

## **RINGLUSSVÕETUD ASFALDI SIDEAINE ELAVDAMINE REJUVENAATORITEGA AC 20 SURF SEGU NÄITEL**

### **REVITALISATION OF RECLAIMED ASPHALT BINDER WITH REJUVENATORS AS AN EXAMPLE OF AC 20 SURF MIXTURE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Helen Rand

Üliõpilaskood: 211615EAXM

Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant

Kaasjuhendaja: Sven Sillamäe, projektijuht

Tallinn 2023

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Helen Rand

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ringlussevõetud asfaldi sideaine elavdamine rejuvenaatoritega AC 20 surf segu näitel“, mille juhendajad on Kristjan Lill ja Sven Sillamäe,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> 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:** Helen Rand, 211615EAXM

Õppekava, peeriala: EAXM15/18 - Hooned ja rajatised

Juhendajad: Kristjan Lill, doktorant +372 5302 2437

Sven Sillamäe, projektijuht +372 5302 5265

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ringlussevõetud asfaldi sideaine elavdamine rejuvenaatoritega AC 20 surf segu näitel

(inglise keeles) Revitalisation of reclaimed asphalt binder with rejuvenators as an example of AC 20 surf mixture

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Urvida rejuvenaatorite mõju vananenud bituumensideainele
2. Anda ülevaade rejuvenaatorite toimemehhanismidest ja liigitamisest
3. Leida rejuvenaatoritele optimaalne doseerimiskogus
4. Hinnata rejuvenaatorite mõju AC 20 surf segu põhjal

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teaduskirjanduse läbi töötamine	31.03.2023
2.	Sobivate rejuvenaatorite välja valimine	15.04.2023
3.	Teooria kirjutamine	23.04.2023
4.	Laboratoorne katsetamine	05.05.2023
5.	75% tööst valmis, lõputööde kaitsmiseelne läbivaatus	02.05.2023
6.	Katsetulemuste analüüs	14.05.2023
7.	Töö on valmis ning esitatakse retsensendile	26.05.2023

**Töö keel:** eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 29.05.2023 a

**Üliõpilane:** Helen Rand ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

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

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

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

# SISUKORD

EESSÕNA .....	9
1 SISSEJUHATUS.....	10
2 TEOREETILISED ALUSED .....	12
2.1 Rejuvenaatorite kasutamine.....	12
2.2 Bituumeni vananemisprotsess .....	12
2.3 Rejuvenaatorite kasutust reguleerivad standardid ja normid Eestis .....	14
2.4 Lähiriikide praktika rejuvenaatoritega.....	14
2.4.1 Soome .....	14
2.4.2 Norra.....	15
2.4.3 Rootsi .....	17
3 REJUVENAATORID .....	19
3.1 Rejuvenaatorite toimimismehhanism .....	19
3.2 Liigitamine .....	20
3.3 Naftast saadud aromaatsed ekstraktid ja nafteenõlid.....	21
3.3.1 Päritolu ja tootmisprotsess .....	21
3.3.2 Keemiline koostis .....	21
3.3.3 Ohutus ning keskkonnamõjud .....	21
3.4 Jäätmeõlid: Taaskasutatud masinaõlid.....	22
3.4.1 Päritolu ja tootmisprotsess .....	22
3.4.2 Keemiline koostis .....	22
3.4.3 Ohutus ning keskkonnamõjud .....	22
3.5 Ringlussevõetud toiduõlijäätmed (taimse või loomse päritoluga õlid ja rasvad)	23
3.5.1 Päritolu ja tootmisprotsess .....	23
3.5.2 Keemiline koostis .....	23
3.5.3 Ohutus ja keskkonnamõjud .....	23

3.6	Taimsed õlid põllumajandusest .....	24
3.6.1	Päritolu ning tootmisprotsess .....	24
3.6.2	Toimemehhanism .....	24
3.7	Biopõhised tehisõlid .....	24
3.7.1	Päritolu ja tootmisprotsess .....	24
3.7.2	Ohutus ja keskkonnamõjud .....	24
3.8	Mitmed spetsiaalselt loodud lisandid .....	25
3.8.1	Päritolu ja tootmisprotsess .....	25
3.8.2	Keemiline koostis .....	25
3.8.3	Toimemehhanism .....	25
3.8.4	Ohutus- ja keskkonnaprobleemid .....	25
3.9	Sobiva rejuvenaatori valimine .....	26
3.10	Optimaalne rejuvenaatori doseerimiskogus .....	26
3.11	Rejuvenaatorite doseerimismeetodid .....	27
3.11.1	Segamismeetod .....	27
3.11.2	Pihustamismeetod .....	28
3.11.3	Rejuvenaatori lisamine kapslite kujul .....	29
3.12	Rejuvenaatorid katsete läbiviimiseks .....	30
3.13	Ringlussevõetud asfaldi päritolu .....	32
4	Laboratoorne katsetamine .....	34
4.1	Katseplaani koostamine .....	34
4.2	Katsestandardid ja meetodid erinevat tüüpi laboratoorsete katsete läbiviimiseks .....	35
4.2.1	Lahustuva sideaine sisalduse ja terastikulise koostise määramine .....	35
4.2.2	Bituumeni eraldamine .....	36

4.2.3 Materjali spetsifikatsiooni määramine ringlussevõetud asfaldi puhul .....	36
4.2.4 Sõelumismeetodiga terastikulise koostise määramine .....	37
4.2.5 Nõelpenetratsiooni määramine.....	37
4.2.6 Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga .....	38
4.2.7 Tera kuju määramine plaatsusteguriga .....	39
4.2.8 Purunemiskindluse määramine.....	39
4.2.9 Terade tiheduse määramine .....	39
4.2.10 Petrograafilise kirjelduse meetod .....	40
4.2.11 Kulumiskindluse määramine; Põhjamaade katse .....	40
4.3 Asfaltsegude katsestandardid ja meetodid .....	41
4.3.1 Laboratoorne katsesegu segamine.....	41
4.3.2 Proovikehade valmistamine lööktihendajaga .....	41
4.3.3 Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega .....	42
4.3.4 Mahumassi määramine .....	43
4.3.5 Erimassi määramine .....	44
4.3.6 Poorsusomaduste määramine .....	44
4.3.7 Veepüsivuse määramine .....	44
4.3.8 Deformatsioonikindluse määramine .....	45
4.3.9 Kulumiskindluse määramine .....	46
4.3.10 Pragunemistugevuse määramine .....	47
4.4 Rejuvenaatoritele doseerimiskoguste määramine.....	48
4.5 Seguretsepti koostamine .....	49
4.6 Katsesegude valmistamine.....	50
4.7 Katsetulemused.....	52
4.7.1 Ringlussevõetud asfaldi täitematerjali ja sideaine katsetamine.....	52

4.7.2 Terastikulise koostise määramise tulemused.....	54
4.7.3 Lahustuva sideaine sisalduse määramise tulemused .....	55
4.7.4 Nõelpenetratsiooni tulemused .....	57
4.7.5 Pehmenemistäpi määramise tulemused .....	58
4.7.6 Erimassi tulemused .....	59
4.7.7 Mahumassi tulemused .....	59
4.7.8 Jäävpoorsuse tulemused .....	60
4.7.9 Veepüsivuse tulemused.....	61
4.7.10 Deformatsioonikindluse tulemused .....	62
4.7.11 Kulumiskindluse tulemused.....	64
4.7.12 Pragunemistugevuse tulemused .....	64
4.8 Järeldused .....	65
4.9 Edasine uurimine .....	66
KOKKUVÕTE .....	68
SUMMARY.....	69
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	70
Lisa 1 AC 20 Surf RA 50% 70/100 seguretsept .....	80
Lisa 2 AC 20 Surf 70/100 seguretsept .....	81



## **EESSÕNA**

Käesolev magistritöö teema on välja pakutud Sven Sillamäe poolt. Lõputöö eesmärgiks oli uurida kolme välja valitud rejuvenaatori mõju ringlussevõetud asfaldis sisalduvale vananenud bituumensideainele. Parema ülevaate saamiseks teostati laboratoorsed katsetused, läbi mille uuriti rejuvenaatorite mõju AC 20 surf segule.

Autor soovib tänada juhendajaid Kristjan Lille ning Sven Sillamäed, kes aitasid kaasa antud lõputöö valmimisele.

Samuti soovib töö autor ära märkida Tallinna Tehnikaülikooli teede- ja liikluslabori, kes teostasid lõputöö raames vajaminevad katsed.

Võtmesõnad: teedehitus, asfalt, rejuvenaator, laboratoorsed katsetused, ringlussevõetud asfalt, AC surf segu, elavdamine, bituumensideaine, magistritöö

# 1 SISSEJUHATUS

Asfalt on maailmas üks enim taaskasutatav materjal ning seda kasutatakse edukalt uutes asfaltkatetes. Ringlussevõetud asfaldi (RA) kasutamine on üheks tõhusaks meetodiks uute asfaldist katete ehitamiskulude vähendamiseks, olles samal ajal kasulik nii majanduslikes kui ka keskkonda puudutavates aspektides.

Eestis on asfaldi taaskasutamiseks mitmeid meetodeid. Asfaldi freesimine toimub enamasti korraga läbistades kõiki katendikihte ning kihiti freesimine pole väga levinud. Sellest tulenevalt saadakse toode, mis sisaldab erinevat tüüpi sideainet, täitematerjale ning muid lisandeid. Sellist materjali kasutatakse edukalt kandev- ja siduvkihi tüüpi segude valmistamisel. Kulumiskihi tüüpi segudes ei ole ringlussevõetava asfaldi kasutamine Transpordiameti poolt Eestis lubatud, kuna tegemist on pealmiste kihtidega, mis on otseselt mõjutatavad keskkonnategurite poolt. Suur osa ringlussevõetud asfaldi kasutatakse ka kompleksstabiliseeritud katendikihtide ehitamises, mis on Eestis laialt levinud. Samuti on ka RA levinud katematerjal madala liiklussagedusega teedel.

Järjest enam on päevakorda kerkinud teemad, kuidas vähendada CO<sub>2</sub> jalajälge ning maksimeerida erinevate toodete ning tooraine taaskasutamist. Sellest tulenevalt on ka üha enam hakatud huvi tundma erinevate sideaine elavdajate ning pehmendajate vastu, mille kasutamine aitaks tõsta RA osakaaluprotsenti asfaltsegudes. Hetkel on RA tugevalt vananenud sideaine elavdamise tavapäraseks meetodiks pehmema bituumeni lisamine. See küll neutraliseerib nii vana bituumeni kõrge viskoossuse kui ka oksüdatsioonist tingitud asfalteenide fraktsiooni suurenenud kontsentratsiooni, kuid see ei ole piisav. Seetõttu on üha enam hakanud kasutust leidma rejuvenaatorid.

Rejuvenaatorid on bituumensideaine elavdajad, mida on alates 1960ndatest kasutatud vanade asfaltkatete taastamiseks. Algselt pihustati toodet teekatte pinnale, mille eesmärgiks oli pidurdada asfaltkatte vananemist. Hiljem on rejuvenaatoreid hakatud kasutama ka asfaltsegude RA taaskasutuse suuremaks võimaldamiseks. [1]

Eesti erinevates lähiriikides, nagu Soomes, Norras ja Rootsis on rejuvenaatorite katsetamise ja kasutamisega juba algust tehtud. Sellest tulenevalt tekkis ka lõputöö teema, et ka Eestis antud valdkonna uurimisega esimesed sammud teha ning anda esmane ülevaade rejuvenaatorite kohta. Selleks tehti eeltööd ning hangiti kolm rejuvenaatorit. Katsesegu tüübiks valiti AC 20 surf segu, kuhu otsustati RA väga headest omadustest tulenevalt lisada 50% ringlussevõetud asfaldi.

Käesoleva lõputöö põhieesmärgiks oli uurida, kuidas on võimalik rejuvenaatoritega vananenud bituumensideainet elavdada. Selleks viidi läbi erinevaid laboratoorseid

katseid. Katsete tulemuste põhjal tehti järeldused, kuidas rejuvenaatorid vananenud sideainet mõjutasid ning mida tuleks edaspidise uurimise käigus silmas pidada.

Töö on jaotatud nelja erinevasse osasse. Töö esimene osa käsitleb rejuvenaatorite kasutamisega seotud aspekte ning bituumeni vananemisprotsessi. Samuti on välja toodud Eesti lähiriikide Soome, Rootsi ja Norra senised kogemused. Teine osa käsitleb põhjalikult rejuvenaatorite olemust, toimemehhanismi, liigitamist ning doseerimismeetodeid. Kolmas osa sisaldab endas sobivate rejuvenaatorite valimisprotsessi, optimaalse doseerimiskoguse leidmist ja seguretseptide koostamist. Neljas osa sisaldab katseplaani koostamist, katsestandardeid, millest katsetamise käigus juhinduti, laboratoorseid katseid, saadud tulemusi ja tulemuste analüüsi.

## **2 TEOREETILISED ALUSED**

### **2.1 Rejuvenaatorite kasutamine**

Ajaga bituumensideaine vananeb ning selle omadused halvnevad. Seetõttu pööratakse just erilist tähelepanu vananenud ja suure viskoossusega bituumeni elavdamisele. [2] Sideaine vananemine tuleneb sellest, et asfaltkate puutub oma eluaja jooksul kokku erinevate füüsikaliste, mehaaniliste kui ka keemiliste mõjudega. Hapnikuga kokkupuutes tekib sideaines oksüdatiivne vananemisprotsess, mille tagajärjeks on suurem rabedus, jäikus ning viskoossus. Bituumensideaine omaduste halvenemine väljendub asfaldis, selle pragunemise, purunemise ja deformeerumisena. [3], [4], [5]

Säästlikul ja ökonoomsel asfaldi tootmises on oluline roll rejuvenaatoritel. Neid kasutatakse vananenud sideaine keemiliste ja füüsikaliste omaduste parandamiseks, eesmärgiga muuta sideaine taas elastseks, parandada bituumeni ja täitematerjali vahelist haardumist, vähendada viskoossust ning taastada vananemise tõttu osaliselt kadunud sideaine omadused. [6]

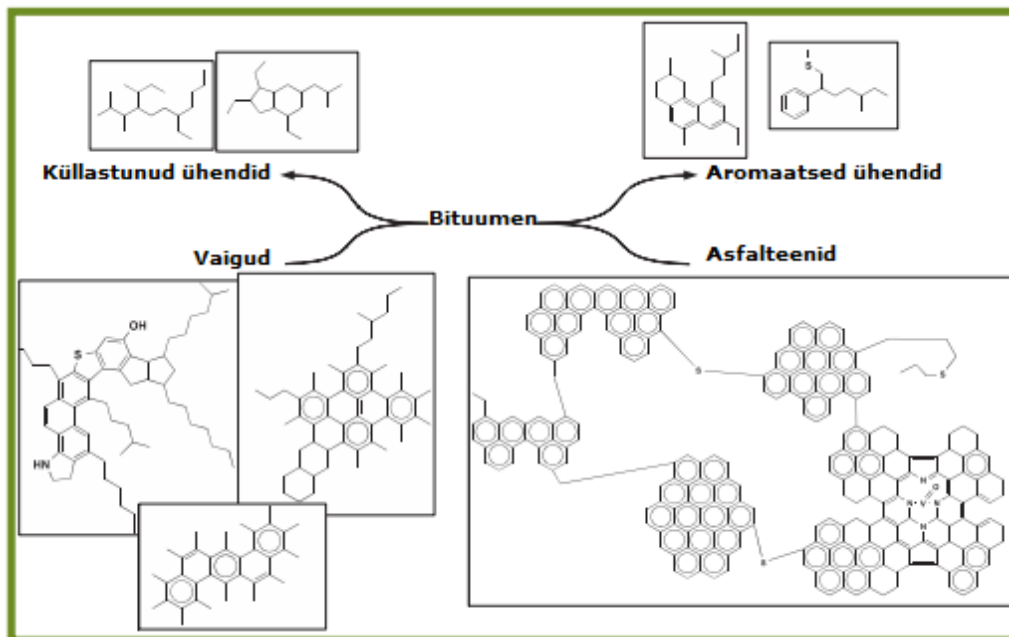
Mida suurem on ringlussevõetud asfaldi osakaal, seda suurem on ka võimalus, et RA vananenud sideaine põhjustab asfaltkattes enneaegset väsimust ning madalatel temperatuuridel pragunemist või lõhenemist. [7], [8], [9] Seega muutub kasvava RA sisalduse korral ka järjest olulisemaks erinevate sideaine lisandite kasutamine [9], [3]. Üheks selliseks lisandiks on rejuvenaatorid, mille kasutamine võib lahendada probleeme, mis RA kasutamisega uutes asfaltsegudes kaasnevad. Rejuvenaatorid vähendavad RA sideaine viskoossust ning parandavad teisi keemilisi ja füüsikalisi omadusi, tänu millele saab ringlussevõetud asfalti edukalt uuesti kasutada. [10], [11]

### **2.2 Bituumeni vananemisprotsess**

Bituumensideaine vananemine koosneb lühi- ja pikaajalisest vananemisprotsessist. Lühiajaline vananemine on oma olemuselt intensiivne ning leiab aset lühikese aja jooksul. See toimub segu tootmisprotsessi ja asfaldi laotamise ajal. Pikaajaline vananemisprotsess on seevastu vähem intensiivsem ja toimub asfaltkate kasutusea jooksul. Pikaajaline vananemine seisneb keemilisel tasandil järk-järgulises sideaine koostise ja omaduste muutumises. [12]

Joonisel 2.1 on kujutatud bituumenit moodustavate osakeste jaotus nelja erinevasse fraktsiooni. Need fraktsioonid moodustavad küllastunud ühendid, vaigud, asfalteenid ja

aromaatsed ühendid [3]. Antud fraktsioonid jagunevad veel omakorda nende polariseeritavuse ja polaarsuse alusel [13].



Joonis 2.1. Bituumeni osakeste fraktsioonidesse jaotumine [3]

Kõllastunud ühendite fraktsioon koosneb mittepolaarsetest osakestest, sealhulgas lineaarsetest, hargnenud ja tsüklilistest kõllastunud süsivesinikest. Aromaatsetest ühenditest koosnev fraktsioon sisaldab ühte või mitut aromaatsset tsüklit ning on veidi polariseeruvam. Seevastu nii vaigude kui ka asfalteenide fraktsioonidel on polaarsed asendajad. Nende kahe fraktsiooni erinevus seisneb selles, et asfalteenid on heptaani või pentaani suhtes lahustumatud. Seevastu vaigude fraktsioon on võimeline heptaani või pentaaniga segunema. [13] Kolm esimest fraktsiooni on tuntud malteenide või malteeni fraktsiooni nimetuse all [3]. Vananemise käigus kaotab bituumen tasakaalu malteeni ning asfalteenide fraktsioonide vahel. See on tingitud malteeni fraktsiooni osakaalu vähenemisest ning asfalteenide fraktsiooni osakaalu suurenemisest bituumenis. [14]

Kõllastunud ühendid on kõige inertsem fraktsioon, mille osakaal vananedes veidi väheneb. Samamoodi väheneb ka aromaatsete ühendite osakaal. Kõllastunud kui ka aromaatsete ühendite osakaalu on võimalik tõsta läbi vananenud bituumenile pehme bituumeni või rejuvenaatorite lisamise. Vaigude puhul on vananemise protsess vastupidine. Vananemise käigus suureneb bituumenis vaigusisaldus ning see tingib sideaine viskoossuse suurenemise. Siinkohal aitab pehme bituumeni või rejuvenaatorite lisamine vaigusisaldust vähendada. Samuti tuleb arvestada ka asjaoluga, et aromaatsete ühendite ja vaigude osakaal bituumenis väheneb tulenevalt asfaldi

taaskasutustsüklite suurenemisega. Asfalteenide fraktsioon püsib seevastu aga läbi taaskasutustsüklite enam-vähem samal tasemel. [2]

## **2.3 Rejuvenaatorite kasutust reguleerivad standardid ja normid Eestis**

Eestis on rejuvenaatorite kasutamine reguleeritud väga minimaalselt. Standard EVS-EN 901-3:2021 reguleerib bituumensideaine lisandite kasutamist, mille hulka kuuluvad ka rejuvenaatorid. Lähtudes standardist tuleb lisandeid asfaltsegudes kasutades deklareerida nende omadused ja liik. Siinkohal ei tohi lisandite kasutamine minna vastuollu tehnilise kirjeldusega. Kõik asfaltsegus kasutatavad lisandid tuleb vastavalt dokumenteerida. [15] Samuti tuleb igasuguste lisandite kasutamine kajastada ka segule koostatud seguretseptis [16].

