science*, vol. 39, no. 7, pp. 1266-1290, 2014.
- [26] Z. Sun, B. Fridrich, A. de Santi, S. Elangovan and K. Barta, "Bright Side of Lignin Depolymerization: Toward New Platform," *Chemical Reviews*, vol. 118, no. 2, pp. 614-678, 2018.
- [27] N. E. E. Mansouri and J. Salvadó, "Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins," *Industrial crops and products*, vol. 24, no. 1, pp. 8-16, 2006.
- [28] E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu and F. Canestrari, "Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin," *Materials and Structures*, vol. 55, p. 221, 2022.
- [29] "Evaluation of wood lignin as a substitute or extender of asphalt," Federal Highway Administration, Oct. 1980.
- [30] J. Zhu, X. Lu, M. Langfjell and A. Gudmarsson, "Quantitative relationship of fundamental rheological properties of bitumen with the empirical Ring and Ball softening point," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, pp. S345-S364, 2021.
- [31] S. D. Asukar, A. Behl and P. J. Gundaliya, "Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder," *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY*, vol. 2, no. 12, pp. 198-207, 2016.
- [32] S. Kalampokis, M. Papamoschou, D. M. Kalama, C. P. Pappa, E. Manthos and K. S. Triantafyllidis, "Investigation of the Characteristic Properties of Lignin-Modified Bitumen," *CivilEng*, vol. 3, no. 3, pp. 734-747, 2022.
- [33] J. Wu, Q. Liu, C. Wang, W. Wu and W. Han, "Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements," *Journal of Cleaner Production*, no. 124663, p. 283, 2021.
- [34] E. Norgbey et al, "Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads," *Construction and Building Materials*, vol. 230, p. 116957, 2020.
- [35] M. Zahedi, A. Zarei, M. Zarei and O. Janmohammadi, "Experimental determination of the optimum percentage of asphalt mixtures reinforced with Lignin," *SN Applied Sciences*, vol. 2, 2020.

- [36] G. Xu, H. Wang and H. Zhu, "Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin," *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp. 801-808, 2017.
- [37] M. Fakhri and M. A. Norouzi, "Rheological and ageing properties of asphalt bio-binders containing lignin and waste engine oil," *Construction and Building Materials*, vol. 321, p. 126364, 2022.
- [38] K. B. Batista et al, "High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders," *Industrial Crops and Products*, vol. 111, pp. 107-166, 2018.
- [39] A. H. Bradley, "Development of Lignin-modified Asphalt for Use in Canada," in *Innovations in Roadway/Embankment Materials and Geotechnical Engineering Session*, 2021.
- [40] D. Lesueur, "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 145, no. 1-2, pp. 42-82, 2009.
- [41] N. S. McCready and R. C. Williams, "Utilization of Biofuel Coproducts as Performance Enhancers in Asphalt Binder," *Transportation Research Record*, vol. 2051, no. 1, pp. 8-14.
- [42] J. Yu, M. Vaidya, G. Su, S. Adhikari, E. Korolev and S. Shekhovtsova, "Experimental study of soda lignin powder as an asphalt modifier for a sustainable pavement material," *Construction and Building Materials*, vol. 298, p. 123884, 2021.
- [43] R. Zhang et al, "Lignin structure defines the properties of asphalt binder as a modifier," *Construction and Building Materials*, vol. 310, p. 125156, 2021.
- [44] M. Junginger et al, "CHAPLIN XL Openbaar eindrapport 2022," The Netherlands, 2022.
- [45] S. Lender, „International Tree Mix," [Võrgumaterjal]. Available: <https://theasphaltpro.com/articles/international-tree-mix/>. [Kasutatud 28. 12. 2022].
- [46] Fibenol, „LignovaTM," [Võrgumaterjal]. Available: https://fibenol.com/uploads/Fibenol_LIGNOVA_TDS_2022-08-23.pdf. [Kasutatud 21.11.2022].
- [47] *EVS-EN 12697-27:2017 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 27: Proovivõtmine.*
- [48] *EVS-EN 12697-1:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus.*
- [49] *EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine.*
- [50] *EVS-EN 12697-30:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga.*
- [51] *EVS-EN 12697-31:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 31: Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega.*
- [52] *EVS-EN 12697-35:2016 Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing.*
- [53] *EVS 901-3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud.*
- [54] *EVS-EN 12697-5:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine.*
- [55] *EVS-EN 12697-6:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine.*
- [56] *EVS-EN 12697-8:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine.*
- [57] *EVS-EN 12697-12:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine.*

- [58] *EVS-EN 12697-16:2016 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 16: Vastupidavus naastrehvide toimele.*
- [59] *EVS-EN 12697-34:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 34: Marshalli katse.*
- [60] *EVS-EN 12697-33:2019+A1:2022 Bituminous mixtures - Test method - Part 33: Specimen prepared by roller compactor.*
- [61] *EVS-EN 12697-22:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 22: Rattaroopa katse.*
- [62] R. N. Hunter, A. Self and J. Read, *The Shell Bitumen Handbook (6th Edition)*, Shell International Petroleum Company Ltd, 2015.
- [63] *EVS 901-3:2009 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud.*
- [64] D. Luo et al, "The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 377-387, 2019.