Lähtudes Transpordiameti koostatud juhise „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise“, võib Transpordiameti objektidel ringlussevõetud asfaldi lisada kandev- ja siduvkihtidesse, kuid seda ei tohi lisada kulumiskihtide asfaltsegudesse. Tulenevalt antud juhise on maksimaalne lubatud RA osakaal asfaltsegus 30%. Olukorras, kus kandev- ja siduvkihtide segudes ületab RA osakaal 20% tuleb seguretsepti lisana esitada ka sideaine omaduste arvutuskäik. [17]

Lähtudes standardist EVS-EN 901-3:2021 peab kasutatav RA vastama standardis EVS-EN 13108-9:2016 toodud nõuetele. Tulenevalt standardist EVS-EN 901-3:2021, on asfaltsegusse lubatud lisada kuni 30% ringlussevõetud asfaldi, kui see tehnilise kirjeldusega vastuollu ei lähe. Olukorras, kus asfalditootja soovib uutes asfaltsegudes kasutada rohkem kui 30% ringlussevõetud asfaldi, peab tootja jälgima täiendavalt kehtestatud lisameetmed. Selleks peab ta tagama sõelkõvera ja sideaine stabiilsuse, tehes seda läbi asfaldi hoolika sorteerimise, kihiti freesimise või kitsasteks fraktsioonideks sõelumise. Samuti on soovituslik kaaluda RA vananenud sideaine elavdamist rejuvenaatoritega. [15]

## **2.4 Lähiriikide praktika rejuvenaatoritega**

### **2.4.1 Soome**

Soomes andis 2023. aastal PANK RY ehk *Päällystealan neuvottelukunta Ry*, mis on Soome asfaltkatete ühing, välja uue asfaldistandardi „*Asfalttinormit 2023*“. Antud standard reguleerib Soomes asfaltkatete ehitamist ning ka asfaltsegudes erinevate lisandite kasutamist. Standardis on märgitud erinevate lisandite kasutamine asfaldi

tootmises eesmärgiga asfaltsegu funktsionaalsete omaduste parandamiseks või muude tehniliselt soodsamate eesmärkide saavutamiseks. Lisandite kasutamine on standardis lubatud selleks ette nähtud tingimustel. Selleks tuleb veenduda iga projekteeritava asfaltsegu puhul, kuhu soovitakse lisandeid doseerida, kas lisandid sobivad kokku ka segu teiste komponentidega. Samuti tuleb valitud lisand ning selle doseeritav kogus märkida asfaltsegule koostatud seguretseptis ning arvestada asfalteerimisplaani koostamisel. Lisandite kvaliteedikontroll teostatakse eraldi kokkulepitud kriteeriumite alusel. Lisandite kasutamine tuleb alati kokku leppida eraldi lepingudokumentis, mida arvestatakse ka asfaltkatte kvaliteedi hindamisel. Samuti tuleb lisandite kasutamisel tagada nii tervise- kui ka keskkonnaohutus. [18]

Soomes on rejuvenaatorite vastu huvi tuntud juba mõned aastad. Selleks, et saada paremat ülevaadet on läbi viidud mitmeid uuringuid. Näiteks uurisid 2016. aastal Terhi Pellinen, Timo Blomber ja Michalina Makowska oma uurimistöös „*Laboratory Simulation of Bitumen Aging and Rejuvenation to Mimic Multiple Cycles of Reuse*” rejuvenaatorite mõju bituumensideainele, kus laboratoorsetes tingimustes imiteeriti, rejuvenaatoreid sisaldava katsesegu korduvkasutamist. Töö eesmärgiks oli välja selgitada kas rejuvenaatoritega elavdatud RA on hiljem mitmeid kordi taaskasutatav. [19]

Uurimistöö tulemusena leiti, et vastavalt õigesti valitud toote, optimaalse doseerimiskoguse ning õige tootmisprotsessi abil on võimalik toota rejuvenaatoreid sisaldavat asfaltsegu, mida saab ka hiljem mitmeid kordi uuesti taaskasutada. Sellest tulenevalt tegid töö autorid järelduse, et õigesti toimides ei halvendanud rejuvenaatorite kasutamine asfaldi korduvkasutamise võimalusi. [19]

#### **2.4.2 Norra**

Norras reguleerib asfaltkatete ehitamist normdokument „*Håndbok N200*”, mis on Norra avalikke teid haldava ametkonna *Statens Vegvesen* poolt koostatud. Tulenevalt antud normatiivist on igasuguste lisandite kasutamine asfaltsegudes reguleeritud peatükis 651.4 „*Tilsetningsstoffer*”. Antud peatükis arvatakse lisandite hulka mitmeid väga erinevate omaduste ning toimega tooteid. Enne kasutamist on oluline lisandi kohta uurida ning selle omadused vastavalt dokumenteerida. [20] Norras ei ole rejuvenaatorite kasutamine asfaltsegudes küll veel levinud, kuid antud teema vastu tuntakse suurt huvi. Samuti panustavad ka riiklikud asutused, et valdkonda rohkem uurida. [21]

Selleks, et saada paremat ülevaadet rejuvenaatoritest viidi 2021. aastal KFA ehk *Kontrollordningen For Asfaltgjenvinning*, mis on Norra asfaldi ringlussevõtu kontrollorganisatsioon, poolt läbi rejuvenaatoreid käsitlev uuring pealkirjaga „*KFA*

*rejuvenatorprosjekt: Laboratorieprøving av forynget bitumen fra resirkulert asfalt*", kus Torbjørn Jørgensen ja Thomas Haukli Fiske uurisid viie erineva rejuvenaatori mõju 50% ringlussevõetud asfaldi sisaldavale asfaltsegule. Kõik asfaltsegud valmistati bituumeniga penetratsioonimargiga 160/220. Katsetulemused näitasid, et heade omadustega RA puhul on võimalik ilma rejuvenaatoreid kasutamata toota kuni 30% RA sisaldusega segusid. 50% RA sisalduse korral leiti, et rejuvenaatorite kasutamine on vajalik ja õigustatud, et hoida ära segu kvaliteedi langus. Katsetulemuste analüüsi põhjal leiti, et üks rejuvenaator viiest ei sobiks edasiseks katsetamiseks. [21]

2019. aastal uurisid Norras Ali Foroutan Mirhosseini, Seyed Amid Tahami, Inge Hoff, Samer Dessouky ja Chun-Hsing Ho oma töös „*Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator*” suure RA sisaldusega asfaltsegude toimivust, mida on eelnevalt elavdatud bio-õli rejuvenaatoritega. Antud uuringu raames teostati laboratoorseid katsetusi, kus uuriti vananenud sideaine elavdamist datliseemneõliga. Katsetuste tegemiseks valmistati erinevad katsesegud, mis sisaldasid vastavalt 20% kuni 40% ringlussevõetud asfaldi. Katsetuste tulemuseks leiti, et datliõli kasutamine sideaine elavdajana andis positiivsed tulemused, kuni 30% RA sisaldusega segude puhul. Suurema RA sisalduse puhul nagu näiteks 40% või enam tegid autorid ettepaneku alternatiivsete rejuvenaatorite leidmiseks, kuna katsetulemused ei andnud soovitud tulemusi. [22]

2019. aastal kirjutasid Omaad Aslam ja Monir Yousef magistritöö pealkirjaga „*Effekten av rejuvenatorer på aldrete bitumen*”, kus autorid käsitlesid rejuvenaatorite mõju vananenud bituumenile. Töö käigus võrreldi kolme rejuvenaatori mõju RA elavdamisel. Selleks valmistati erinevaid katsesegusid. Referentssegu valmistamisel otsustati kasutada bituumenit penetratsioonimargiga 160/220. Ringlussevõetud asfaldi otsustati rejuvenaatoreid sisaldavasse segusse lisada 50%. [23]

Uurimistöö tulemuseks saadi, et rejuvenaatorite kasutamine annab positiivse tulemuse RA elavdamisel. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude ning referentssegu katsetulemuste võrdlemisel leti, et rejuvenaatorid suudavad vananenud bituumensideaine omadusi parandada ning viia need võrdväärsele tasemele nagu on referentssegul. Töö autorid jõudsid katsetulemuste põhjal järeldusele, et rejuvenaatoreid sisaldava asfaltsegu lõppkvaliteet sõltub väga palju valitud rejuvenaatori tüübist ning kogusest. Samuti leiti, et tulenevalt positiivsetest katsetulemustest tuleks antud teemat Norras kindlasti edasi uurida. [23]



### 2.4.3 Rootsi

Rootsis reguleerib teedeehitust Rootsi transpordiamet *Trafikverket*. Asfaltkatete ehitamisel lähtutakse *Trafikverket* poolt loodud normatiivist „*Bitumenbundna lager TDOK 2013:0529 Version 4.0 2020-10-12*”. Antud normatiiv käsitleb ka erinevate lisandite kasutamist asfaltsegudes. Juhul kui soovitakse kasutada lisandeid, tuleb esmalt kontrollida nende vastavust nõuetele. Kasutatava lisandi tüüp ning kogus tuleb deklareerida. Samuti tuleb jälgida, et lisandit kasutades oleks täidetud kõik ohutusnõuded. [24]

Rootsis on rejuvenaatorite uurimiseks läbi viidud mitmeid uuringuid. Üheks suurimaks uuringuks kujunes mitmeaastane projekt, mille eestvedajaks oli Rootsi ehitusettevõtte PEAB AB. Projekt koosnes kahest etapist. Esimene etapp viidi läbi 2015. aastal ning kandis pealkirja „*UTVECKLING AV SBSEMULSIONER MED REJUVENATORER-ETAPP 1*” ehk rejuvenaatoritega bituumenemulsiooni arendamine- esimene etapp. Projektis võrreldi omavahel nelja erinevat rejuvenaatorit ning nende mõju vananenud sideainele. Projekti läbiviimiseks kaasati rejuvenaatorite tootjaid ning spetsialiste üle maailma. Laboratorsete katsetuste käigus uuriti valitud rejuvenaatorite keemilisi ja füüsikalisi omadusi ning nende rejuvenaatorite mõju vananenud bituumensideainele. Saadud katsetulemuste põhjal valiti välja üks rejuvenaator, mida seejärel katsetati põhjalikumalt. Katsetuste käigus töötati välja bituumenemulsioon, mida saaks kasutada asfalditehases ringlussevõetud asfaldi sisaldavate segude tootmisel. Emulsiooni doseerimise eesmärgiks segusse oli vananenud bituumensideaine elavdamine ning seeläbi toodetavas asfaltsegus RA sisalduse tõstmine. Antud emulsiooniga loodeti alandada ka asfaldi tootmistemperatuure. [25]

2018. aastal valmis projekti teine osa „*UTVECKLING AV EMULSIONER MED REJUVENATORER-ETAPP 2*” ehk rejuvenaatoriga bituumenemulsiooni arendamine- teine etapp. See etapp sisaldas endas esimeses etapis välja töötatud emulsiooniga põhjalikumaid laboratorseid katsetusi ning katselõigu rajamist. Laboratorsete katsetuste tulemuseks leiti, et antud emulsioon aitas parandada vananenud bituumensideaine omadusi. Tulenevalt positiivsetest laboratorsetest katsetulemustest otsustati rajada ka katselõik. Katselõigu rajamiseks toodetud asfaldi tootmisprotsessis esinesid aga probleemid, seoses rejuvenaatori ebaühtlase jaotumisega bituumensideaines. Üheks probleemi põhjuseks toodi välja, et tootmiseks valitud asfalditehas ei vastanud vajadustele. Probleem seisnes selles, et rejuvenaatorit doseeriti otse bituumenisse, kuid rejuvenaatori doseerimiskiirus ning segunemine ei olnud piisavalt kiired. Tulenevalt probleemist rejuvenaatori doseerimiskiirusega oli tulemuseks ebaühtlane bituumeni ning rejuvenaatori segunemine. Sellest tulenevalt kannatas ka

segu kvaliteet. Üheks probleemi lahenduseks pakuti välja asfaltsegu segamisprotsessi pikendamine, mis võiks parandada rejuvenaatori ühtlasema jaotuvuse segus. [26]

## **3 REJUVENAATORID**

Rejuvenaatorid on vananenud bituumenit elavdavavad ja pehmedavad lisandid, milles on palju kergeid komponente. Neid lisatakse ringlussevõetud asfaldi sisaldavatesse asfaltsegudesse, et parandada ja taastada vananenud bituumensideaine füüsikalisi ja keemilisi omadusi. Rejuvenaatorite tööpõhimõtteks on vananenud bituumeni paremini töödeldavaks muutmise, täitematerjali ja bituumeni vahelise nakke parandamine ning vananemisega osaliselt kaotatud sideaine omaduste taastamine. [4], [9]

Siinkohal on oluline ka asjaolu, et rejuvenaatorid ei suuda taastada bituumensideainet täpselt samaväärsele tasemele nagu see oli esialgses asfaldi tootmisprotsessis. See tuleneb sellest, et bituumeni osade osakeste oksüdeerumise mõju nende osakeste omadustele on pöördumatu. Seetõttu on rejuvenaatorite kasutuseesmärgiks elavdada vananenud bituumensideainet sedavõrd, et seeläbi saaks suurendada RA sisaldust asfaltsegudes. [4] Üldiselt parandavad rejuvenaatorid vananenud bituumensideaine penetratsiooni näitajat, temperatuuritundlikkust, kolloidset stabiilsust, elastsust. Samal ajal aga vähendavad pehmenemistäppi, viskoossust ja jäikust. [27], [28]

### **3.1 Rejuvenaatorite toimimismehhanism**

Tulenevalt sellest, et rejuvenaatorid esinevad õli baasil, põhjustab nende lisamine alati vananenud bituumeni viskoossuse vähenemist. Rejuvenaatori optimaalne lisamiskogus vananenud sideaine elavdamiseks on selline, et tulemuseks oleks soovitud viskoossusega sideaine. Lisaks parandab rejuvenaatori lisamine ka määrdeefekti, läbi mille paraneb asfaldisegu täitematerjali töödeldavus segus. [3] Bituumensideaine viskoossuse vähenemine on tingitud sellest, et rejuvenaatorid lahustavad asfalteeni mikrostruktuuri taas väiksemateks osadeks. Seeläbi paraneb difusioon uute ning vananenud asfaltsideaine osakeste vahel. [29]

Rejuvenaatori toimemehhanism sõltub selle tüübist ning keemilistest omadustest. Mõni grupp rejuvenaatoreid lahustab peamiselt vananenud asfaldi sideaines sisalduvat asfalteeni. Samal ajal kui teine grupp rejuvenaatoreid lahustab vananenud sideainet üldiselt ning tõstab seeläbi malteeni fraktsiooni moodustavate osakeste sisaldust. [9]

Kaks olulist tegurit, mis hõlbustavad rejuvenaatori ühtlast segunemist vananenud bituumensideainega on segamisaeg ja kõrgendatud temperatuur. Pikendades segamisaega või kõrgendades segamistemperatuuri, aitab see kaasa rejuvenaatori kiiremale ja ühtlasemale jaotumisele üle kogu segu. [30] Lisaks segamisajale ning segamistemperatuurile on oluline roll ka teistel teguritel, mis aitavad kaasa

rejuvenaatori ühtlasele jaotumisele üle kogu segu ning mille tulemus oleks lõpliku sideaine homogeensuse saavutamine. Näiteks on oluline rolli ka sideaine tüübil, rejuvenaatoril endal ning selle doseerimismeetodil ja kogusel. Ebapiisav rejuvenaatori segunemine bituumensideainega võib kaasa tuua ebaühtlase rejuvenaatori jaotuvuse segus ning seeläbi madalate toimivusnäitajatega asfaltsegu. [31], [32]

Rejuvenaatoreid jagatakse vastavalt kolme rühma lähtuvalt nende võimekusest lahustuda vananenud sideaines. Sellest tulenevalt liigituvad rejuvenaatorid järgmiselt: lahustuvad, osaliselt lahustuvad ning lahustumatud. [33], [34]

Lahustuvate rejuvenaatorite kategooria ühildub kõige paremini bituumeni madala polaarsusega naftense aromaatses fraktsiooniga. Siia kategooriasse kuuluvad enamus kõikide kategooriate toodetest. Osaliselt lahustuvate rejuvenaatorite kategooriasse kuuluvatel ühenditel on afiinsus mitme bituumenis sisalduva fraktsiooni suhtes. Siia kategooriasse kuuluvad erinevad nafta- või biopõhised tooted. [33], [34]

Lahustumatute rejuvenaatorite kategooria hõlmab endas ühendeid, mis on halva kokkusobivusega madala polaarsusega naftensete aromaatses ja polaarsete fraktsioonidega. Sellest tulenevalt võivad lahustumatud rejuvenaatorid esialgu avaldada küll soovitud mõju vananenud bituumensideaine reoloogilistele omadustele, kuid pikemas perspektiivis võivad esineda asfaldi vastupidavusega seonduvad probleemid. Siia kategooriasse kuuluvad mõned naftakeemiatööstuse päritoluga tooted. [33], [34]

## **3.2 Liigitamine**

Rejuvenaatorid jagunevad nelja suuremasse kategooriasse. Esimesse kategooriasse kuuluvad aromaatsed ekstraktid ja naftenõlid, mis on spetsiaalselt destilleeritud toornaftast. Teise kategooria moodustavad bioloogilise päritoluga õlid, mis on saadud otseselt taimekasvatusest (põllumajandus või metsatööstus) või spetsiaalselt selleks otstarbeks loodud (kõrvalsaadused ja biopõhised õlid). Kolmanda rühma moodustavad igasugused ringlussevõetud ja töödeldud toiduõlid ja -rasvad või tööstuslikud õlid (masina- ja mootoriõlid). Neljanda rühma moodustavad spetsiaalselt väljatootatud lisandite jääkkategooria. [3]

Üldiselt võib neljanda rühma tooted päritolu järgi liigitada ühelt poolt naftakeemia derivaatideks ja teiselt poolt alternatiivseteks taimse või bioloogilise päritoluga toodeteks. Lisaks saab neid tooteid rühmitada sihipäraselt toodetud ning taaskasutatavateks materjalideks. [3] Rejuvenaatorite kategoriseerimist kirjeldab tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rejuvenaatorite kategoriseerimine lähtuvalt päritolust [3]

Päritolu	Algselt toodetud või tuletatud	Jäätmete taaskasutamine
Naftakeemiatööstus/nafta	Naftast saadud aromaatsed ekstraktid ja nafteenõlid	Jäätmeõlid: taaskasutatavad masinaõlid
Taimne/bioloogiline	Taimsed õlid põllumajandusest; tehnilised biopõhised õlid	Jäätmeõlid: taaskasutatud toiduõlid
Jääkkategooria	Erinevad spetsiaalselt loodud lisandid	

### 3.3 Naftast saadud aromaatsed ekstraktid ja nafteenõlid

#### 3.3.1 Päritolu ja tootmisprotsess

Naftast saadavate aromaatsete ekstraktide ja nafteenõlide rejuvenaatorite rühm saadakse toornafta destilleerimisel, kus toimub saaduste eraldamine fraktsioonideks keemistemperatuuri erinevuse alusel. Üheks antud rühma kuuluvaks näiteks on süsivesinikõlid, mida saadakse pärast toornafta destilleerimist. Süsivesinikõlised iseloomustab madal viskoossus ja aromaatsete fraktsiooni ühendite sisaldus, mis võimaldab taastada malteeni fraktsiooni tasakaalu. [3], [35]

#### 3.3.2 Keemiline koostis

Antud kategooriasse kuuluvad toornaftast destilleeritud õlid on tuntud ka kui aromaatsed ekstraktid või kerged ja rasked nafteenõlid. Neid õlised töödeldakse keemiliselt, näiteks aromaatsete ühendite hüdrogeenimise ehk vesinikuga redutseerimise teel. Selle tulemusel saadakse suurem küllastunud ühendite sisaldus, millesse kuuluvad ka süsivesinikud. [3], [35]

#### 3.3.3 Ohutus ning keskkonnamõjud

Aromaatsed ekstraktid või töötlemata rasked nafteenõlid võivad sisaldada olulisel määral aromaatsid ühendeid nagu näiteks naftaleeni. Naftaleen on oma molekulmassi poolest kõige lihtsam ja kergem polütsüklikiline aromaatsed süsivesinik. Seetõttu on Rahvusvaheline Vähiuuringute Agentuur klassifitseerinud polütsüklikilised aromaatsed süsivesinikud ainetena, millel on tõestatud kantserogeensed omadused. [36]

Seetõttu ei ole sellesse kategooriasse kuuluvaid rejuvenaatoreid ohutu kasutada keskkonnale ega ka tervisele [36]. Ohtude vähendamiseks on tootjad leidnud viise, kuidas tagada antud kategooriasse kuuluvate rejuvenaatorite ohutum kasutamine. Selleks soovivad tootjad lisada neid otse spetsiaalsesse bituumenimahutisse, kus toimub rejuvenaatori segamine värske bituumeniga. Seeläbi välditakse antud tüüpi rejuvenaatorite otsest kokkupuudet keskkonnaga. [3]

## **3.4 Jäätmeõlid: Taaskasutatud masinaõlid**

### **3.4.1 Päritolu ja tootmisprotsess**

Masinaõlid nagu näiteks mootoriõlid ja määrdeõlid, koguvad oma eluea jooksul endasse saasteaineid. Masinaõlide kasutusea lõppedes kuuluvad nad küll utiliseerimisse, kuid tänu teatud fraktsioonide sisaldamisele saab neid sellest tulenevalt edukalt taaskasutada. Utiliseerimisele määratud masinaõlisid kogutakse ringluse kaudu kokku ja seejärel töödeldakse ümber ehk eraldatakse erinevateks fraktsioonideks destilleerimisprotsessiga. [3], [37]

### **3.4.2 Keemiline koostis**

Masinaõlide kasutusea jooksul võib keemiline koostis muutuda tulenevalt kokkupuutest keskkonnaga, kus antud õlisid kasutatakse. Seetõttu on täpne keemiline koostis iga õli puhul enamasti ebaselge ning ettearvamatu. Sellest tulenevalt sisaldub antut tüüpi õlide keemilises koostises erinevate masinaõlide ja neis sisalduvate saasteainete segu. Seetõttu võib antud rejuvenaatorite kasutamisega kaasneda asfaltsegu ebaühtlane toimivus. [3], [37]

Taaskasutatud mootoriõli võib sisaldada ka parafiini, mis pärineb parafiinse õli komponentidest. Madalamatel temperatuuridel toimub parafiini molekulide kristalliseerumine, mis toob kaasa kokkutõmbumise ohtu. Seetõttu ei sobi parafiini sisaldavad õlid kasutamiseks näiteks külmas kliimas. Taaskasutatavates masinaõlides sisalduvad saasteained, nagu näiteks raskemetallid, nikkel ja kroom, koonduvad mittedestilleeritavasse fraktsiooni ning seetõttu võivad antud rejuvenaatorid kujutada ohtu keskkonnale. [3], [37]

### **3.4.3 Ohutus ning keskkonnamõjud**

Jäätmeõlide edasine töötlemine võib keskkonnale olla ohtlik lähtuvalt neis sisalduvatest saasteainetest, samuti ka ohtlikest ainetes nagu näiteks kantserogeenide ja mutageenide koostisest ning olemasolust. Kahjulike ainete tõttu, nagu näiteks kantserogeensed polüklooritud bifenüülid ja polütsükliilsed aromaatsed süsivesinikud, on töötlemata õlijäätmed ohutuse suhtes siiski problemaatilised. Mida intensiivsem on jääköli töötlemine vaakumdestilleerimisega, seda madalam on mutageensusindeks ja tänu millele on ka toode vähem ohtlik, kuna destilleerimise teel eraldatakse kahjulikud ühendid. Vaakumdestilleerimisel eraldatakse alles jäänud jääkproduktist polütsükliilsed aromaatsed süsivesinikud. Selle tulemusel satuvad need hoopis nafteenõlide kujul raskete õlide ja määrdeainete fraktsioonidesse. [3], [37]

## **3.5 Ringlussevõetud toiduõlijäätmel (taimse või loomse päritoluga õlid ja rasvad)**

### **3.5.1 Päritolu ja tootmisprotsess**

Antud rühma kuuluvad tooted on taaskasutatavad toidujäätmelid, kuhu kuuluvad toiduõli ning taimeõli jätmed. Toidujäätmelide hulka kuuluvad näiteks päevalilleõli, rapsiõli, maapähkliõli ning mõningad praadimiseks mõeldud rasvained. [3], [38]

### **3.5.2 Keemiline koostis**

Kuna antud kategooriasse kuulub erinevaid taimeõlised ja rasvu, siis seetõttu esineb ka mitmekesisest keemilist koostist. Need on enamasti küllastunud kui ka küllastumata ühendite segud nagu palmitiinhape, oleiinhape või linoolhape, millele on lisandunud mitmesuguseid õli kasutamisest tulnud saasteaineid. [38], [39]

Need ühendid tekivad toidu kuumutamisel toiduõlis, kuna toidus sisalduvat vett ei ole võimalik piisavalt kiiresti väljutada. See viib hüdrolyüsini, mille tulemusel tekivad kahjulikud ühendid taaskasutusprotsessi mõistes, kuna just kõrgetel temperatuuridel võivad need ühendid põhjustada kiiremat korrosiooni, näiteks metallist masinaosadel tootmisprotsessis. Samuti võib tekkida ärritus nii limaskestadel kui ka nahal. Sellest tulenevalt on seda tüüpi rejuvenaatoritele ette nähtud karmid nõuded. [3], [38] Tulenevalt antud kategooriasse kuuluvate ühendite keemilisest koostisest on siia kategooriasse kuuluvad rejuvenaatorid oksüdatsioon- ja temperatuuritundlikud. Sellest tulenevalt ei pruugi antud tüüpi rejuvenaatorid sobida kliimasse, kus esinevad külmad talved. [3]

### **3.5.3 Ohutus ja keskkonnamõjud**

Nii nagu ka ringlussevõetud masinaõlidega nii ka ringlussevõetud toiduainejätmetega. Tulenevalt sellest, et tegemist on jääkproduktidega, siis võivad need olla saastunud kasutusaja jooksul erinevate saasteainetega ning seetõttu olla ohtlikud tervisele ning keskkonnale. Samuti võib kasutusaja jooksul lisanduda õlisse ka raskemetalle, kuid neid esineb vähem kui mootoriõlide puhul. [3]

## **3.6 Taimsed õlid põllumajandusest**

### **3.6.1 Päritolu ning tootmisprotsess**

Antud kategooriasse kuulub lai valik tooteid, mis pärinevad põllumajandusest ning koristatud põllusaagist nagu näiteks päevalilleõli, sojaõli, palmiõli, indiapähkliõli ja linaseemneõli. Peamiselt sisaldavad antud kategooria tooted erinevaid rasvhapete ja estrite segusid, näiteks palmitiini, oleiini ja liionhapet. [3], [40]

### **3.6.2 Toimemehhanism**

Antud gruppi kuuluvad rejuvenaatorid toimivad peamiselt viskoossuse alandajatena. Lisaks võivad mõned selle rühma tooted toimida ka vananenud bituumensideaine dispergeeriva vahendina. Tulenevalt sellest, et antud kategooriasse kuuluvate toodete puhul ei ole tegemist jääkkategooriaga, ning keemiline koostis on teada, siis ei ole ka tuvastatud erilisi keskkonna- ega ka terviseriske. [3], [40]

## **3.7 Biopõhised tehisõlid**

### **3.7.1 Päritolu ja tootmisprotsess**

Antud rühma kuuluvad peamiselt õlid, mis on toodetud spetsiaalselt bioloogiliste toorainete muundamisel nagu näiteks okaspuud, mille oluliseks vahetooraineks on toortallõli. Toortallõli on vaigutoode, mida saab teatud okaspuuliikidest. See sisaldab endas vaikhapete, abieethappe ja muude koostisosade nagu näiteks terpeenide ja kampoli või kolofoonia segu. See saadakse okaspuidu lagunemissaadustest tulenevate leeliste töötlemisel happega. Antud kujul on tegemist paberitööstuse kõrvalsaadusega. Toortallõli rafineeritakse biorafineerimistehases, et toota mitmesuguseid kemikaale. Tallõli toimib nii viskoossuse alandajana kui ka vananenud bituumensideaine omaduste taastajana, taastades seejuures malteeni fraktsiooni osakaalu. [3], [41]

### **3.7.2 Ohutus ja keskkonnamõjud**

Sellesse kategooriasse kuuluvad tooted, mis on spetsiaalselt välja töötatud määratletud otstarbeks. Eesmärgiga pöörata erilist tähelepanu teatud aspektidele, mis näiteks jääkkategooria puhul võivad tekitada probleeme. Näiteks terminiline stabiilsus, leekpunkt või toodete lõhn. [3]



## **3.8 Mitmed spetsiaalselt loodud lisandid**

### **3.8.1 Päritolu ja tootmisprotsess**

Antud kategooria on väga mitmekesine ning sinna kuuluvad spetsiaalselt väljatöötatud tooted, mis põhinevad erinevatest allikatest. Siia kategooriasse kuuluvad lisandid on nii bioloogilist ehk taimset päritolu kui ka naftakeemiatööstuse toorainetest. Näiteks kuuluvad siia kategooriasse erinevat tüüpi biomassi pürolüüsi teel saadud tooted nagu bioõlid. Need on biogeneerilised segud, millele on lisatud täiendavaid lisandeid. Samuti ka rübustiõlid, millele on lisatud bituumenit ning lähtuvalt vajadusest erinevaid lisandeid. [3]

### **3.8.2 Keemiline koostis**

Tulenevalt sellest, et antud kategooriasse kuuluv tootesortiment on lai, siis on ka selle kategooria keemiline koostis varieeruv. Pürolüüsi teel saadud toodete koostis on oma olemuselt väga mitmekesine kuna kõrgetel temperatuuridel toimivate lagunemisprotsesside tulemuseks on tihti palju keemilisi ühendeid. Teatud taimset või tehislükku päritolu rejuvenaatorid segatakse täiendavate lisanditega, et pikendada rejuvenaatori toimet. Näiteks lisatakse sünteetilisi vahasid, et tagada RA säästvat taaskasutamist. Tänu sünteetilistele vahadele on võimalik alandada asfaldi tootmisprotsessi temperatuuri. [3]

Rübustiõlid võivad oma päritolult olla nii toornafta destilleerimise tulem kui ka taimset päritolu. Toornafta destilleerimise tulemusel saadud rübustiõli koosneb aromaatsete ja alifaatsete süsivesikute segudest. Sageli lisatakse rübustiõli ka bituumenile, tulenevalt selle viskoosust alandavast võimest. [3]

### **3.8.3 Toimemehhanism**

Spetsiaalselt toodetud lisandid toimivad peamiselt viskoossuse vähendajatena. Mitmeotstarbeliste lisandite kasutamine aitab alandada asfaltsegu tootmise temperatuure või parandada naket sideaine ja täitematerjali vahel. [3]

### **3.8.4 Ohutus- ja keskkonnaprobleemid**

Tulenevalt sellest, et antud kategooriasse kuulub palju erineva keemilise koostisega tooteid, varieerub ohutusala teave ning iga toote kohta tuleks siinkohal uurida eraldi. Antud kategooriasse kuuluvad ka tooted, mille hulgas on ka pürolüüsiprodukte sisaldavad tooted, mis nõuavad erilist tähelepanu, nagu näiteks polütsükliised aromaatsed süsivesinikud. Sellest tulenevalt tuleks tähelepanelik olla, kuna pürolüüsi tulemusel saadud tooted võivad tekitada keskkonna- ja ohutusprobleeme. [3]

### **3.9 Sobiva rejuvenaatori valimine**

Kõik rejuvenaatorid on erinevad ning nende keemiline koostis lähtub kasutatud toorainest. Seetõttu on rejuvenaatorid erinevad nii omaduste kui ka toime poolest. Selleks, et leida sobiv toode, mida kasutada, tuleks kaaluda erinevad tooteid ning tootjaid. Oluline oleks ka tootjaga suhelda ning küsida toote sobivuse kohta lähtuvalt sellest, millised on rejuvenaatori doseerimisvõimalused ning kuhu ja millistesse tingimustesse rejuvenaatorit sisaldav asfaltsegu paigaldatakse. Erinevatel rejuvenaatoritel võivad olla erinevad ohud nii keskkonnale kui ka tervisele. Siinkohal on ka oluline, et kõik rejuvenaatorid ei sobi külmas kliimas kasutamiseks ning seetõttu on oluline teha eeltööd veendumaks, et valitakse lähtuvalt keskkonnatingimustest ja vajadustest õige toode.

### **3.10 Optimaalne rejuvenaatori doseerimiskogus**

Euroopas kasutatakse bituumensideaine iseloomustamiseks standardite EVS-EN 1427:2015 kirjeldatud pehmenemistäppi määramist kuuli-rõnga meetodil ning standardis EVS-EN 1426:2015 kirjeldatud nõelpenetratsiooni määramist. Sama lähenemisviisi kasutatakse ka rejuvenaatorite doseeritava koguse leidmiseks. [4] Traditsiooniline meetod sobiva rejuvenaatori koguse valimiseks põhineb arvutusmudelil, kus võetakse arvesse sideaine omadusi, nagu penetratsioon, pehmenemistäpp ja viskoossus. Rejuvenaatori doseeritav kogus peab olema selline, et vananenud ja värske bituumen koos lisatud rejuvenaatoriga oleks kokkusegatuna sobiva viskoossusega. [42] Selleks, et vältida rejuvenaatori üledoseerimist, soovitatakse seda bituumenisse lisada kindlasti järk-järgult, mis omakorda aitab kaasa just õige doseerimiskoguse leidmiseks parandamaks vananenud sideaine füüsikalisi, reoloogilisi kui ka mehaanilisi parameetreid. [43]

Õige rejuvenaatori doseerimiskoguse leidmisega aitavad oluliselt rejuvenaatorite tootjad. Seda tehakse läbi arvutusmudelite, erinevate arvutustabelite või konsultatsioonide. Kõike selleks, et leida õige kogus, mida on vaja konkreetsele vananenud sideainele lisada, et saavutada soovitud pehmenemistäpi ning penetratsiooni väärtused. [4] Sobiv rejuvenaatori doseerimiskogus ei ole ainus tegur soovitud omadustega sideaine saamiseks. Samuti on oluline roll ka segamisprotseduuril. Eriti segamisajal, mis mängib olulist rolli rejuvenaatori hajutamisel vananenud sideainesse. Liiga lühike segamisaeg võib põhjustada segu halva toimivuse, tulenevalt rejuvenaatori ebaühtlasest jaotamisest. [44]

Tulenevalt sellest, et rejuvenaatoriga ei ole võimalik viia RA sideaine omadusi tasemele, nagu need olid värskena, siis tuleb leida parim kompromiss, kus doseeritav kogus alandaks pehmenemistäppi ning samal ajal tõstaks penetratsiooni. [3] Lisades bituumensideainele liiga palju rejuvenaatorit, on tulemuseks liiga pehme bituumen, millel on ebapiisav jäikus ning väike deformatsioonikindlus. Seevastu liiga väike doseerimiskogus võib kaasa tuua asfaltsegu hapruse, mis võib viia pragunemiseni. [43]

### **3.11 Rejuvenaatorite doseerimismeetodid**

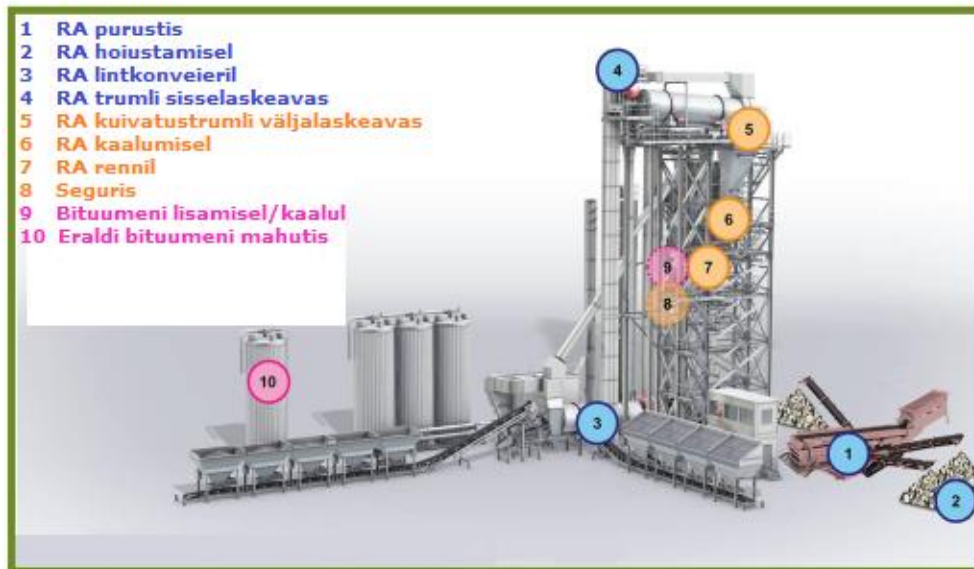
Üldiselt on kasutusel kolm peamist meetodit, millega elavdatakse vananenud RA bituumensideainet. Nendeks on rejuvenaatori lisamine segusse asfaldi tootmisprotsessi käigus, rejuvenaatori pihustamine asfaltkatte pinnale ja rejuvenaatori doseerimine asfaltsegusse kapslite kujul. [9]

#### **3.11.1 Segamismeetod**

Kõige enam levinud meetod on segamismeetod. Segamisprotsess toimub asfalditehases temperatuurivahemikus 140°C kuni 160°C. Selleks, et säilitada rejuvenaatorite maksimaalsed kasutegurid asfaldisegus, tuleb asfaldi tootmisprotsessis rejuvenaatoreid lisada kõige sobivamas etapis. [45]

Asfalditootjal tuleb eelkõige lähtuda rejuvenaatori tootja soovitudest, kuhu, kuidas ja millal tuleks valitud rejuvenaatorit doseerida. Rejuvenaatori lisamine sõltub paljugi selle tüübist, omadustest kui ka sobilikkusest soovitud tehases kasutamiseks. [4] Eesmärgiks on säilitada asfaltsegu rejuvenaatorite parimad omadused, minimaalne keskkonnamis ja lihtsam tootmisprotsess [9].

Rejuvenaatori lisamiseks asfalditehases on nii mitmeidki võimalusi. Joonisel 3.1 on välja toodud rejuvenaatori doseerimisvõimalused tehases. Võimalusi on palju, kuid valik tuleb langetada lähtuvalt tehase tüübist, kuna väljatoodud doseerimisvõimalused ei ole sobilikud ega ka võimalikud kõikides asfalditehastes. Samuti tuleb lähtuda ka rejuvenaatorist ehk milline doseerimisviis on parim just antud toote seisukohast. [45]



Joonis 3.1 Rejuvenaatori lisamise võimalused asfalditehases [1]

Esimeseks rejuvenaatori doseerimisvõimaluseks on ringlussevõetud asfaldi purustusprotsessi ajal. Teine võimalus käsitleb endas doseerimist RA kuhilates. Kolmandaks on konveierlint, mida mööda ringlussevõetud asfalt liigub tehasesse. Neljandaks võimaluseks oleks ringlussevõetud asfaldi trumli sisselaskeavas. Viies meetod kujutab endas doseerimist ringlussevõetud asfaldi kuivatustrumli väljalaskeavas. Kuues meetod käsitleb rejuvenaatori lisamist ringlussevõetud asfaldi kaalumisel. Seitsmes meetod on rennil, mida mööda liigud RA segusse. Kaheksas meetod on mõeldud doseerimiseks asfaltsegu segamisel ehk doseerimine otse värskesse segusse. Üheksas meetod kirjeldab doseerimist bituumeni lisamisprotsessis või bituumeni kaalumisel. Kümnes meetod kujutab doseerimist eraldi selleks ette nähtud bituumeni mahutis. [1]

### 3.11.2 Pihustamismeetod

Joonisel 3.2 kujutatud pihustamismeetodit kasutatakse ennetava hooldusmeetodina kolme kuni nelja aasta vanuse asfaltkatte puhul [46]. Pihustamismeetodi eesmärgiks on asfaltkatte pinnapragunemise peatamine. Asfaltkatte pinnale pihustatav rejuvenaator võib ka minimeerida sideaine oksüdeerimise võimaluse, tungides asfaltkatte pindmistesse pragudesse ning seeläbi sulgedes need. [47]

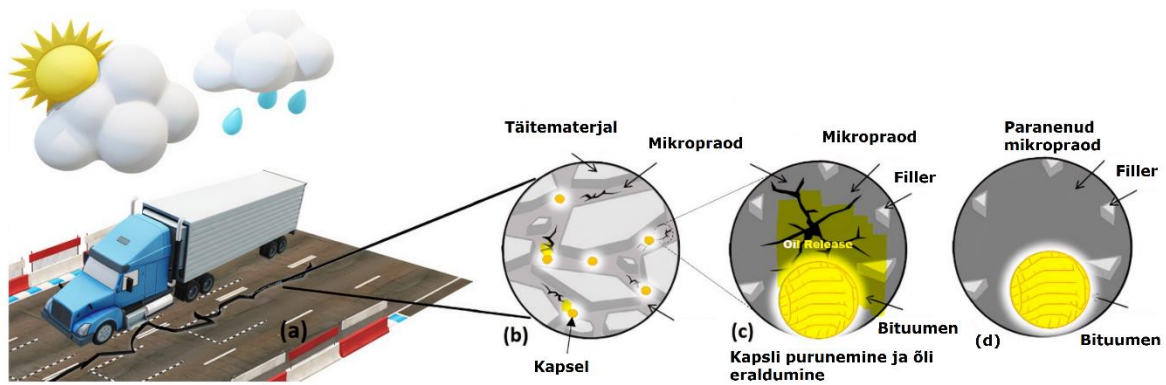


Joonis 3.2 Rejuvenaatori pihustamine asfaltkate pinnale [48]

### **3.11.3 Rejuvenaatori lisamine kapslite kujul**

Üheks asfaltkate kasutusea tõstmiseks võimaluseks on asfaltsegusse rejuvenaatorit sisaldavate mikrokapslite lisamine. Tänu sellele tekib asfaltkatele isetervenev võime. [49] Rejuvenaatorit sisaldavad mikrokapslid lisatakse asfaltkate laotamisel laoturi kolus olevasse kuuma asfaltsegusse. [50], [51] Joonisel 3.3 on kujutatud rejuvenaatorit sisaldavate kapslite toimemehhanism.

Ajajooksul asfaltkate vananeb ning selle tulemusel tekivad kattetes erinevad pinged, mis ületavad üks hetk rejuvenaatorikapsli kestade vastupidavuspiiri. Tänu sellele kapslid purunevad ning kapslitest vabanev rejuvenaator valgub asfaltkattes olevatesse pragudesse. Selleks, et kapslid toimiksid eesmärgipäraselt, tuleb olla veendunud, et need oleksid kindlasti asfaltkattes hajutatult. Samuti peavad kapslid vastu pidama asfaltkate laotamis- ning tihendamisprotsessi. [50], [51]



Joonis 3.3 Rejuvenaatorkapslite toimemehhanism [52]

Mikrokapslite toimimine asfaldis on mõjutatud erinevatest teguritest. Näiteks on oluline kapslite suurus, jaotus segus ja kapsli kesta omadused. Samuti on olulised ka mikrokesta tugevus, paksus ning mittebiolagunev omadus. Kapslite omadused sõltuvad suuresti sellest kui kaua peavad kapslid asfaldis vastu pidama. Mikrokapsli enneaegne purunemine asfaltkattes võib kaasa tuua bituumensideaine liigse pehmenemise, mis viib deformatsioonikindluse languseni. See omakorda võib viia roobaste tekkimiseni. Oluline on ka arvestada, et osa kapsleid puruneb juba asfaldi laotamise ning tihendamise käigus. Selleks, et tulla toime asfaldi vähenenud deformatsioonikindlusega ning sellest tingitud tugevusprobleemidega, kasutatakse tugevdamise tehnikaid, millest üks on näiteks asfaltsegusse erinevate kiudude lisamine. [51], [53]

### 3.12 Rejuvenaatorid katsete läbiviimiseks

Lõputöö laboratoorseteks katsetuste tegemiseks valiti välja kolm joonisel 3.4 toodud rejuvenaatorit. Selleks tehti eeltööd, et leida tooted, mis sobiksid kindlasti Eesti kliimasse. Valiku tegemisel võeti arvesse teaduskirjandust ning teistes sarnase kliimaga Euroopa riikides läbi viidud katsetusi.



Joonis 3.4 Laboratoorseks katsetamiseks valitud tooted (erakogu)

Mitmed uuringud on leidnud, et rejuvenaatorite efektiivsus vananenud bituumensideaaine omaduste elavdamisel sõltub enamasti nende päritoluallikatest. Näiteks orgaanilise päritoluga rejuvenaatorite katsetulemused ületasid vananenud bituumensideaaine omaduste elavdamisel naftast pärinevaid rejuvenaatoreid. [54]

Samuti on oluline silmas pidada, et mõningad naftasaadustest pärinevad tooted ei sobi kasutamiseks piirkondades, kus nagu ka Eestis, esinevad külmad talved. Valiku tegemisel oli määravaks ka toodete kasutamisest tulenevad keskkonna- ning terviseriskid. Erinevad naftasaadustest saadud tooted võivad kujutada ohtu nii tervisele kui ka keskkonnale. Sellest tulenevalt võeti vastu otsus sinna kategooriasse kuuluvad tooteid mitte valida. [9] Võttes arvesse kõiki eelmainitud aspekte, otsustati valida sobivad rejuvenaatorid orgaanilise päritoluga toodete hulgast, mis on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2 Valitud rejuvenaatorite iseloomustus ja kategoriseerimine [3]

	Päritolu	Koostis	Liigitamine
Rejuvenaator A	Taimset ja bioloogilist päritolu	Erinevate rasvhapete estrite biogeenne segu	Erinevate spetsiaalselt loodud lisandite kategooria; algselt toodetud või tuletatud
Rejuvenaator B	Taimset ja bioloogilist päritolu	Toortallõli, toorsulfaat tärpentiin ja männipuu kemikaalid	Tehnilised biopõhised õlid; algselt toodetud või tuletatud
Rejuvenaator C	Taimset ja bioloogilist päritolu	Keemiliselt modifitseeritud taimeõli	Taimsed õlid põllumajandusest; algselt toodetud või tuletatud

### 3.13 Ringlussevõetud asfaldi päritolu

Antud lõputöö raames kasutatav ringlussevõetud asfalt pärineb joonisel 3.5 märgitud asukohast, milleks on tee nr. 4 Tallinn- Pärnu- Ikla maantee 141 km parempoolne sõidutee äär. Asfaldi freesimistöode teostamiseks kasutati joonisel 3.6 toodud Wirtgen W120 CFi 1,2 m asfaldifreesi. Tööd teostati 27.03.2023 ning freesimissügavuseks valiti 5 cm.



Joonis 3.5 Freesimise asukoht [55]





Joonis 3.6 Freesimistööd (erakogu)

Võttes aluseks Teeregistri andmed, on RA näol tegemist 2012. aastal paigaldatud SMA (*stone matrix asphalt*) 12 seguga, kihipaksusega 3 cm. Laboratoorse katsetamise käigus aga selgus, et tegemist on hoopis AC (*asphalt concrete*) 12 surf (*surface*) seguga. Katsetulemused tulid ootamatud, aga see ei seganud RA kasutamist edasises katsetamises. AC surf segu on antud lõputöö raames sobivam variant, kui SMA segu, kuna SMA segu sisaldab polümeermodifitseeritud bituumenit, mis oleks katsetamise protsessi raskendanud.

## 4 Laboratoorne katsetamine

### 4.1 Katseplaani koostamine

Katseplaani koostati lähtuvalt katsetuste vajadusest ning selle koostamisel toetuti standardile EVS-EN 13108-20:2016, mis käsitleb asfaltsegu tüübikatsetusi. Laboratoorseks katsetamiseks vajalike katsete valimisel toetuti Transpordiameti „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise“ toodule. Samuti lisati asfaltsegude katsetamisele ka juurde pragunemistugevuse katse. Kogu koostatud katseplaani hõlmab katseid nii täitematerjali, ringlussevõetud asfaldi, sideaine kui ka asfaltsegude katsetamiseks. Katseplaani on toodud tabelis 4.1, kus on ka vajadusel juurde märgitud kasutatud katsemeetodid. Katsed teostati vastavalt Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratoriumis, AS Tallinna Teede laboris ning AS TREV-2 Grupp laboris.

Tabel 4.1 Täitematerjalile, ringlussevõetud asfaldile, sideainele ja asfaltsegudele tehtud katsetused

Katse nimetus ja meetod	Standard
Lahustuva sideaine sisalduse määramine	EVS-EN 12697-1:2020
Terastikulise koostise määramine	EVS-EN 12697-2:2015 +A1:2019
Materjali spetsifikatsiooni määramine ringlussevõetud asfaldi korral	EVS-EN 13108-8:2016
Terastikulise koostise määramine sõelumismeetodiga	EVS-EN 933-1:2012
Bituumeni eraldamine rotaatoraurustiga	EVS-EN 12697-3:2013 +A1:2018
Nõelpenetratsiooni määramine	EVS-EN 1426:2015
Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga	EVS-EN 1427:2015
Tera kuju määramine plaatsusteguriga	EVS-EN 933-3:2012
Purunemiskindluse määramine Los Angelese meetodiga	EVS-EN 1097-2:2020
Terade tiheduse ja veeimavuse määramine	EVS-EN 1097-6:2022
Lihtsustatud petrograafiline meetod	EVS-EN 932-3:2022
Kulumiskindluse määramine; Põhjamaade katse	EVS-EN 1097-9:2014
Laboratoorne asfaltsegu segamine	EVS-EN 12697-35:2016
Proovikehade valmistamine lööktihendajaga	EVS-EN 12697-30:2018
Proovikehade valmistamine guraatortihendamisega	EVS-EN 12697-31:2019
Asfaltproovikehade mahumassi määramine: Meetod B	EVS-EN 12697-6:2020
Erimassi määramine: Meetod A	EVS-EN 12697-5:2018
Asfaltsegust proovikeha poorsusomaduste määramine õhuga täidetud pooride puhul ( $V_a$ )	EVS-EN 12697-8:2018

Tabel 4.1 järg Täitematerjalile, ringlussevõetud asfaldile, sideainele ja asfaltsegudele tehtud katsetused

Asfaltsegudest proovikehade veepüsivuse määramine: Meetod A	EVS-EN 12697-12:2018
Rattaroopa katse: väike seade, õhu keskkond	EVS-EN 12697-22:2020
Vastupidavus naastrehvide toimele: Meetod A	EVS-EN 12697-16:2016
Pragude levimine poolringikujulisel proovikehal paindekatsega	EVS-EN 12697-44:2019

## 4.2 Katsestandardid ja meetodid erinevat tüüpi laboratoorsete katsete läbiviimiseks

### 4.2.1 Lahustuva sideaine sisalduse ja terastikulise koostise määramine

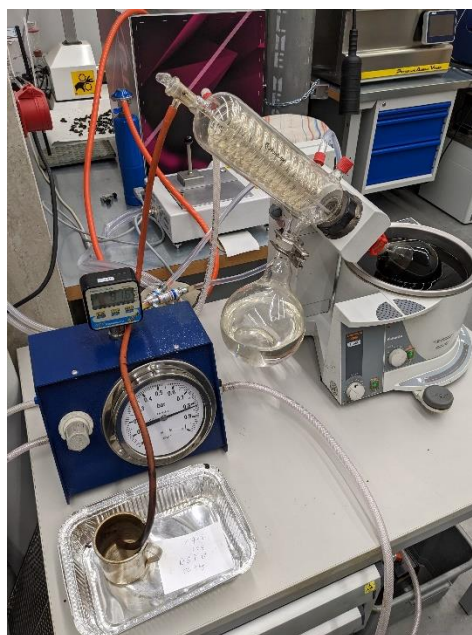
Esmalt teostati sideaine sisalduse ning terastikulise koostise määramine lähtudes standarditest EVS-EN 12697-1:2020 ja EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019. Esmalt objektilt tulnud katseproov kuivatatakse ning seejärel kaalutakse. Peale seda asetatakse katseproov joonisel 4.1 kujutatud ekstraktorisse, kus eraldatakse metüleenkloriidiga ekstraheerimise teel täitematerjal sideainest. Ekstraktorist tulnud täitematerjal kuivatatakse ja kaalutakse ning seejärel sõelutakse. Sõelumise tulemusena saadakse sõelte läbindid, millest lähtuvalt joonistub välja sõelkõver. Sõelte läbindid esitatakse summaarsete massiprotsentidena. [56], [57]



Joonis 4.1 Ekstraktor (erakogu)

#### 4.2.2 Bituumeni eraldamine

Bituumeni eraldamisel metüleenkloriidi lahusest lähtuti standardist EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018, kus peale lahustumatu tahke aine eemaldamist ekstraktoriga ekstraheerimise teel, jääb alles bituumeni ja metüleenkloriidi lahus. Seejärel eraldatakse lahuses üksteisest vaakumdestilleerimisega bituumensideaine ning metüleenkloriid, kasutades selleks joonisel 4.2 kujutatud rotaatoraurustit. Protsess viiakse läbi temperatuurivahemikus 85°C kuni 150°C, kus temperatuuri protsessi jooksul lineaarselt tõstetakse. Vaakumdestilleerimise protsess loetakse lõppenuks kui metüleenkloriid on lahusest eraldatud ning kolbi on järele jäänud puhas bituumen. [58]



Joonis 4.2 Rotaatoraurusti (erakogu)

#### 4.2.3 Materjali spetsifikatsiooni määramine ringlussevõetud asfaldi puhul

Materjali spetsifikatsiooni määramine toimub lähtudes standardist EVS-EN 13108-8:2016, mis käsitleb ringlussevõetud asfaldi. RA saadakse objektilt tulnud asfaldi töötlemise tulemusena, mida katsetatakse, hinnatakse ning klassifitseeritakse antud standardile kohaselt. Selle tulemusena saadakse kinnitus, kas antud materjali näol on tegemist sobiva materjaliga kasutamiseks asfaltsegudes. Ringlussevõetud asfaldi puhul on oluline ka tüki suurus, kus suurim tüki suurus on väikseim sõela ava, kus läheb läbi 100% materjalist. [59]

Kõigepealt kogu katseproov kuivatatakse. Seejärel tuleb materjali vastavalt hinnata ning määrata võõrlisandite olemasolu, sisaldus ja tüüp. [59] Saadud tulemus tuleb dokumenteerida ja tulemusest tulenevalt määrata ka kategooria, mis peab olema

vähemalt  $F_5$ . [15] Peale hindamist kaalutakse ringlussevõetud asfalt ning tuvastatud võõrlisandid eraldi. [59]

#### 4.2.4 Sõelumismeetodiga terastikulise koostise määramine

Lähtuvalt standardist EVS-EN 933-1:2012 toimub terastikulise koostise määramine sõelumismeetodiga. Antud meetodi eesmärgiks on sõelakomplekti kuuluvate erinevate avamõõtmetega sõeltega jaotada kogu katseproov mitmeks vähenevate mõõtmetega osaproovideks. Siinkohal kasutati sõelumiseks märga meetodit, kuid joonisel 4.3 toodud mehaaniline sõelumine toimub kasutades kuiva meetodit. Peale sõelumist võrreldakse iga sõela läbindi massi algmassiga ning tulemus esitatakse massprotsentides. Vastavalt saadud tulemustest joonistub välja ka sõelkõver. [60]



Joonis 4.3 Mehhaaniline sõelumine (erakogu)

#### 4.2.5 Nõelpenetratsiooni määramine

Sideaine penetratsioon määratakse lähtuvalt standardist EVS-EN 1426:2015, mis kirjeldab nii bituumeni kui ka bituumensideaine tihkuse leidmise meetodit. Bituumeni penetratsiooni määramine toimub taimeri, veevanni ning joonisel 4.4 kujutatud nõelpenetromeetriga. Antud lõputöö laboratoorsete katsetuste puhul on katsetatavad penetratsioonid väärtusega kuni 330 mm x 0,1 mm. [61]

Bituumen valatakse spetsiaalsesse katsetopsi ning asetatakse veevanni temperatuuriga 25°C. Ühe prooviga tehakse vastavalt kolm katset, kus penetromeetri külge kinnitud

nõel läbib bituumeni pinna. Siinkohal mõõdetakse nõela läbitungimist läbi katseproovi pinna kümnendikmillimeetrites 5 sekundi jooksul. [61]



Joonis 4.4 Nõelpenetromeetriga katseproovi penetratsiooni määramine (erakogu)

#### **4.2.6 Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga**

Lähtuvalt standardist EVS-EN 1427:2015, toimus pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga. Antud meetod on kujutatud joonisel 4.5. Kahte messingist valmistatud rõngasse valatakse bituumenit. Proovid asetatakse rõngaste hoidjaga vedelikuvanni, kus neid hoitakse enne katsetamist 15 minutit 5°C juures. Seejärel asetatakse proovid rõngaste hoidja abil anumasse, mis asetseb küttekehal, ning bituumenproovidele asetatakse peale teraskuulid. Kogu katseproovi temperatuuri hakatakse lineaarselt tõstma. Pehmenemistäpiks loetakse temperatuuride keskmist, kus mõlemad bituumeniproovid pehmenesid niivõrd, et proovide peal asetsevad teraskuulid koos bituumeniga vajusid alla standardis lubatud piiri. [62]



Joonis 4.5 Kuuli-rõnga meetodil pehmenemistäpi määramine (erakogu)

#### **4.2.7 Tera kuju määramine plaatsusteguriga**

Tera kuju määramine plaatsusteguriga toimub lähtudes standardist EVS-EN 933-3:2012. Juhindudes standardist, tuleb kogu kasteproov kõigepealt kuivatada ning seejärel kaaluda. Katseproov sõelutakse esmalt läbi mehaaniliselt, kasutades selleks vastavate avamõõtmetega sõelasid. Sõelumise eesmärgiks on jaotada proov erinevate fraktsioonidega väiksemateks osaproovideks. Peale esimest sõelumist toimub teine sõelumine kasutades selleks vastavate avadega varbsõelasid. [63]

#### **4.2.8 Purunemiskindluse määramine**

Purunemiskindluse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1097-2:2020, kust valiti purunemiskindluse määramise meetodiks Los Angelese katse. See on ühtlasi ka põhimeetodiks loodusliku ja tööstuslikult toodetud täitematerjali purunemiskindluse määramiseks. Katseproov koosneb teradest vahemikus 10 kuni 14 mm. Kõigepealt sõelutakse proov vastavalt standardile. Iga sõelutud osaproov pestakse ning kuivatatakse. Seejärel erinevad fraktsioonid segatakse omavahel ning valmistatakse katseproov massiga 5 kg. Proov asetatakse trumlisse koos 11 teraskuuliga. Trumlit pööratakse 500 korda ning peale pööritamist määratakse materjali jääk kasutades selleks 1,6 mm avadega sõela. [64]

#### **4.2.9 Terade tiheduse määramine**

Terade tiheduse ning veeimavuse määramisel lähtutakse standardist EVS-EN 1097-6:2022. Standardist lähtudes leitakse vastavalt katseproovi täitematerjalile

väljakuivatatud terade tihedus, küllastud pindkuivade terade tihedus ja terade näivtihedus. Selleks valiti vastavalt püknomeetrimetod 31,5 mm katsesõela läbinud ja 4 mm katsesõelale jäänud täitematerjali terade katsetamiseks. [65]

Kõigepealt osaproovi pestakse ning sõelutakse vastavalt standardis toodud nõuetele ning eemaldatakse suuremad terad, kui 31,5 mm. Seejärel jäetakse proov kuivama. Katseproov pannakse püknomeetrisse ning jäetakse sinna 24-ks tunniks. Peale seda püknomeeter täidetakse täielikult veega ning fikseeritakse mass. Püknomeetrist välja võetud täitematerjal asendatakse veega ja mass fikseeritakse uuesti. Veest välja võetud täitematerjal pannakse nõrguma kuni terade pind on kuiv. Kuivanud täitematerjal kaalutakse ning asetatakse kuivatuskappi. Pärast kuivatamist fikseeritakse terade mass uuesti. [65]

#### **4.2.10 Petrograafilise kirjelduse meetod**

Petrograafiline kirjeldus tehakse lähtudes standardist EVS-EN 932-3:2022, mis käsitleb looduslike täitematerjalide petrograafilise tüübi analüüsi põhimeetodit. Esmalt toimub katseproovi visuaalne uurimine, et selgeks teha selles esinevate kivimi või mineraali tüübid. Seejärel tuleb igat kivimitüüpi lähemalt uurida tehes seda standardis määratletud vahenditega. Katse eesmärgiks on kindlaks määrata proovi moodustavate peamiste koostisosade visuaalselt määratletavad omadused. [66]

#### **4.2.11 Kulumiskindluse määramine; Põhjamaade katse**

Jämetäitematerjali kulumiskindlus määratakse lähtuvalt standardist EVS-EN 1097-9:2014, mis kirjeldab naastrehvide toimel tekkivat abrasiivset hõõrdkulumist. Eelnevalt kaalutud ning sõelutud 11,2 mm kuni 16 mm täitematerjali pööritatakse joonisel 4.6 kujutatud trumlis, kuhu lisatakse veel 2 liitrit vett ja 7 kg teraskuule. Trumli siseseintele on kinnitatud lisaks 3 riba, mis aitavad kaasa segamisprotsessile. Trumlit pööritatakse 5400 pööret, mille tulemusel tekib materjali hõõrdkulumine. Pööritamise lõppedes sõelutakse katseproov läbi 2 mm sõela ning hinnatakse seeläbi kulumise tulemusena tekkinud massikadu protsenti. [67]





Joonis 4.6 Kulumiskindluse määramiseks kasutatav seade (erakogu)

## 4.3 Asfaltsegude katsestandardid ja meetodid

### 4.3.1 Laboratoorne katsesegu segamine

Laboratoorne asfaltsegu segamine toimub lähtudes standardist EVS-EN 12697-35:2016. Asfaltsegu laboratoorsel valmistamisel on oluline aspekt ajal ning temperatuuril. Segu segatakse lähtuvalt standardis määratud segamistemperatuuril, et täitematerjali ning sideaine lagunemine oleks minimaalne. Segamistemperatuuri valik sõltub paljugi segutüübist ning sideainest, mida kasutatakse. [68]

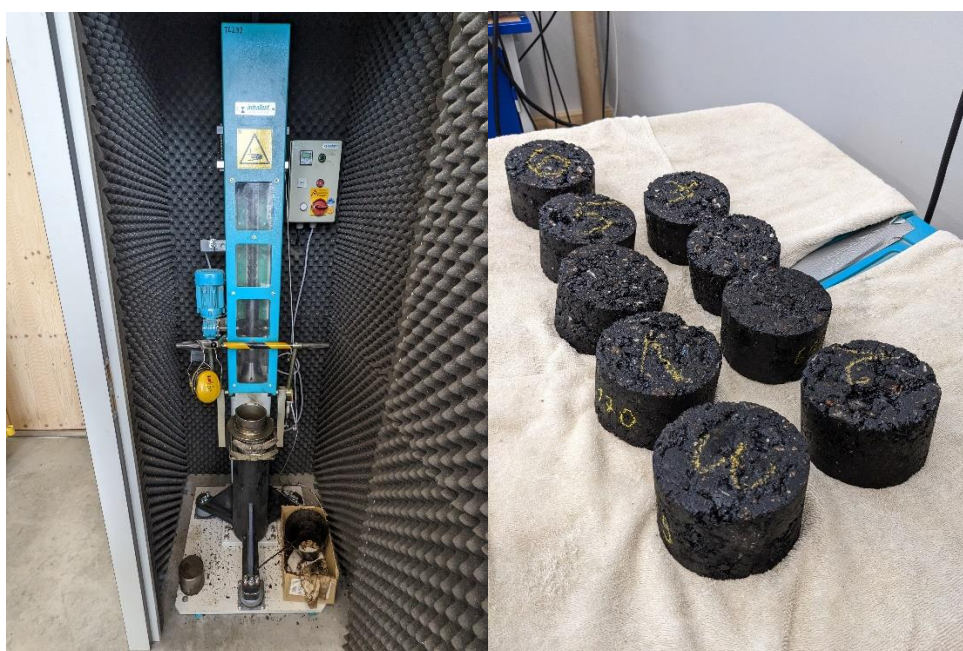
Juhul, kui segatav segu sisaldab ringlussevõetud asfalti, tuleb see eelnevalt purustada vajamineva fraktsioonini. RA kogus mida soovitakse segusse lisada, tuleb kõigepealt kuivatada ning seejärel kaaluda. Kaalutud kogus peab vastama bituumeni osakaalule ning olema kooskõlas kogu segu massiga. [68]

### 4.3.2 Proovikehade valmistamine lööktihendajaga

Standard EVS-EN 12697-30:2018 käsitleb endas asfaltsegust proovikehade valmistamist kasutades selleks joonisel 4.7 kujutatud lööktihendajat. Selle meetodiga valmistatud proovikehasid saab kasutada asfaldi tehnoloogiliste omaduste määramiseks. Proovikeha valmistamise eelduseks antud standardi järgi on nõue, et asfaltsegust, millest proovi soovitakse valmistada, peab sõelale jääma kuni 15% 22,4 mm terasuurusega materjali ja asfaltsegu terasuurus peab jääma alla 31,5 mm. [69]

Kõigepealt asfaltsegu kuumutatakse ning seejärel asetatakse tihendusvormi. Segu tihendatakse lööktihendajaga määratud aja jooksul kindel arv kordi. Peale tihendamist lastakse proovikehal jahtuda toatemperatuurini. [69]

Lööktihendajaga valmistati joonisel 4.7 kujutatud silindrilised proovikehad nii mahumassi kui ka veepüsivuse määramiseks. Lähtuvalt standardist EVS-EN 901-3:2021 on ette nähtud surf segust poorsusomaduste ja kulumiskindluse proovikehade valmistamiseks 2 x 50 lööki. Veepüsivuse jaoks valmistatavad proovikehadele on standardis määratud 2 x 35 lööki. Kuna kõik katsekehad valmistati asfaltsegust, mille bituumeni penetratsioon on 70/100, siis sellest lähtuvalt oli tihendamistemperatuuriks 145°C. [15]



Joonis 4.7 Katsekehade valmistamine lööktihendajaga (erakogu)

### 4.3.3 Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega

Standard EVS-EN 12697-31:2019 kirjeldab proovikeha tihendamist joonisel 4.8 kujutatud güraatortihendajaga. Standardis kirjeldatud meetod on kasutusel, et määrata asfaltsegu poorsust. Güraatortihendamine kujutab endast asfaltsegu soojendamist ning seejärel tihendamist silindrilises vormis ette antud konstantsel temperatuuril. Tihendamine toimub madala staatilise surve all, kus paralleelselt mõjub ka nihkedeformatsioon. Kõigepealt asfaltsegu kuumutatakse ning seejärel asetatakse tihendusvormi. Segu tihendatakse määratud aja jooksul kindel arv kordi. Peale tihendamist lastakse proovikehal jahtuda toatemperatuurini. [70]

Joonisel 4.8 kujutatud proovikehad valmistatakse standardis määratud kõrgusega või tihedusega. Antud standardi järgi saab proovikehi valmistada juhul kui asfaltsegu terade suurim mõõde jääb alla 31,5 mm. [70]



Joonis 4.8 Guraatortihendamise seade ning valmistatud katsekehad (erakogu)

Guraatortihendajaga valmistati proovikehad pragunemistugevuse määramiseks. Tulenevalt sellest, et standard EVS-EN 901-3:2021 ei näe ette guraatortihendajaga surf segudest proovikehade valmistamist, valiti ise pöörete arvuks 60. Pöörete arvu valik tulenes sellest, et antud standardis on surf segule kõige sarnasem segu, millel pöörete arv määratud, AC 32 base segu. Sellest tulenevalt otsustati ka antud lõputöö raames valida 60 pööret surf segust proovikehade valmistamiseks.

#### 4.3.4 Mahumassi määramine

Standard EVS-EN 12697-6:2020 käsitleb endas katsemeetodeid, läbi mille määratakse asfaltproovikehade mahumassi. Antud uurimistöös raames oli vaja määrata mahumassi, et hiljem arvutada välja jäävpoorsus. Mahumassi katsetuste jaoks valiti meetod B ehk mahumassi määramine immutatud ja kuivatatud pinnaga proovikehadele (SSD). Vastavat meetodit kasutatakse kinnise pinnaga proovikehade puhul. Proovikeha asetatakse toatemperatuuriga veevanni ning lastakse vees küllastuda. Antud lõputöö raames valiti küllastumise ajaks 30-45 minutit. Küllastumine toimub seni kuni proovikehade mass enam ei muutunu. Peale seda proovikeha mass fikseeritakse. Proovikeha kuivatatakse seemisnahkse lapiga ning seejärel fikseeritakse proovikeha mass uuesti. [71]

### **4.3.5 Erimassi määramine**

Standard EVS-EN 12697-5:2018 kirjeldab katsemeetodit, millega saab leida asfaltsegu erimassi ehk poorideta massi. Erimassi määramine oli oluline, et hiljem arvutada välja jäävpoorsus. Antud lõputöö raames valiti erimassi määramise meetodiks meetod A: mahuline meetod. Selle meetodi raames kasutatakse erimassi leidmiseks püknomeetrit. Esmalt kaalutakse tühi püknomeeter, seejärel koos katseprooviga ning hiljem lisatakse ka vesi ning eemaldatakse vaakumiga püknomeetris olev õhk, siis asetatakse püknomeeter toatemperatuuriga veevanni 30-ks kuni 180-ks minutiks. Kogu protsessi vältel fikseeritakse iga etapi lõpus püknomeetri kaal. [72]

### **4.3.6 Poorsusomaduste määramine**

Poorsusomaduste määramine on käsitletud standardis EVS-EN 12697-8:2018. Antud lõputöö raames valiti õhuga täidetud pooride ehk poorsuse leidmise meetod. Asfaldi proovikehade poorsus ehk jäävpoorsus leitakse sooritades vastav arvutustehe, erimassi ja mahumassi tulemuste alusel. [73]

### **4.3.7 Veepüsivuse määramine**

Standard EVS-EN 12697-12:2018 käsitleb kolme katsemeetodit, et määrata veega küllastamise ja kiirendatult vastavatesse tingimustesse viimise mõju. Antud lõputöö raames valiti veepüsivuse määramiseks meetod A. See seisneb asfaltsegudest silindriliste proovikehade kaudse tõmbetugevuse katsetamises. [74]

Silindrilised katsekehad jaotatakse kahte gruppi, millest pooled katsekehad moodustavad märja ja teised kuiva grupi. Märja gruppi kuuluvad proovikehad asetatakse veevanni, kus nad veega küllastuvad 40°C juures 72 tundi. Samal ajal hoitakse kuiv grupp toatemperatuuril kuivas. Enne katsetamist asetatakse mõlema grupi proovikehad koos neljaks tunniks 15°C juurde joonisel 4.9 kujutatud veevanni. Kuiva grupi proovikehad asetatakse enne veevanni panemist veekindlasse kotti, et kaitsta proovikehasid märgumise eest. Seejärel määratakse kõigile proovikehadele kaudne tõmbetugevus kasutades selleks joonisel 4.9 kujutatud katseaparatuuri. Katsetamise eesmärgiks on määrata nii märja kui ka kuiva grupi kehade kaudsete tõmbetugevuste suhe protsentides, et eelkõige hinnata vee mõju asfaltsegu omadustele. [74]



Joonis 4.9 Veepüsivuse määramine (erakogu)

### 4.3.8 Deformatsioonikindluse määramine

Standard 12697-22:2020 käsitleb koormuse all asfaltsegude deformatsioonikindluse määramiseks kasutatavaid katsemeetodeid. Antud katsemeetodid sobivad rakendamiseks vaid segude puhul, kus suurim teramõõt on 32 mm. Deformatsioonikindluse määramine käib rattarooma sügavuse järgi, mis tekib, kui proovikehale, mõõtmetega 260 mm x 320 mm x 60 mm, rakendatakse koormatud rattas, mis teeb korduvläbikuid konstantsel temperatuuril. [75]

Standardi järgi on deformatsioonikindluse määramiseks kolm alternatiivset seadmetüüpi. Antud lõputöö raames valiti joonisel 4.10 kujutatud meetod B, mis käsitleb katsetamist väikese seadmega ning õhu keskkonnas. Katse kestab 11 tundi, millest 4 tundi kulub katsekeha soojendamisele temperatuurini, milleks on vastavalt 50°C. Seejärel kulub 7 tundi katsekehal koormatud rattaga korduvläbikute tegemisele. Katse tulemus selgub mõõtes proovikehal tekkinud koormatud ratta poolt tekitatud rattarooma sügavust. [75]



Joonis 4.10 Deformatsioonikindluse määramine väikse seadmega õhu keskkonnas (erakogu)

#### **4.3.9 Kulumiskindluse määramine**

Standard EVS-EN 12697-16:16 keskendub kahe katsemeetodi kirjeldamisele, kus silindrilisi asfaltsegudest proovikehade vastupidavust katsetatakse naastrehvide kulutavale toimele. Katse sobib asfaltsegule, mille suurim teramõõt on 22 mm. Antud lõputöö raames teostati kulumiskindluse määramine vastavalt kasutades meetodit A, mis pärineb Pralli meetodist. Meetod A kujutab endast silindrilise proovikeha asetamist vette, kus seda hoitakse enne katsetamist vähemalt 5 kuni 72 tundi 5°C juures. Seejärel toimub kulutamine 15 minutit 40 teraskuuliga 5°C juures joonisel 4.11 kujutatud aparatuuriga. Peale katse lõppu mõõdetakse mahukadu milliliitrites läbi mille leitakse proovikeha kulumismäär. [76]



Joonis 4.11 Kulumiskindluse katsetamiseks kasutatav aparatuur (erakogu)

#### **4.3.10 Pragunemistugevuse määramine**

Standard EVS-EN 12687-44:2019 kirjeldab katsemeetodit, kus kasutatakse poolringikujulise katsekeha painutamist leidmaks asfaltsegust proovikeha tõmbe- ja purunemistugevust. Selle katsemeetodi eesmärgiks on hinnata pragude levimise võimalusi. Katse põhjal on võimalik arvutada maksimaalne koormus, millele suudab mehhaaniliselt tekitatud praoga proovikeha vastu pidada. [77]

Poolsilindrikujulisele katsekehale tehakse keskele löige. Seejärel asetatakse katsekeha veekindlasse kotti, et kaitsta seda märgumise eest. Katsekeha hoitakse 4 tundi veevannis temperatuuriga 5°C. Katsetamise käigus rakendatakse kuivale katsekehale joonisel 4.12 kujutatud kolmepunktipainutust nii, et katsekehal tekib põhja keskosale tõmbepinge. Seeläbi tekib joonisel 4.12 kujutatud pragunemine, läbi mille on võimalik hinnata pragude levikuvõimalusi. [77]



Joonis 4.12 Pragunemistugevuse määramine (erakogu)

#### 4.4 Rejuvenaatoritele doseerimiskoguste määramine

Rejuvenaatorite doseerimiskoguse määramiseks on erinevaid meetodeid ning selle annab enamasti ette rejuvenaatori tootja. Rejuvenaator A puhul andis tootja ette näite, mille alusel tuli ise vajaminev kogus arvutada. Rejuvenaator B puhul edastas tootja arvutustabeli. Lähtuvalt tabelisse sisestatud andmetest näitas tabel, kas ja kui palju tuleks rejuvenaatorit segusse lisada. Rejuvenaator C puhul tuli täita tootja poolt edastatud tellimusleht ning saata see tootjale tagasi, kust tuli tagasiside selle näol, kui suur peaks olema doseeritav kogus.

Rejuvenaator A puhul kasutati arvutusmudelit, kus tuli doseeritavaks koguseks 1%. Rejuvenaator B puhul näitas arvutustabel, et tulenevalt RA väga headest omadustest ei ole vaja rejuvenaatorit sideaine elavdamiseks kasutada. Rejuvenaator C puhul tuli tootjalt vastus, et doseerimiskogus võiks olla 1,1% kogu katsesegu bituumeni kogusest.

Rejuvenaator A puhul leiti doseerimiskogus segusse mineva bituumeni koguse kohta, mis kõikide segude puhul oli 5% 70 kg asfaldi kohta ning sellest tulenevalt saadi tulemuseks 1% ehk 35 g rejuvenaatorit. Rejuvenaator A puhul rakendatud arvutusmudel toetus tootja poolt määratud kommentaarile, et 1% rejuvenaatorit langetab kuuli-rõnga katse tulemusena saadud pehmenemistäppi 2°C. Tabelis 4.2 toodud algandmete põhjal toimus edasine arvutamine selleks, et leida optimaalne doseerimiskogus.



Tabel 4.2 Algandmed rejuvenaatori doseerimiskoguse leidmiseks

Bituumenit segus, %	5
Bituumenit RA-s, %	5,8
RA kuuli-rõnga katse, °C	50
Värske bituumeni kuuli-rõnga katse, °C	47,8
Soovitatav kuuli-rõnga katse, °C	47
Segu kogus, kg	70
Bituumeni kogus, kg	3,5
RA kogus, kg	35,3

Lähtuvalt algandmetest leiti, et segusse minev bituumen, milleks on 5% jaguneb omakorda vastavalt ringlussevõetud asfaldist tulevaks bituumeniks, milleks on 2,92% ehk 2,047 kg ning doseeritavaks värskeks bituumeniks, milleks on 2,08% ehk 1,453 kg. Segule leiti arvutuslikult kaalutud keskmine pehmenemistäpp ilma rejuvenaatorita, milleks saadi 49,1°C. Lähtudes tootja poolsest kommentaarist, et 1% rejuvenaatorit langetab pehmenemistäppi 2°C, siis kuna saadud arvutuslik kaalutud keskmine tulemus oli 49,1°C, oligi vaja vaid 1% rejuvenaatorit, et langetada kuuli-rõnga tulemust 2°C, et saada pehmenemistäpi väärtuseks 47°C.

Selleks, et lõputöö raames saaks kasutada kõiki kolme rejuvenaatorit, võeti vastu otsus määrata rejuvenaator B-le doseerimiskoguseks 1%. Otsus tulenes sellest, et hindamaks rejuvenaatori mõju ringlussevõetud asfaldi sideainele, otsustati võrdlusmomendi tekitamiseks määrata rejuvenaator B-le sama doseerimiskogus rejuvenaator A-ga.

Rejuvenaator B tootja poolse arvutustabeli miinuseks oli asjaolu, et tabelis ei olnud võimalik muuta värske bituumeni omaduste andmeid, kuna need olid tootja poolt fikseeritud. Sellest tulenevalt ei ühtinud lõputöös kasutatud värske bituumeni andmed tabelis tooduga. Tulenevalt rejuvenaator A ja B kattuvast doseerimiskogusest, otsustati ka rejuvenaator C doseerimiskogust langetada 1% peale, et tekiks parem võrdlus ka rejuvenaatorite endi vahel.

## 4.5 Seguretsepti koostamine

Lõputöö raames koostati kaks erinevat põhi seguretsepti. Vastavalt referentssegule AC 20 surf 70/100 ning segule, mis sisaldab 50% ringlussevõetud asfaldi ehk AC 20 surf RA 50% 70/100. Kolme rejuvenaatorit lisati vastavalt AC 20 surf RA 50% 70/100 segule. Seega valmistati katsetamiseks kokku 5 erinevat segu.

Ringlussevõetud asfaldi 50% sisalduse valik tulenes sellest, et kuna RA omadused olid niivõrd head, siis väiksema RA sisalduse korral poleks rejuvenaatorite mõju katsetulemuste põhjal niivõrd hästi välja tulnud. Samuti oli oluline roll ka RA kogusel,

millest tulenevalt oli ka 50% maksimaalne võimalik RA sisaldus nelja asfaltsegu valmistamiseks.

Lisas 2 on toodud AC 20 surf 70/100 koostatud seguretsept. Retsepti koostades olid olulised parameetrid vastavalt bituumeni sisaldus, milleks oli 5%, täitematerjali erinevate fraktsioonide sisaldus, filler ning sideaine lisandid. Täitematerjalide fraktsioonide sisaldus pandi paika lähtuvalt standard EVS-EN 901-3:2021 kehtestatud piirnormidest, mis Lisa 1 ja Lisa 2 graafikutes on tähistatud siniste katkendjoontega. Segu täitematerjalide sõelkõver, tähistatuna graafikutes roheline joonena, peab jääma piirnorme tähistavate katkendjoonte vahele. Samuti jälgiti graafikutes punast joont, mis tähistab väljundnormkoostist ning on ideaaliks sõelkõvera määramisel. AC 20 surf 70/100 segusse lisati ka fillerit 4,8%, mille lisamine tõstab segu täitematerjali peenosise sisaldust. Bituumenile lisati ka 0,4% Wetfix BE, mis on nakkeparandaja ning mille doseerimiskogus tuleneb segusse lisatavast bituumeni kogusest.

Lisas 1 on toodud seguretsept segule AC 20 surf RA 50% 70/100. Retsepti koostades tuli esmalt silmas pidada, et segu koosneb 50% ringlussevõetud asfaldist, millest tulenevalt muutuvad ka kõigi teiste komponentide doseerimiskogused. Kuna RA täitematerjal on freesimise ning kulumise tõttu purunenud väiksemateks fraktsioonideks, tuli vähendada ka juurdelisatava täitematerjali peenemate fraktsioonide lisamiskogust. Seetõttu tuli doseerida pigem jämedamaid fraktsioone. Tulenevalt peenosise kõrgest sisaldusest ei lisatud segusse fillerit. Täitematerjali sõelkõvera koostamisel lähtuti samuti piirnormidest ning väljundnormkoostisest, mis tähistas ideaalkõverat. Värske bituumeni lisamiskogus langes RA lisamisest tulenevalt ümardatult 2,1% peale. AC 20 surf RA 50% 70/100 retsepti kasutati, et valmistada ka kolm rejuvenaatoreid sisaldavat segu, kuhu lisati vastavalt 1% rejuvenaatoreid. Siinkohal ei mõjutanud rejuvenaatorite lisamine ühegi teise segukomponendi doseerimiskogust.

## **4.6 Katsesegude valmistamine**

Katsesegude valmistamine toimus AS TREV-2 Grupp laboris, kus selleks kasutati joonisel 4.13 kujutatud laboratoorset InfraTest segurit. Segude valmistamisel lähtuti standardist EVS-EN 12697-35:2016, mis käsitleb laboratoorset asfaltsegu segamist. Selleks, et segu valmistada tuli lähtuvalt retseptist arvutada segu valmistamiseks nii täitematerjali kui ka sideaine kogused. Kõiki katsesugusid valmistati 70 kg ning segamistemperatuuriks valiti 160°C. Segu valmistamiseks segati kõigepealt omavahel kuivalt täitematerjalid ning seejärel lisati bituumen, millele oli eelnevalt lisatud rejuvenaator ning nakkeparandaja.



Joonis 4.13 Katsesegude valmistamine(erakogu)

Esimese seguna valmistati AC 20 surf 70/100, mis on ühtlasi ka referentssegu. Segu täitematerjalide fraktsioonidele määrati doseeritavad kogused ning saadi vastavalt kokku 66,5 kg täitematerjali, mis sisaldab ka lisatud filleri kogust. Kuna sideaine sisalduseks valiti 5%, siis saadi bituumeni lisatavaks koguseks 3,5 kg. Samuti lisati ka nakkeparandajat Wetfix BE, mille lisatavaks koguseks saadi 14 g. Tabelis 4.3 on näidatud nii protsentuaalselt kui ka koguliselt segusse lisatud komponendid.

Tabel 4.3 AC 20 surf 70/100 komponentide sisaldus

<b>AC 20 surf 70/100</b>		
<b>Komponent</b>	<b>Protsent</b>	<b>Vajaminev kogus, kg</b>
0/4	36	23,94
4/8	9	5,99
8/16	35	23,28
16/22	15	9,98
Filler	5	3,33
Bituumen 70/100	5	3,50
KOKKU	100	70,00

Ringlussevõetud asfaldi sisaldavad segud valmistati samamoodi, nagu esimest tüüpi segu. Selleks tehti vastavad arvutused, et leida nii täitematerjali kui ka sideaine vastavad kogused. Tulenevalt sellest, et tegemist on ringlussevõetud asfaldi sisaldavate segudega, siis kogu täitematerjalist ehk 66,5 kilogrammist on vastavalt 50% RA ehk 33,25 kg. Värsket täitematerjal 33,25 kg jagati vastavalt segusse minevate täitematerjali fraktsioonide alusel, lähtudes lubatavatest maksimum ja miinimum piirmääradest. Ringlussevõetud asfaldi puhul arvestati ka RA bituumeni sisaldusega, milleks on kogu bituumeni kogusest 3,5 kilogrammist 2,92% ehk 2,04 kg. Samuti tuli

vähendada ka doseeritava värske bituumeni kogust, mis viidi 5% pealt 2,08% peale ehk 1,46 kg. Kuna RA sisaldas juba rohkelt peenosist, siis otsustati fillerit mitte lisada. Doseeritava nakkeparandaja Wetfix BE vajaminevaks koguseks leiti 14,1 g. Tabelis 4.4 on toodud nii protsentuaalselt kui ka koguseliselt AC 20 surf RA 50% 70/100 segu komponentide sisaldused.

Tabel 4.4 Segu AC 20 surf RA 50% 70/100 komponentide sisaldus

<b>AC 20 surf RA 50% 70/100</b>		
<b>Komponent</b>	<b>Protsent</b>	<b>Vajaminev kogus, kg</b>
0/4	8	5,32
8/16	25	16,63
16/22	17	11,31
RA	53,08	35,30
Bituumen 70/100	2,08	1,46
KOKKU	100	70,00

## **4.7 Katsetulemused**

### **4.7.1 Ringlussevõetud asfaldi täitematerjali ja sideaine katsetamine**

Ringlussevõetud asfaldi katsetuste tegemisel võeti aluseks Transpordiameti „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhis“, kus on välja toodud minimaalsed omadused, mis tuleb ringlussevõetud asfaldile määrata. Leida tuleb sideaine tüüp ning sisaldusprotsent, keksimine sideaine penetratsioon ning täitematerjali omadused. Sinna kuuluvad terastikuline koostis, peenosiste sisaldus, purunemiskindlus Los Angelese meetodil, külmakindlus juhul, kui veeimavus on suurem kui 1%, terade plaatsustegur, näivtihedus, veeimavus, samuti ka lihtsustatud petrograafiline kirjeldus ja vöörlisandite sisaldus. [17]

Tabelis 4.5 on välja toodud ringlussevõetud asfaldi terastikuline koostis, mille määramisel toetuti standarditele EVS-EN 12697-1:2020 ja EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019. Kõigepealt RA ekstraheeriti ning hiljem saadud täitematerjal sõeluti väiksemateks osaproovideks. [56], [57]

Tabel 4.5 Ringlussevõetud asfaldi täitematerjali terastikuline koostis

<b>Sõel, mm</b>	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3	8	12,5
<b>Läbind, %</b>	13,4	17	22	28	34	44	57	75	85	100

Tabelis 4.5 toodud tulemusi saab võrrelda standardi EVS-EN 901-3:2021 toodud lubatud AC surf täitematerjalile kehtestatud piirnormidega. Antud standardis on määratud AC surf segude lubatud sõelkõveraväljad ning minimaalne sideaine sisaldus. Tulemuste põhjal on näha et terastikuline koostis püsib lubatud piiride vahel, välja arvatud fraktsioon 0,063 mm, mille tulemus on 1,4% suurem, kui standardis lubatud. See võib olla tingitud sellest, et kuna tegemist on ringlussevõetud asfaldiga, siis tulenevalt freesimisest võis täitematerjal puruneda ja seeläbi suurenes ka peenosiste osakaal.

RA täitematerjali ja sideainega tehtud katsetuste tulemused on toodud vastavalt tabelis 4.6. Lähtudes standardis EVS-EN 12697-1:2020 kirjeldatud meetoditest, eraldati ringlussevõetud asfaldi katseproovist sideaine, mille sisalduseks mõõdeti 5,8%.

Tabel 4.6 Ringlussevõetud asfaldi katsetuste tulemused

<b>Katse</b>	<b>Tulemused</b>
Sideaine sisaldus (EVS-EN 12697-1:2020)	5,8%
Pehmenemistäpp kuuli-rõnga meetodil (EVS-EN 1427:2015)	50°C
Nõelpenetratsioon (EVS-EN 1426:2015)	63 dmm
Kulumiskindlus Nordic (EVS-EN1097-9:2022)	7,6%
Purunemiskindlus LA (EVS-EN 1097-2:2020)	25%
Tera kuju määramine plaatsusteguriga (EVS-EN 933-3:2012)	8%
Veeimavuse määramine (EVS-EN 1097-6:2022)	0,2%
Terade näivtihedus (EVS-EN 1097-6:2022)	2,71 Mg/m <sup>3</sup>
Väljakuivatatud terade tihedus (EVS-EN 1097-6:2022)	2,7 Mg/m <sup>3</sup>
Küllastunud pindkuivade terade tihedus (EVS-EN 1097-6:2022)	2,7 Mg/m <sup>3</sup>

Pehmenemistäpi määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1427:2015, kasutades selleks kuuli-rõnga meetodit. Katsetatava RA pehmenemistäpp saadi 50°C. Nõelpenetratsiooni määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1426:2015 ning penetratsiooniks saadi vastavalt 63 dmm.

RA täitematerjalide katsetamisel saadi kulumiskindlus Nordic tulemuseks 7,6%. Katse viidi läbi võttes aluseks standardit EVS-EN 1097-9:2022. Standardis EVS-EN 901-3:2021 on toodud AC surf segude lubatud kulumiskindluse maksimaalseks kategooriaks 3000 kuni 5999 AKÖL (aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus) puhul  $A_N 14$  [15]. Katsetulemus näitab, et katsetud täitematerjal vastab standardi nõudele.

Purunemiskindluse määramisel Los Angelese meetodiga lähtuti standardist EVS-EN 1097-2:2020 ning saadi tulemuseks 25%. Võttes aluseks standardi EVS-EN 901-3:2021, siis maksimaalne lubatud purunemiskindluse kategooria on  $LA_{25}$  [15]. Katsetulemus näitab, et katsetatud täitematerjali purunemiskindluse tulemus on piiripealne.

Täitematerjali tera kuju määramisel plaatsusteguriga lähtuti standardist EVS-EN 933-3:2012. Katse tulemuseks saadi vastavalt 8%. Tulenevalt standardist EVS-EN 901-3:2021, kus lubatud maksimaalne plaatsusteguri kategooria on  $Fl_{25}$  [15]. Sellest lähtuvalt saab öelda, et katse tulemus jääb lubatud normpiiridesse.

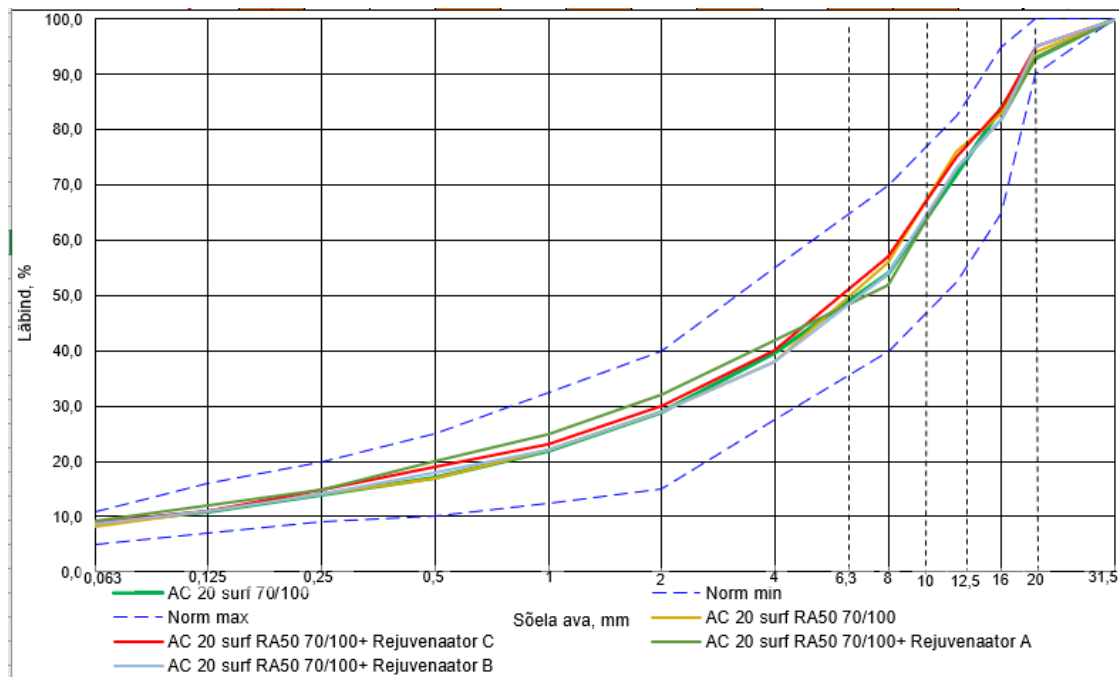
Täitematerjali veeimavuse, terade näivtiheduse, väljakuivatatud terade tiheduse ning küllastunud pindkuivade terade tiheduse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1097-6:2022. Katsetuste tulemuseks saadi, et terade veeimavus on 0,2%, terade näivtihedus on  $2,71 \text{ Mg/m}^3$ , väljakuivatatud terade tihedus ja küllastunud pindkuivade terade tihedus on mõlemal juhul  $2,7 \text{ Mg/m}^3$ .

Katsetatava RA seest võõrlisandeid ei tuvastatud, seega lähtuvalt standardist EVS-EN 1097-6:2022, saab öelda, et võõrlisandite kategooria on vähemalt  $F_5$  ning vastab nõuetele [66]. Lihtsustatud petrograafilise kirjelduse tulemusena saadi kinnitust, et kogu täitematerjali näol on tegemist tardkivi materjaliga.

Külmakindluse katset otsustati mitte teha tulenevalt piiratud aja ressursist ning antud lõputöö raames ei ole ka antud katsetus niivõrd olulise tähtsusega. See tuleneb sellest, et kuna tegemist on ringlussevõetud asfaldiga, siis antud täitematerjali on juba varem katsetatud ning sellest tulenevalt peaks materjal vastama ka nõuetele.

#### **4.7.2 Terastikulise koostise määramise tulemused**

Joonisel 4.14 on toodud kõikide katsetatud segude terastikulised koostised, mis on saadud ekstraheerimise teel lähtudes standarditest EVS-EN 12697- 1:2020 ja EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019. Joonisel 4.14 on toodud katkendjoontega norm miinimum ja maksimum piirid, mis piiritlevad asfaltsegu lubatud sõelkõvera välja. Kõikide segude sõelkõverad on tähistatud vastavate eri värvi joontega. Võttes aluseks standardis EVS-EN 901-3 toodud AC 20 surf segu sõelkõverale kehtestatud lubatud piirinormid, saab öelda, et kõikide valmistatud segude ekstraheeritud täitematerjalide sõelkõverad on lähtuvalt standardist lubatud piirides.



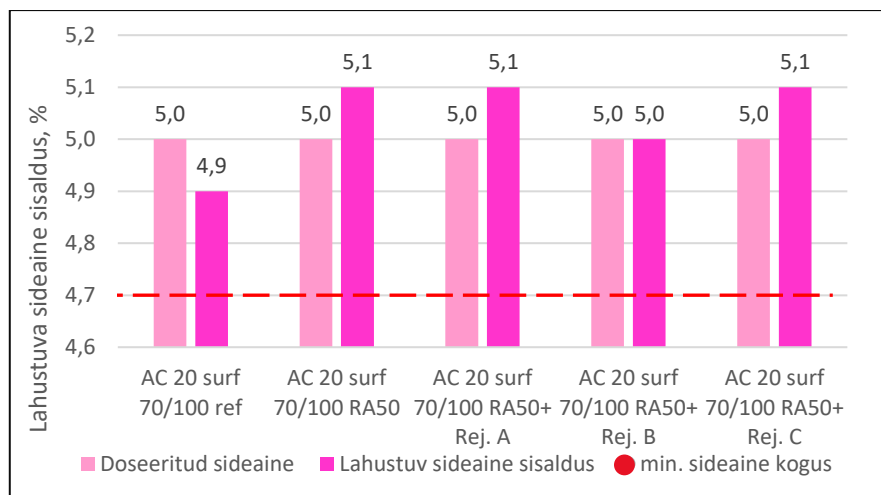
Joonis 4.14. Katsesegude ekraheerimise teel saadud täitematerjalide sõelkõver

Olukorras kus asfaltsegu sõelkõver läheb lubatud piiridest välja, võib tulemuseks olla mittevastavus ka teistel segu omadustel. Juhul kui segusse lisatakse liiga palju peenosist või liiga vähe jämetäitematerjali on tulemuseks peenosise ülekaal ehk peenosisega täidetud poorid. See võib omakorda negatiivselt mõjutada ka jäävpoorsuse näitajat ning deformatsioonikindluse tulemust.

Olukorras kus peenosist on lisatud segusse liiga vähe või on lisatud jämetäitematerjali liiga palju, võib see tekitada probleemi, et segu on liiga poorne. Selle tulemusena saab vesi tungida sügavale asfaldi pooridesse ning talviste külmumis-sulamis tsüklitega võivad seetõttu asfaltkattes tekkida erinevad defektid.

### 4.7.3 Lahustuva sideaine sisalduse määramise tulemused

Joonisel 4.15 on välja toodud kõikide katsesegude sideaine sisalduse võrdlused. Kõrvutatud on nii doseeritud sideainesisaldus kui ka sideaine, mis eraldati hiljem segust ekstraheerimise teel.



Joonis 4.15 Kõikide segude lahustuva ja doseeritud sideaine sisalduse võrdlus

Võttes aluseks standardi EVS-EN 901-3:2021 on välja toodud AC 20 surf minimaalne lubatud sideaine sisaldus, milleks saadi arvutuslikult 4,7%. Antud miinimum sideaine kogus saadi tulenevalt standardis ette nähtud sideaine korrigeerimise tulemusel, lähtudes siinjuures täitematerjali kaalutud keskmisest tihedusest. Kõigepealt leiti täitematerjali kaalutud keskmine osakeste näivtihedus, mis saadi vastavalt 2,705 Mg/m<sup>3</sup>. Seejärel kasutati valemit 4.1 leidmaks sideaine miinimumkogust. Selleks tehti valemis 4.1 toodud tehe ning vastuseks saadi ümardatult 0,98, mis korrutati omakorda standardis toodud miinimumiga, mis on 4,8% ning saadi vastuseks korrigeeritud miinimum sideainesisaldus väärtusega 4,7%. [15]

$$\alpha = \frac{2,650}{\rho_a}, \quad (4.1)$$

kus

$\rho_a$  on täitematerjali kaalutud keskmine osakeste näivtihedus megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m<sup>3</sup>)

2,650 täitematerjali kaalutud keskmine tihedus megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m<sup>3</sup>). [15]

Joonisel 4.15 on näha, et kõikide katsetatud segude sideainesisaldused on lubatud miinimumist suuremad. Referentssegu AC 20 surf 70/100 puhul on doseeritav sideaine kogus olnud suurem 0,1%, kui lahustuval sideainel. See tuleneb sellest, et nii laboratoorsel kui ka tehases toodetud segudel esineb alati bituumeni kadu. Siinkohal on oluline, et esinev kadu ei oleks suurem kui standardis EVS-EN 901-3:2021 lubatud nelja proovi keskmine hälve, mis on peeneteraliste segude puhul  $\pm 0,3\%$  [15]. Sellest tulenevalt on referentssegu puhul esinev sideaine kadu lubatud piirides.

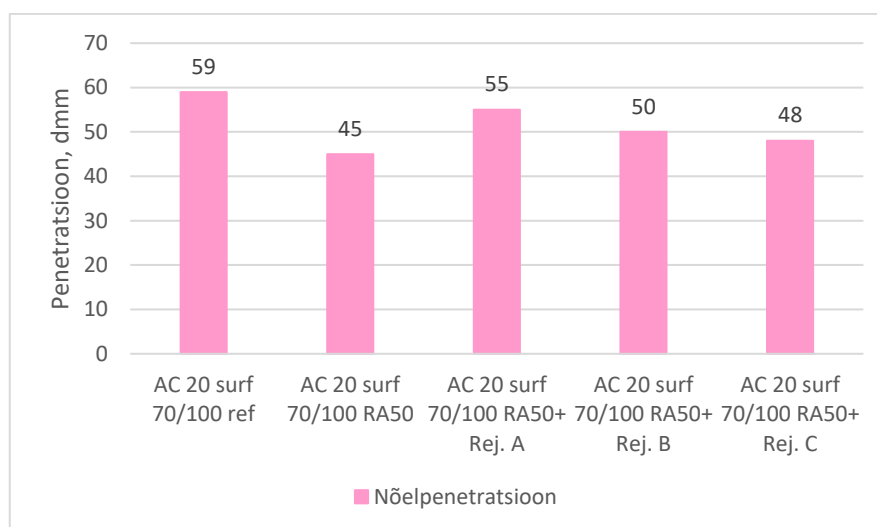


AC 20 surf RA 50% 70/100 ning rejuvenaator A, B ja C segude puhul on näha, et doseeritavaks sideaineks on olnud 5,0%, kuid peale katsesegu ekstraheerimist on sideaine sisalduseks 5,1%. See tuleneb sellest, et segule lisati ringlussevõetud asfalti. Siinkohal võis doseeritav RA sisaldada rohkem bituumenit, mis asfaltsegusse lisamisel sulab ning seguneb värskelt lisatava bituumeniga, mis omakorda toob kaasa sideaine massiprotsendi suurenemise.

Olukorras, kus näiteks sideaine sisaldus oleks segu kohta liiga suur, toob see endaga kaasa olukorra, kus täitematerjali terad ei puutu omavahel kokku ning terad hõljuvad bituumeni sees, mis võib kaasa tuua madala deformatsioonikindluse. Juhul kui segu sideainesisaldus on alla lubatud miinimumi, on tulemuseks liiga kuiv segu, millel on halb töödeldavus ning on aldis pragunemisele. [78]

#### 4.7.4 Nõelpenetratsiooni tulemused

Kõikide nõelpenetratsioonide määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1426:2015 kirjeldatud meetodist. Katsetamisel saadud nõelpenetratsioonide tulemused on toodud joonisel 4.16. Katsesegudes kasutatud sideaine on penetratsiooniga 70/100, kuid peale sideaine segust eraldamist langeb sideaine penetratsioon tavaliselt ühe penetratsioonivahemiku.



Joonis 4.16 Katsesegude nõelpenetratsioonide tulemuste võrdlus

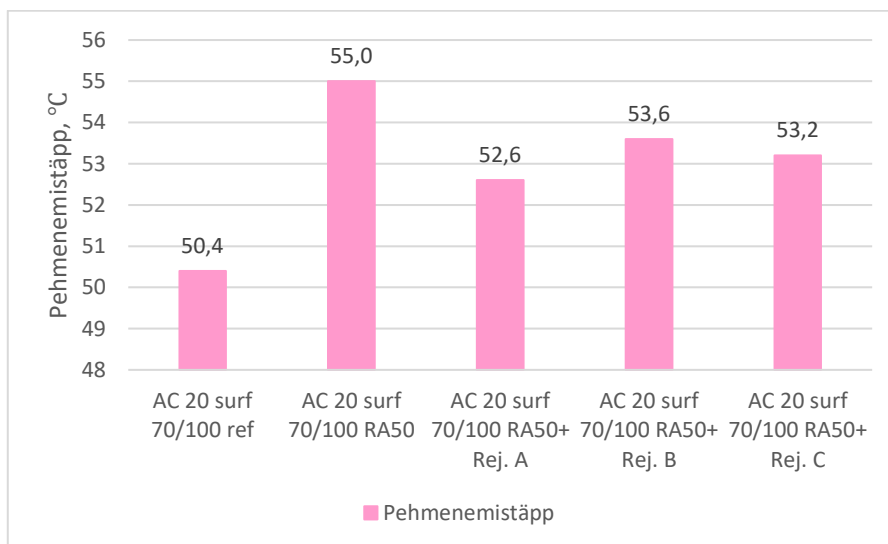
Joonisel 4.16 on näha, et kõige kõrgem penetratsioon on segul AC 20 surf 70/100, tulemuseks 59 dmm. Kõige madalam penetratsioon tuli segul AC 20 surf RA 50% 70/100, tulemusega 45 dmm. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude puhul jagunevad tulemused 55 dmm, 50 dmm ning 48 dmm. Antud tulemuste põhjal on näha, et rejuvenaatorite lisamine on tõstnud penetratsiooninäitajate väärtuseid, mille RA lisamine on alla viinud. Sellest saab järeldada, et rejuvenaatori lisamine on positiivselt

mõjunud bituumensideaine penetratsioonile, millest tulenevalt on penetratsioon tõusnud 3-10 dmm.

Segust ekstraheeritud sideainele pole kehtestatud standarditega maksimum ega ka miinimum lubatud piirmäärasid. Kuid olukorras, kus sideaine penetratsiooninäitaja on liiga kõrge, on sideaine pehmem ning see võib omakorda mõjutada negatiivselt deformatsioonikindluse näitajat. Olukorras kus aga penetratsiooni tulemus on madal, siis on tegemist jäigema sideainega ning see võib omakorda negatiivselt mõjutada pragunemiskindlust.

#### 4.7.5 Pehmenemistäpi määramise tulemused

Pehmenemistäpi määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1427:2015 kirjeldatud kuulirõnga meetodist. Joonisel 4.17 oleval graafikul on olemas kõigi viie katsetatud segude pehmenemistäpid.



Joonis 4.17 Katsesegude pehmenemistäppide võrdlused

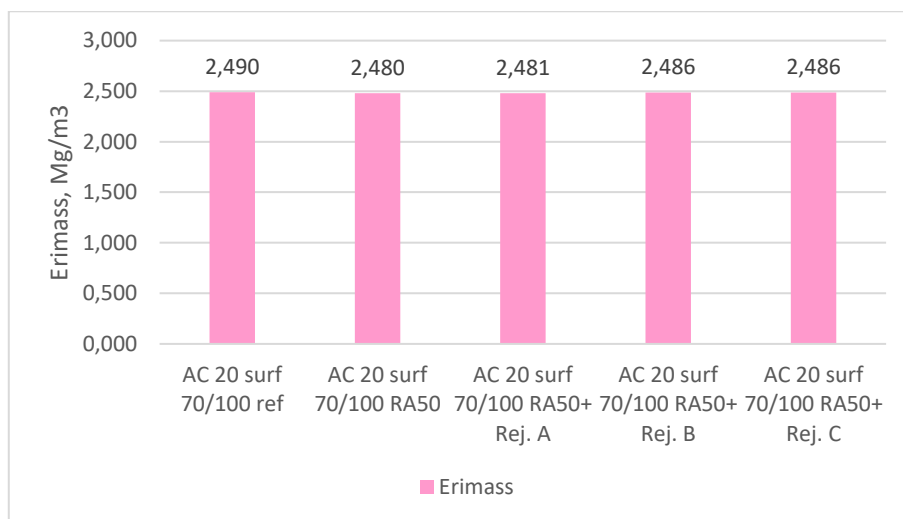
Joonisel 4.17 on näha, et kõige madalam pehmenemistäpp on AC 20 surf 70/100 segul, vastavalt 50,4°C. Kõige kõrgem pehmenemistäpp on AC 20 surf RA 50% 70/100 segul, vastavalt 55,0°C. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude pehmenemistäpid jagunesid vastavalt 52,6°C, 53,6°C ja 53,2°C. Tulemustest on näha, et rejuvenaatorite lisamine on langetanud pehmenemistäppi. Sellest saab järeldada, et rejuvenaatorite lisamine segudele on mõjunud ootuspäraselt. Tulenevalt rejuvenaatorite lisamisest on segude pehmenemistäpid langenud 2 - 3°C.

Pehmenemistäpi puhul pole kehtestatud Eestis standardiga vastavat miinimum- ega ka maksimummäära. Olukorras, kus pehmenemistäpi väärtus tuleb liiga madal võib tegemist olla liiga pehme bituumensideainega, mis võib mõjutada omakorda

deformatsioonikindlust. Samas, kui pehmenemistäpi väärtus tuleb liiga kõrge on tegemist jäigema bituumeniga, mis võib tingida segu väiksema pragunemiskindluse.

#### 4.7.6 Erimassi tulemused

Erimassi määramine toimus lähtuvalt standardist EVS-EN 12697-5:2018 ning määramiseks kasutati meetodit A. Joonisel 4.18 on kujutatud graafik, kus on kõrvutatud kõigi katsetatud segude erimasside väärtused.

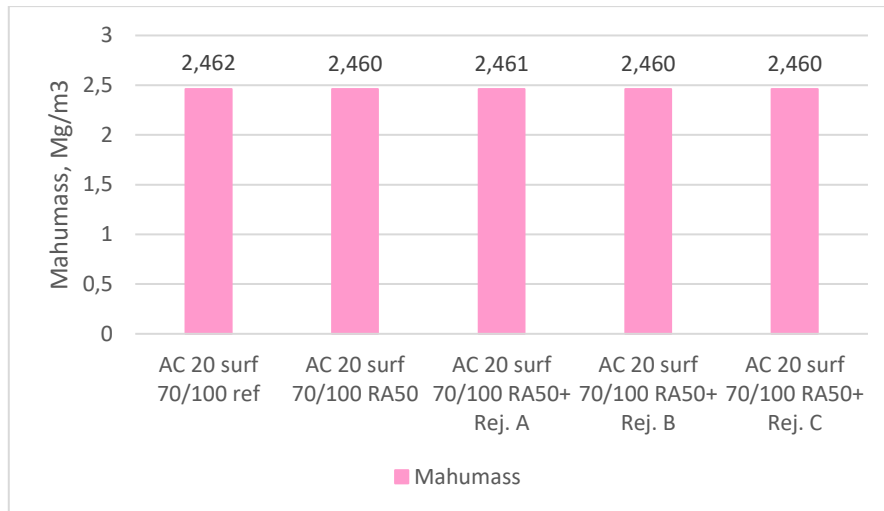


Joonis 4.18 Katsesegudele erimasside väärtused

Joonisel 4.18 on näha, et saadud erimasside väärtused on väga sarnased. Kõige suurem erimass on referentssegul AC 20 surf 70/100, vastavalt 2,490 Mg/m<sup>3</sup>. Kõige tuli erimass, aga segul AC 20 surf RA 50% 70/100, vastavalt 2,480 Mg/m<sup>3</sup>. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude erimassid jagunesid vastavalt 2,481 Mg/m<sup>3</sup>, 2,486 Mg/m<sup>3</sup> ja 2,486 Mg/m<sup>3</sup>. Kuna erimassi määramise eesmärgiks on hilisem jäävpoorsuse arvutamine, siis mõjutab erimassi tulemus otseselt jäävpoorsust ning kaudselt võib mõjutada ka deformatsioonikindlust.

#### 4.7.7 Mahumassi tulemused

Mahumassi määramisel lähtuti standardist EVS-EN 12697-6:2020 ning selleks kasutati standardi meetodit B. Joonisel 4.19 on kujutatud katsetamise tulemusena saadud mahumasside väärtused.

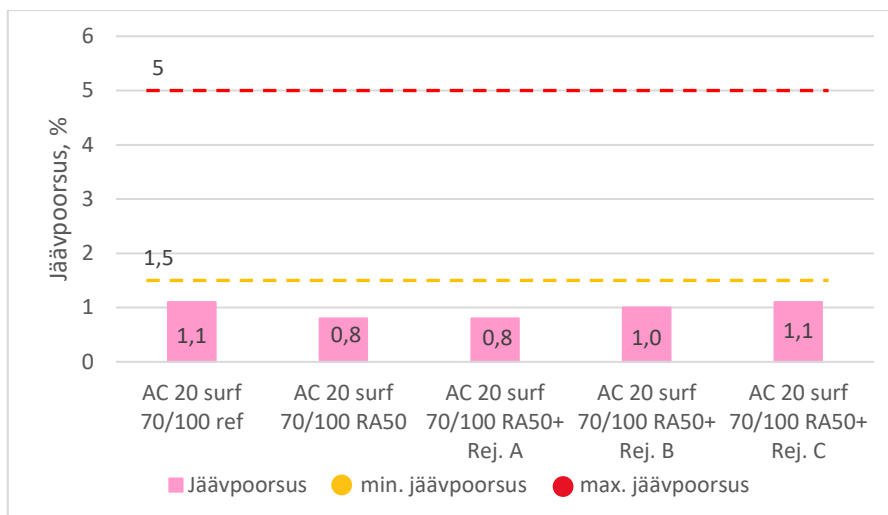


Joonis 4.19 Katsesegude mahumasside tulemused

Joonisel 4.19 on näha, et kõigi segude leitud mahumasside väärtused on väga sarnased. Kõige väiksemad mahumassid on saadud katsesegudele AC 20 surf RA 50% 70/100 ning ka rejuvenaatoreid B ja C sisaldavatele segudele. Tulemuseks saadi kolme segu puhul 2,460 Mg/m<sup>3</sup>. Kõige kõrgem mahumassi väärtus saadi segule AC 20 surf 70/100, vastavalt 2,462 Mg/m<sup>3</sup>. Kuna mahumassi määratakse, et hiljem arvutada jäävpoorsus, siis mõjutab mahumassi tulemus otseselt jäävpoorsuse tulemust ning kaudselt võib ka mõjutada deformatsioonikindlust.

#### 4.7.8 Jäävpoorsuse tulemused

Jäävpoorsuse näitaja kirjeldab õhupooride sisaldust asfaltkattes, ning vastav tulemus antakse protsentides [79]. Jäävpoorsuse määramisel lähtutakse standardist EVS-EN 12697-8:2018. Jäävpoorsuse leidmiseks on vajalik eelnevalt määrata mahu- ning erimassid. Joonisel 4.20 on kujutatud kõigi katsetatud segude jäävpoorsuse tulemused. Standardis EVS-EN 901-3:2021 on toodud välja vastavalt miinimum lubatud jäävpoorsus, kus  $V_{min}$  on 1,5% ning maksimum jäävpoorsus, kus  $V_{max}$  on 5% [15]. Lubatud maksimum ning miinimumpiirid on kujutatud joonisel 4.20 eri värvi katkendjoontega.



Joonis 4.20 Katsesegude jäävpoorsuse näitajad

Lähtudes saadud katsetulemustest on kõigi katsetatud segude jäävpoorsused alla lubatud normpiiri. Antud tulemused võivad olla tingitud sellest, et segudes kasutatud RA ei ole homogeenne ning seetõttu sattus segudesse liiga palju peenosist, mistõttu on segus liiga vähe poore ning sellest tulenevalt jäävpoorsuse näitajad liiga madalad.

Tulemuste põhjal saab järeldada, et rejuvenaatorid ei ole mõjutanud jäävpoorsuse näitajat. Katsetulemuste põhjal on näha, et segude projekteerimisel on tehtud viga. Antud olukorra vältimiseks oleks pidanud alandama bituumeni sisaldust ning tõstma jämedama täitematerjali osakaalu. See oleks taganud segu puhul suurema poorsuse, mis oleks omakorda tõstnud jäävpoorsuse näitajat. Olukorras, kus asfaltsegul on liiga väike või liiga suur jäävpoorsuse näitaja, võib mõlemal juhul olla segul sellest tulenevalt probleeme deformatsioonikindlusega.

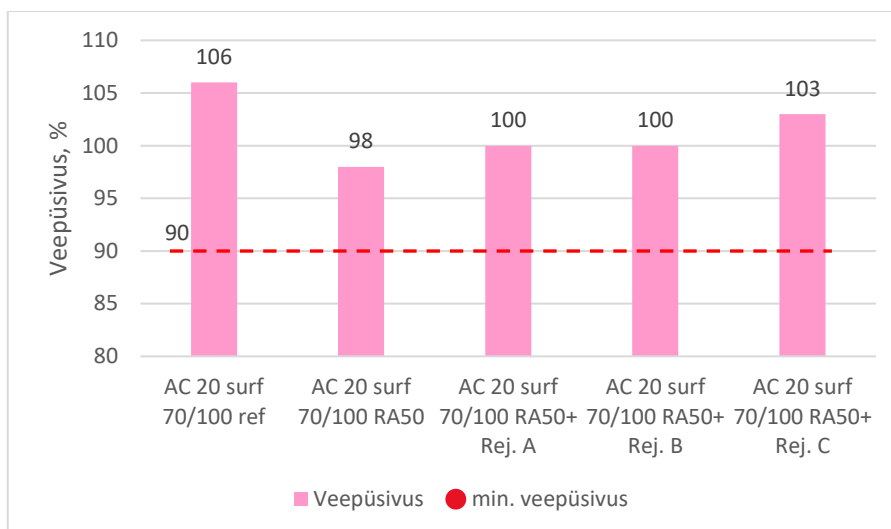
#### 4.7.9 Veepüsivuse tulemused

Veepüsivuse määramisel võetakse aluseks standard EVS-EN 12697-12:2018 ning selle määramiseks kasutati vastavalt meetodit A. Joonisel 4.21 on kujutatud katsetatud segudele saadud veepüsivuse tulemused. Lähtuvalt standardist EVS-EN 901-3:2021 on veepüsivuse lubatud miinimumväärtuseks 90% [15].

Lähtudes joonisel 4.21 kujutatud tulemustest on näha, et kõik katsetulemused on üle miinimumi. Kõige parem veepüsivus on referentssegul, vastavalt 106% ning kõige madalam AC 20 surf RA 50% 70/100, vastavalt 98%. Tulemuste põhjal on näha, et rejuvenaatorite lisamine on katsetulemusi positiivselt mõjutanud. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude tulemused saadi vastavalt 100%, 100% ja 103%.

Referentssegu parem veepüsivuse tulemus võrreldes ringlussevõetud asfaldi sisaldavate segudega, võib olla tingitud sellest, et referentssegu on poorem. Ringlussevõetud

asfaldi sisaldavate segude puhul võivad poorid olla bituumeni ning peenosisega täidetud ning sellest tulenevalt ka madalam veepüsivuse tulemus.



Joonis 4.21 Katsesegude veepüsivuse tulemused

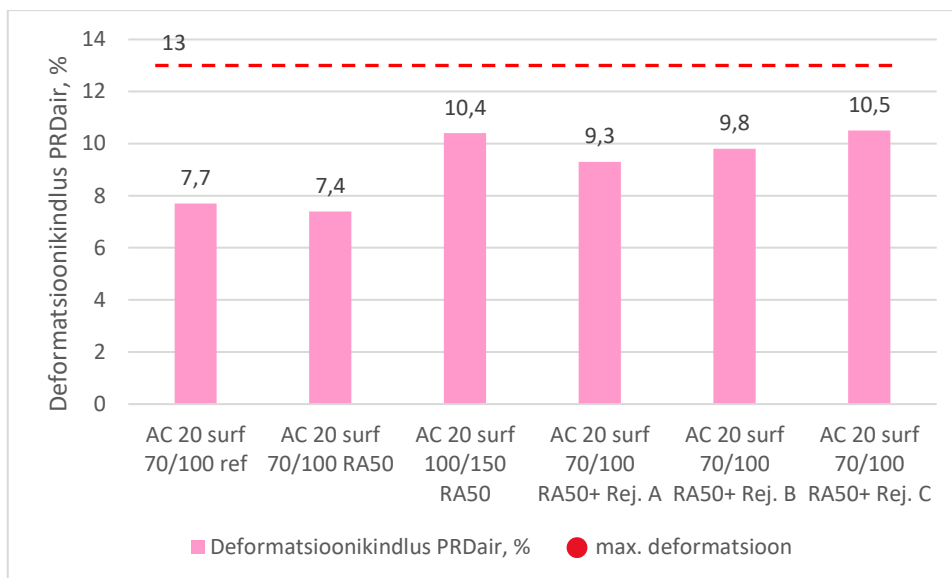
Olukorras, kus veepüsivuse näitaja on suur võib see olla ka tingitud asjaolust, kus vesi on pääsenud katsekeha sügavamatesse pooridesse. Katsetamise käigus katsekeha kokkusurumisel ei pääse vesi piisavalt kiiresti enam pooridest välja. Tekib vastupanujõud, mis realiseerub veepüsivuse näitaja tõusuna, kuna vesi ei ole kokkusurutav.

Olukorras kus veepüsivuse näitaja on liiga madal võib see olla tingitud asjaolust, et ajaperioodil kui proovikehad on asetatud veevanni tungib vesi läbi pooride täitematerjali ning sideaine vahele ning lõhub ära nendevahelise sideme, mille tõttu ei püsi proovikeha enam nii hästi koos ning ei suuda katsetamisel piisavalt suurt vastupanu esitada.

#### 4.7.10 Deformatsioonikindluse tulemused

Deformatsioonikindlust määratakse lähtuvalt standardist EVS-EN 12697-22:2020. Standardist valiti deformatsioonikindluse määramise meetodiks väike seade õhu keskkonnas.

Joonisel 4.22 on kujutatud kõigi katsesegude deformatsioonikindluste tulemused. Katsesegud projekteerimisel võeti arvesse standardis EVS-EN 901-3:2021 toodud. Võttes aluseks standardis esitatud aasta keskmise ööpäevasele liiklussageduse 3000 kuni 5999 autot, mille korral on lubatud deformatsioonikindluse maksimaalseks lubatud väärtuseks 13% [15]. Saadud katsetulemuste põhjal saab öelda, et kõik tulemused jäid alla lubatud maksimumi piiri.



Joonis 4.22 Katsesegude deformatsioonikindluse tulemuste võrdlus

Joonisel 4.22 on näha, et kõige deformatsioonikindlam segu on AC 20 surf RA 50% 70/100, tulemusega 7,4%. Deformatsioonidele kõige vastuvõtlikum segu on AC 20 surf RA 50% 70/100 + rejuvenaator C segu, tulemusega 10,5%. Teine kõige deformatsioonikindlam segu oli referentssegu tulemusega 7,7%. Rejuvenaator A segu puhul saadi tulemuseks 9,3% ning Rejuvenaator C segu puhul 9,8%.

Esmapilgul jäi katsetulemuste põhjal mulje, et kõige deformatsioonikindlamad segud on ilma rejuvenaatoriteta. Tulemuste põhjal võiks teha järelduse, et rejuvenaatorid mõjuvad deformatsioonikindlusele justkui negatiivselt.

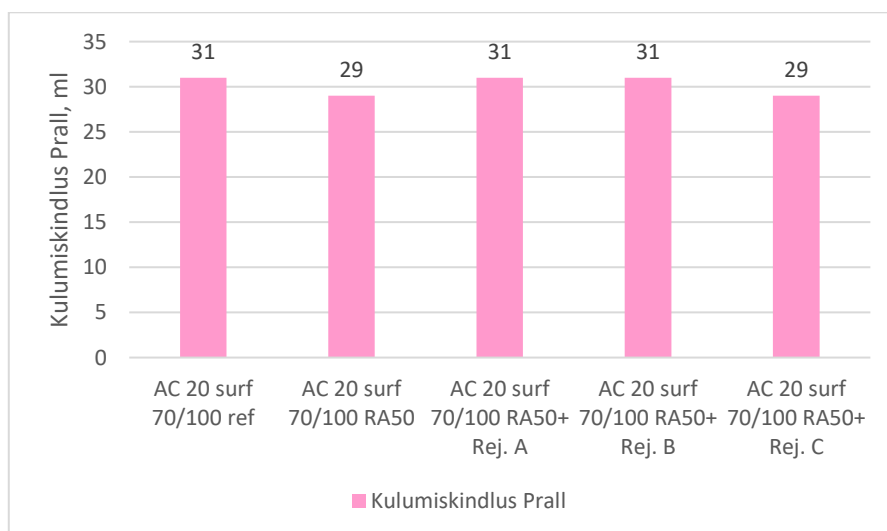
Selleks, et saada asjast paremat ülevaadet, kas rejuvenaatorid mõjutavad deformatsioonikindlust negatiivselt, otsustati valmistada üks lisasegu, milleks valiti AC 20 surf RA 50% 100/150. Lisasegu valmistamisel otsustati kasutada pehmema penetratsioonimargiga bituumenit. Otsus teha lisakatse tulenes sellest, et kuna katsetustes kasutatav RA on niivõrd heade omadustega, et rejuvenaatorite lisamine on minimaalne. Sellest tulenevalt tekkis kahtlus, et võib-olla on rejuvenaatorid RA bituumenit liialt pehmenanud, mille tulemuseks on nõrk vastupanu deformatsioonide tekkele. Olukorras kus katsetustes oleks kasutatud tugevalt vananenud bituumeniga ringlussevõetud asfalti, näiteks penetratsiooniga 20 dmm, siis oleks deformatsioonikindluse tulemus tulnud madalam ning poleks ka sedaviisi tähelepanu äratanud.

Joonisel 4.22 on näha, et oletus pidas paika. Katsetades pehmema bituumeniga katsese segu on tulemuseks ka halvem deformatsioonikindluse tulemus, vastavalt 10,4%. Katsetulemuste põhjal saab öelda, et katsetes kasutatud RA on niivõrd heade omadustega, et lähtudes deformatsioonikindluse tulemustest poleks rejuvenaatorite

kasutamine vajalik olnud. Tulenevalt katsetulemustest on näha, et rejuvenaator C on katseseгу deformatsioonikindluse näitajat alandanud vaid 0,1%. See võib tuleneda sellest, et rejuvenaatorid on erinevate toimemehhanismide ning omadustega. Rejuvenaator C suudab tõsta sideaine viskoosust, kuid samal ajal ei suuda muuta asfaltsegu deformatsioonikindlamaks. AC 20 surf RA 50% 70/100 tulemuse põhjal on näha, et RA lisamine on muutnud segu jäigemaks, seega saab öelda, et RA lisamine asfaltsegusse on positiivse mõjuga segu deformatsioonikindlusele.

#### 4.7.11 Kulumiskindluse tulemused

Kulumiskindluse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 12697-16:2016, kus valiti meetodiks A. Joonisel 4.23 on näha, et kõik katsetulemused on väga sarnaste väärtustega ning tulid vastavalt kõigil katseseгudel 29 ml või 31 ml. Kõrgema tulemuse said referentssegu ning A ja B rejuvenaatoreid sisaldavad segud. Madalama tulemuse said AC 20 surf RA 50% 70/100 segu ning rejuvenaator C segu. Tulemustest saab järeldada, et rejuvenaatori ega RA lisamine ei mõjuta segu kulumiskindlust.



Joonis 4.23 Katseseгude kulumiskindluste võrdlus

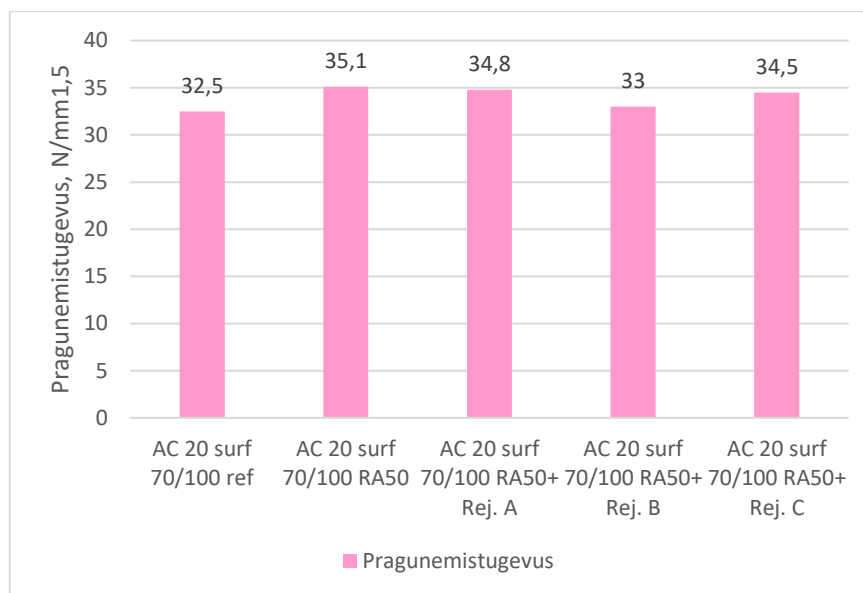
Olukorras kus kulumiskindluse tulemus tuleb liiga kõrge, on see soodsaks võimaluseks roobaste tekkele. Mida kõrgem on kulumiskindluse näitaja, seda rohkem on asfaltsegu vastuvõtlikum naelte kulutavale toimele.

#### 4.7.12 Pragunemistugevuse tulemused

Pragunemistugevuse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 12697-44:2019. Pragunemistugevuse katse eesmärk on uurida, kui vastupidav on juba pragunenud asfaltsegu edasise prao leviku osas ning kuidas olemasolev pragu võid edasi areneda [77]. Joonisel 4.24 esitatud tulemused on küll väga sarnased, kuid kõige parema pragunemistugevusega segu on vastavalt AC 20 surf RA 50% 70/100, tulemusega 35,1



$N/mm^{1.5}$ . Kõige nõrgema pragunemiskindlusega segu on referentsegu, tulemusega 32,5  $N/mm^{1.5}$ . Teised tulemused jaotusid vastavalt, et rejuvenaator A segu tulemuseks tuli 34,8  $N/mm^{1.5}$ . Rejuvenaator B segul 33,0  $N/mm^{1.5}$  ning rejuvenaator C segul 34,5  $N/mm^{1.5}$ . Juhul, kui pragunemistugevus tuleb väga madal, siis võib asfaltsegu olla väga vastuvõtlik edasisele pragunemisele.



Joonis 4.24 Pragunemistugevuse katsetulemuste võrdlus

## 4.8 Järeldused

Võttes arvesse kõiki katsetatud asfaltsegude tulemusi saab öelda, et kõik kolm rejuvenaatorit täitsid etteantud normatiivid ning sobiksid edasiseks katsetamiseks, mille lõppeesmärk võiks olla rejuvenaatorite kasutuselevõtt Eesti teedehitussektoris. Tulenevalt Eesti külmadest talvedest ning seetõttu esinevatest sulamis-külmumis tsüklitest peaks edasine uurimine kindlasti sisaldama ka temperatuuritundlikkust uurivaid katseid.

Rejuvenaatoritega ringlussevõetud asfaldi sideaine elavdamine andis oodatud tulemuse ning saab öelda, et kõik tehtud katsetulemused näitavad, et rejuvenaatorite kasutamine mõjub sideaine omadustele positiivselt. Ainus katse, mille tulemused ei olnud ootuspärased oli jäävpoorsuse katse. Jäävpoorsuse näitaja oli kõigil katsesegudel ühtmoodi alla lubatud piirnormi. Sellest tulenevalt saab öelda, jäävpoorsuse alla lubatud miinimumpiiri jäävad katsetulemused ei ole tingitud rejuvenaatorite mõjust bituumensideainele.

Madal jäävpoorsuse näitaja viitab sellele, et asfaltsegu on liiga vähe poore. See tuleneb liiga suurest peenosise ja sideaine ning liiga väikesest jämetäitematerjali sisaldusesest.

Sellest tulenevalt tuleks segudesse lisada rohkem jämetäitematerjali ning vähem bituumensideainet. Kokkuvõttes saab öelda, et rejuvenaatorid täitsid oma eesmärgi ootuspäraselt ning kindlasti tuleks andud valdkonda edasi uurida ning viia läbi veel põhjalikumaid katsetusi.

## 4.9 Edasine uurimine

Edasiseks rejuvenaatorite uurimiseks tuleks teostada erinevaid katseid, läbi mille tekiks veel põhjalikum arusaam, kuidas rejuvenaator sideainet mõjutab. Üheks selliseks katseks oleks standardis EVS-EN 12593:2015 kirjeldatud Fraass'i murdumistäpp, mis käsitleb bituumensideaine rabedust madalatel temperatuuridel. [80]

Bituumeni reoloogiliste omaduste põhjalikumaks uurimiseks tuleks teostada standardis EVS-EN 14770:2012 kirjeldatud *Betermination of complex shear modulus and phase angle- Dynamic Shear Rheometer (DSR)* ehk kompleksmooduli ja faasinurga määramine dünaamilise nihkereomeetriga [81]. Samuti standardis EVS-EN 14771:2012 kirjeldatud *Determination of the flexural creep stiffness- Bening Beam Rheometer (BBR)* ehk roomejäikuse määramine painduva tala reomeetriga [82]. Selleks, et saada parem ülevaade rejuvenaatoriga elavdatud bituumeni vananemise protsessist tuleks teostada ka standardis EVS-EN 14769:2012 kirjeldatav *Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV)* ehk kiirendatud bituumeni pikaajaline vanandamine survevanandusanuma abil [83].

Tulenevalt lõputöö raames katsetamisel kasutatud ringlussevõetud asfaldi headest näitajatest, saaks ka edasisel katsetamisel valmistada katsesegusid, mis sisaldaks veelgi suuremat protsenti ringlussevõetud asfaldi, nagu näiteks 75% kuni 100%. Selliste segude puhul tuleks veel paremini esile rejuvenaatori elavdav mõju vananenud sideainele.

Oluline oleks tulevikus rajada ka katselõik, kus oleks asfaltsegus kasutatud suur RA sisaldus, mida oleks elavdatud rejuvenaatoritega. Katselõiku saaks seeläbi jälgida ning hiljem analüüsida, et leida kas ja kuidas mõjutab rejuvenaatorite kasutamine asfaltkatte vastupidavust ajale ning keskkonnamõjudele. Samuti oleks võimalik jälgida kui kiiresti ning mil viisi tekivad esimesed defektid. Oluline oleks jälgida ka kuidas rejuvenaatorite kasutamine mõjutab asfaldi vastupidavust külmadele talvedele ning sellest tingitud sulamise-külmumis tsüklitele. Katselõigu rajamise näol oleks tegemist suure sammuga selle poole, et rejuvenaatoreid Eesti teedehituses kasutusele võtta.

Oluline oleks ka tähelepanu pöörata rejuvenaatorite majanduslikke ja keskkonda puudutavatele aspektidele. Selleks, et mõista kuidas rejuvenaatorite kasutamine võiks

mõjutada asfalteerimiskulusid, tuleks teha majanduslik analüüsi, kus tuleks välja tuua kas ja kui palju oleks võimalik tulenevalt rejuvenaatorite kasutamisest kulusid vähendada. Seda mõjutavad mitmed aspektid, nagu näiteks RA kvaliteet, kogus ning katendikiht kuhu RA lisatakse. Tähelepanu tuleks pöörata ka rejuvenaatorit puudutavale, nagu näiteks kust riigist toodet tarnima peaks ning mil viisil. Samuti on siinkohal olulised toote omadused ja hind. Need aspektid oleksid väga olulised lõpphinna väljakujunemisel.

Keskkonnaalaselt tuleks uurida kuidas rejuvenaatorite kasutamine mõjutaks keskkonda. Igal rejuvenaatoreid tootval ettevõttel on ka tehtud keskkonnaohutuse analüüs, kuid siinkohal oleks vaja uurida ohutust just Eesti kontekstis. Näiteks kas ja kuidas mõjutaks rejuvenaatorite kasutamine asfaldi tootmise protsessi. Seda tuleks uurida asfalditehastes, näiteks eralduvate gaaside ning aurude sisaldust kontrollides, selleks et leida kas rejuvenaatoritest tingituna muutuks asfaldi tootmine Eestis keskkonnale ning tervisele kahjulikumaks.

Samuti tuleks leida kõige efektiivsem viis rejuvenaatorite doseerimiseks, võttes arvesse Eestis kasutatavaid asfalditehaseid. Eesmärgiks võiks olla hea lahenduse leidmine asfaldi seisukohast ning teisalt peaks see olema ohutu nii keskkonnale kui ka tervisele. Samuti tuleks ka tähelepanu pöörata asfaldi laotamisprotsessile, et leida kas rejuvenaatoritest tulenevalt muutub asfaldi laotamisprotsess kuidagi ohtlikumaks. Näiteks töölisele, kes asfaldi laotamise protsessis osaleb või siis keskkonnale. Antud teemat saaks uurida näiteks analüüsides laotamisprotsessis eralduvate aurude koostist.

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöö raames uuriti rejuvenaatorite mõju ringlussevõetud asfaldis olevale vananenud bituumensideainele. Selleks valiti välja kolm rejuvenaatorit, mida uuriti läbi laboratoorse katsetamise. Magistritööle püsistati neli põhieesmärki, mis said töö käigus täidetud.

Lõputöö esimeses pooles anti ülevaade rejuvenaatorite olemusest, liigitamisest ning doseerimisvõimalustest. Samuti toodi lühidalt välja ka kolme lähiriigi senised kogemused. Töö teine pool keskendub laboratoorsele katsetamisele, kus toodi välja katseplaan, doseerimiskoguste leidmine, segureseptide koostamine, standardid, millest katsetamisel lähtuti ning anti ülevaade teostatud laboratoorsetest katsetustest ning saadud tulemustest. Lähtuvalt tulemustest koostati ka analüüs ning anti soovitused edasiseks uurimiseks.

Selleks, et saada paremat ülevaadet rejuvenaatorite mõjust vananenud bituumensideaine keemilisele ja füüsikalistele omadustele, otsustati valmistada viis erinevat katsesegu, mida kõrvutada ning analüüsida. Viiest segust üks oli vastavalt referentssegu. Neli segu sisaldasid 50% ringlussevõetavat asfaldi, millest omakorda kolm segu ka kolme rejuvenaatorit. Rejuvenaatoreid sisaldavate segude deformatsioonikindluse paremaks analüüsiks valmistati ka lisasegu AC 20 surf RA 50% bituumeniga 100/150. Täiendava katsetamise tulemusena leiti, et rejuvenaatorite kasutamine ei mõju negatiivselt deformatsioonikindlust.

Laboratoorse katsetamise tulemusena leiti, et kõik kolm rejuvenaatorit andsid ootuspärased tulemused ning sobiksid edasiseks katsetamiseks, mille eesmärk oleks veel põhjalikumalt rejuvenaatoritega elavdatud vananenud bituumenit uurida. Kõik katsetulemused jäid lubatud normide piiridesse, välja arvatud jäävpoorsus. Antud katse puhul jäi kõigi katsesegude jäävpoorsus alla lubatud miinimumi. Sellest tulenevalt saab väita, et jäävpoorsuse madalate tulemuste põhjuseks ei olnud rejuvenaatorite kasutamine. See võis tuleneda halvasti projekteeritud katsesegudest, kus segu sisaldas liiga palju sideainet ning peenosist ning liiga vähe jämedamat täitematerjali.

Autor ise jäi katseprotsessi ning tulemustega rahule, kuid näeb et edasisteks rejuvenaatorite katsetusteks tuleks seguresepti vastavalt korrigeerida ning teha muudatused jäävpoorsuse tulemuste parandamiseks. Selleks, et hinnata veel paremini rejuvenaatorite mõju ringlussevõetud asfaldile, oleks soovituslik edaspidi kasutada mitte niivõrd heade omadustega ringlussevõetud asfaldi. See on oluline selleks, et saaks paremini esile tuua rejuvenaatorite elavdavat efekti vananenud sideainele.

# SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to investigate the effect of rejuvenators on aged bituminous binder. For this purpose, three rejuvenators were selected and studied through laboratory testing.

In the first half of the thesis, the author gives an overview of rejuvenators' essence, classification and dosage options. The experiences of three neighbouring countries were also investigated. The second part of the thesis focuses on laboratory testing, where the testing plan, the methods used, and an overview of the performed laboratory tests and the obtained results are given.

In order to get a better overview of the effect of rejuvenators on the chemical and physical properties of the bituminous binder, five different test mixtures were prepared for comparison and analysis. One of the five mixtures was the reference mixture. Four mixtures contained 50% reclaimed asphalt and three of these also contained rejuvenators. An additional mix with 50% recycled asphalt was also prepared where the 70/100 penetration grade bitumen was replaced with 100/150 bitumen to better analyze the effect of rejuvenators on deformation resistance results.

As a result of laboratory testing, it was found that all three rejuvenators had the expected effect and are suitable for future use. All test results for the asphalt mixtures were within the permissible limits except for air voids content. The air voids contents of all the tested mixtures were below the allowed minimum. This means that the reason for the low air voids content was not due to using rejuvenators. Rather, this was caused by poor mixture design with the mixtures containing too much binder and fine particles and not enough coarse aggregate. Although the air voids content test is indirectly related to deformation resistance, it did not seem to effect the performance of the mixtures too much as the deformation resistance of the mixtures was still good.

The author herself was satisfied with the testing process and the results but sees that for further testing of rejuvenators, the mixture recipes should be adjusted accordingly to achieve the correct air void content. In order to better evaluate the effect of rejuvenators on reclaimed asphalt, it would be advisable to use reclaimed asphalt with not so good characteristics in the future. This is important to highlight the revitalizing effect of rejuvenators on aged binders.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] D. L. Bock, S. Vansteenkiste, N. Piérard ja V. Vanelstraete, „Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling,” Mai 2020. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/345982972\\_Categorisation\\_and\\_analysis\\_of\\_rejuvenators\\_for\\_asphalt\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/345982972_Categorisation_and_analysis_of_rejuvenators_for_asphalt_recycling). [Kasutatud 4 Mai 2023].
- [2] T. Blomberg, M. Makowska and T. Pellinen, "Laboratory simulation of bitumen aging and rejuvenation to mimic," 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516303416>. [Accessed 17 mai 2023].
- [3] European Asphalt Pavement Association (EAPA), "Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production," 2018. [Online]. Available: <https://eapa.org/the-use-of-rejuvenators-in-hot-and-warm-asphalt-production-2018/>. [Accessed 10 mai 2023].
- [4] A. I. Rajib, A. Samieadel, A. Zalghout, K. E. Kaloush, B. K. Sharma and E. H. Fini, "Do all rejuvenators improve asphalt performance?," 5 Oktoober 2020. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2020.1826348>. [Accessed 14 mai 2023].
- [5] M. Zaumanis, R. B. Mallick, L. Poulikakos and R. Frank, "Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures," 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814009854?via%3Dihub>. [Accessed 17 mai 2023].
- [6] I. L. Al-Qadi, Q. Aurangzeb, S. H. Carpenter, W. J. Pine and J. Trepanier, "IMPACT OF HIGH RAP CONTENT ON STRUCTURAL AND PERFORMANCE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES," juuni 2012. [Online]. Available: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Impact%20of%20high%20RAP%20contents%20on%20structural%20and%20performance%20properties%20of%20asphalt%20mixtures&author=I.L.%20Al-Qadi&publication\\_year=June%202012](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Impact%20of%20high%20RAP%20contents%20on%20structural%20and%20performance%20properties%20of%20asphalt%20mixtures&author=I.L.%20Al-Qadi&publication_year=June%202012). [Accessed 18 mai 2023].
- [7] W. R, W. JR and M. M, "Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content," NCHRP, 2013.
- [8] A. Behnood, „Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review,” Mai 2019. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/333241622\\_Application\\_of\\_rejuvenators\\_to\\_improve\\_the\\_rheological\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_asphalt\\_binders\\_and\\_mixtures\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/333241622_Application_of_rejuvenators_to_improve_the_rheological_and_mechanical_properties_of_asphalt_binders_and_mixtures_A_review). [Kasutatud 4 Aprill 2023].

- [9] N. S, Q. J, S. E, S. M, v. d. V. M, S. G and S. A, "Turning back time: rheological and microstructural assessment of rejuvenated bitumen," in *93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C, 2014.
- [10] X. X, Z. M, d. S. S and P. L, "Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders," 1 november 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236114006048?via%3Dihub>. [Accessed 17 mai 2023].
- [11] X. Cao, H. Wang, X. Cao, W. Sun, H. Zhu and B. Tang, "Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil," august 2018. [Online]. [Accessed 18 mai 2023].
- [12] M. Gong, J. Yang, J. Zhang, H. Zhu and T. Tong, "Physical-chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue," veebruar 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815306942>. [Accessed 18 mai 2023].
- [13] A. Behnood and M. M. Gharehveran, "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders," märts 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014305718318019>. [Accessed 17 mai 2023].
- [14] S. Akmaz, O. Iscan, M. A. Gurkaynak and M. Yasar, "The Structural Characterization of Saturate, Aromatic, Resin, and Asphaltene Fractions of Batiraman Crude Oil," 2009. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916460903330361>. [Accessed 17 mai 2023].
- [15] J. R. Willis, N. Tran and A. Taylor, "Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents," juuli 2014. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/289181463\\_Effect\\_of\\_rejuvenator\\_on\\_performance\\_properties\\_of\\_HMA\\_mixtures\\_with\\_high\\_RAP\\_contents](https://www.researchgate.net/publication/289181463_Effect_of_rejuvenator_on_performance_properties_of_HMA_mixtures_with_high_RAP_contents). [Accessed 14 mai 2023].
- [16] Eesti Standardikeskus, „Tee Ehitus. Osa 3: Asfaltsegud,” 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-901-3-2021>. [Kasutatud 1 mai 2023].
- [17] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud.Materjali spetsifikatsioon. Osa 1: Asfaltbetoon,” juuli 2016. [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-13108-1-2016>. [Kasutatud 16 mai 2023].
- [18] PANK RY, „ASFALTTINORMIT 2023,” %1 *ASFALTTINORMIT 2023*, Helsinki, 2023, pp. 107-108.
- [19] T. Pellinen, B. Timo and M. Makowska, "Laboratory simulation of bitumen aging and rejuvenation to mimic multiple cycles of reuse," 2016. [Online]. Available:

- [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516303416?ref=cra\\_js\\_challenge&fr=RR-1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516303416?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1). [Accessed 17 mai 2023].
- [20] S. Vegvesen, „Vegbygging. Håndbok N200,“ 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n200-vegbygging-juli-2018.pdf>. [Kasutatud 18 mai 2023].
- [21] T. Jørgensen ja T. H. Fiske, „KFA rejuvenatorprosjekt: Laboratorieprøving av forynget bitumen fra resirkulert asfalt,“ september 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2789083/734%20KFA%20rejuvenatorprosjekt.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Kasutatud 18 mai 2023].
- [22] A. F. Mirhosseini, S. A. Tahami, S. Dessouky ja C.-H. Ho, „Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator,“ 2019. [Vörgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/335234700\\_Performance\\_evaluation\\_of\\_asphalt\\_mixtures\\_containing\\_high-RAP\\_binder\\_content\\_and\\_bio-oil\\_rejuvenator](https://www.researchgate.net/publication/335234700_Performance_evaluation_of_asphalt_mixtures_containing_high-RAP_binder_content_and_bio-oil_rejuvenator). [Kasutatud 17 mai 2012].
- [23] O. Aslam ja M. Yousef, „Effekten av rejuvenatorer på aldrete bitumen,“ 2019. [Vörgumaterjal]. Available: [https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2606249/Masteroppgave\\_Omaad%20og%20Monir\\_%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2606249/Masteroppgave_Omaad%20og%20Monir_%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Kasutatud 16 mai 2023].
- [24] K. Lind, „Bitumenbundna lager.TDOK 2013:0529.Version 4.0.2020-10-12,“ Trafikverket, 2020.
- [25] PEAB, „UTVECKLING AV SBS-EMULSIONER MED REJUVENATORER Etapp 1,“ 31 oktober 2015. [Vörgumaterjal]. Available: [https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/57e656aa-a2f3-4920-86b4-b9a8c8baccb0/FinalReport/SBUF%2012866%20Slutrapport\\_Utveckling%20av%20SBS-emulsioner%20med%20rejuvenatorer%20Etapp%201.pdf](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/57e656aa-a2f3-4920-86b4-b9a8c8baccb0/FinalReport/SBUF%2012866%20Slutrapport_Utveckling%20av%20SBS-emulsioner%20med%20rejuvenatorer%20Etapp%201.pdf). [Kasutatud 17 mai 2023].
- [26] PEAB, „UTVECKLING AV EMULSIONER MED REJUVENATORER ETAPP 2,“ 8 januar 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1747441/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 17 mai 2023].
- [27] H. Asli, E. Ahmadinia, M. Zargar and M. R. Karim, "Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder," desember 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812005120>. [Accessed 18 mai 2023].
- [28] M. Bai, "Investigation of low-temperature properties of recycling of aged SBS modified asphalt binder," september 2017. [Online]. Available:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181731111X>.  
[Accessed 18 mai 2023].

- [29] T. Ma, X. Huang, Y. Zhao and Z. Yao, "Evaluation of the diffusion and distribution of the rejuvenator for hot asphalt recycling," 15 november 2015. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815303524>.  
[Accessed 18 mai 2023].
- [30] M. Zaumanis, R. B. Mallick and R. Frank, "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis," november 2014. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344914001505>.  
[Accessed 17 mai 2023].
- [31] S. Zhao, B. Huang, X. Shu and M. E. Woods, "Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures," januar 2016. [Online]. Available:  
[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515306651](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515306651). [Accessed 17 mai 2023].
- [32] H. A. Tabatabaee and T. L. Kurth, "Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen," 12 oktober 2016. [Online]. Available:  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2017.1304257>.  
[Accessed 17 mai 2023].
- [33] K.-A. Johnson and S. A. Hesp, "Effect of Waste Engine Oil Residue on Quality and Durability of SHRP Materials Reference Library Binders," desember 2014. [Online]. Available:  
[https://www.researchgate.net/publication/278397320\\_Effect\\_of\\_Waste\\_Engine\\_Oil\\_Residue\\_on\\_Quality\\_and\\_Durability\\_of\\_SHRP\\_Materials\\_Reference\\_Library\\_Binders](https://www.researchgate.net/publication/278397320_Effect_of_Waste_Engine_Oil_Residue_on_Quality_and_Durability_of_SHRP_Materials_Reference_Library_Binders). [Accessed 18 mai 2023].
- [34] Y. Ma, W. Hu, B. Han, R. Xiao and M. Zhang, "Rheological and aging characteristics of the recycled asphalt binders with different rejuvenator incorporation methods," juli 2020. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620312968>.  
[Accessed 15 april 2023].
- [35] I. A. f. R. o. C. (IARC), "Bitumens and bitumen emissions, and some N- and S-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons," 2013. [Online]. Available:  
<https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono103.pdf>.  
[Accessed 19 mai 2023].
- [36] H. Li, Z. Feng, P. Guo and C. Cui, "Repurposing waste oils into cleaner aged asphalt pavement materials: A critical review," februar 2022. [Online]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262104395X>.  
[Accessed 10 april 2020].

- [37] M. Zahoor, S. Nizamuddin and S. Madapusi, "Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review," jaanuar 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620333497>. [Accessed 11 aprill 2023].
- [38] K. Hossain and R. B. Ahmed, "Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review," 10 jaanuar 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819324274?via%3Dihub>. [Accessed 14 mai 2023].
- [39] R. Zhang, Z. You, H. Wang and M. Ye, "The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder," jaanuar 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818325789>. [Accessed 9 aprill 2023].
- [40] R. Zhang, Z. You and H. Wang, "Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt," november 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818321408>. [Accessed 10 mai 2023].
- [41] J. Shen, S. Amirkhanian and B. Tang, "Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures," 15 juuni 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180600050X?via%3Dihub>. [Accessed 14 mai 2023].
- [42] X. Zhang, T. Fidai, I. Hoff, Bjørn, B. O. Lurfald ja C. Hao, „Determination of Rejuvenator Proportion within the Recycled Bitumen: Empirical Double-Logarithmic Formula and Calibration,” November 2022. [Vörgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/364316135\\_Determination\\_of\\_Rejuvenator\\_Proportion\\_within\\_the\\_Recycled\\_Bitumen\\_Empirical\\_Double-Logarithmic\\_Formula\\_and\\_Calibration](https://www.researchgate.net/publication/364316135_Determination_of_Rejuvenator_Proportion_within_the_Recycled_Bitumen_Empirical_Double-Logarithmic_Formula_and_Calibration). [Kasutatud 23 Aprill 2023].
- [43] R. Karlsson and U. Isacson, "Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion," aprill 2003. [Online]. Available: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:2\(157\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(157)). [Accessed 18 mai 2023].
- [44] M. Zaumanis, L. Boesiger, B. Kunz, M. C. Cavalli and L. Poulidakos, "Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant," 20 veebruar 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818329301>. [Accessed 17 mai 2023].
- [45] L. D. Bock, N. Pierard, S. Vansteenkiste ja A. Vanelstraete, „Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling,” Belgian Road Research Centre, Brussels, 2020.

- [46] J. Lin, J. Hong, C. Huang, J. Liu and S. Wu, "Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement," 31 märts 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814000427>. [Accessed 17 mai 2023].
- [47] J. Lin, P. Guo, L. Wan and S. Wu, "Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures," 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812004771>. [Accessed 19 mai 2023].
- [48] N. Tran, "Lessons Learned from the First Mixture Rejuvenator Evaluation on the Test Track," veebruar 2020. [Online]. Available: <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2021-spring/rejuvenator.html>. [Accessed 10 mai 2023].
- [49] M. A. M. M. Aguirre, S. Shirzad, W. H. Daly and L. N. Mohammad, "Micro-encapsulation of asphalt rejuvenators using melamine-formaldehyde," juuli 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816304615>. [Accessed 22 mai 2023].
- [50] S. Xu, A. Tabakovic, X.Liu and E.Schlangen, "Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic," aprill 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818300461>. [Accessed 18 mai 2023].
- [51] Á. García, E. Schlangen and M. van de Ven, "Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete," 2 mai 2011. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236110005041>. [Accessed 17 mai 2023].
- [52] A. Z. U. Abadeen and A. Hussain, "Comprehensive Self-Healing Evaluation of Asphalt Concrete Containing Encapsulated Rejuvenator," 20 mai 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/10/3672/htm#>. [Accessed 10 mai 2023].
- [53] A. Garcia, J. Jelfs and C. J. Austin, "Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules," 30 detsember 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815304839>. [Accessed 16 mai 2023].
- [54] R. B. Mallick and M. Zaumanis, "Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art," 5 jaanuar 2014. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2014.893331>. [Accessed 14 mai 2023].

- [55] Transpordiamet, „Teeregister,“ Transpordiamet, [Võrgumaterjal]. Available: <https://teeregister.mnt.ee/reet/search?0>. [Kasutatud 15 mai 2023].
- [56] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus,“ juuli 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12697-1-2020>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [57] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine,“ september 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12697-2-2015-a1-2019-consolidated>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [58] Eesti Standardikeskus, "Bituminous mixtures-Test methods-Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator," 2018. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12697-3-2013-a1-2018-consolidated>. [Accessed 26 aprill 2023].
- [59] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Materjali Spetsifikatsioon. Osa 8: Ringlusessevõetud asfalt,“ juuli 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-13108-8-2016>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [60] Eesti Standardikeskus, „Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod,“ veebruar 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-933-1-2012>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [61] Eesti Standardikeskus, „Bituumen ja bituumensideained. Nõelpenetratsiooni määramine,“ september 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-1426-2015>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [62] Eesti Standardikeskus, „Bituumen ja bituumensideained. Pehmenemistäpi määramine. Kuuli-rõnga meetod,“ september 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-1427-2015>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [63] Eesti Standardikeskus, „Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 3: Tera kuju määramine. Plaatsustegur,“ veebruar 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-933-3-2012>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [64] Eesti Standardikeskus, „Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid,“ mai 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-1097-2-2020>. [Kasutatud 29 aprill 2023].
- [65] Eesti Standardikeskus, „Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Tera tiheduse ja veeimavuse määramine,“ märts 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-1097-6-2022>. [Kasutatud 29 aprill 2023].
- [66] Eesti Standardikeskus, „Täitematerjalide üldiste omaduste katsetamine. Osa 3: Lihtsustatud petograafilise kirjelduse meetod ja terminoloogia,“ juuli 2022.

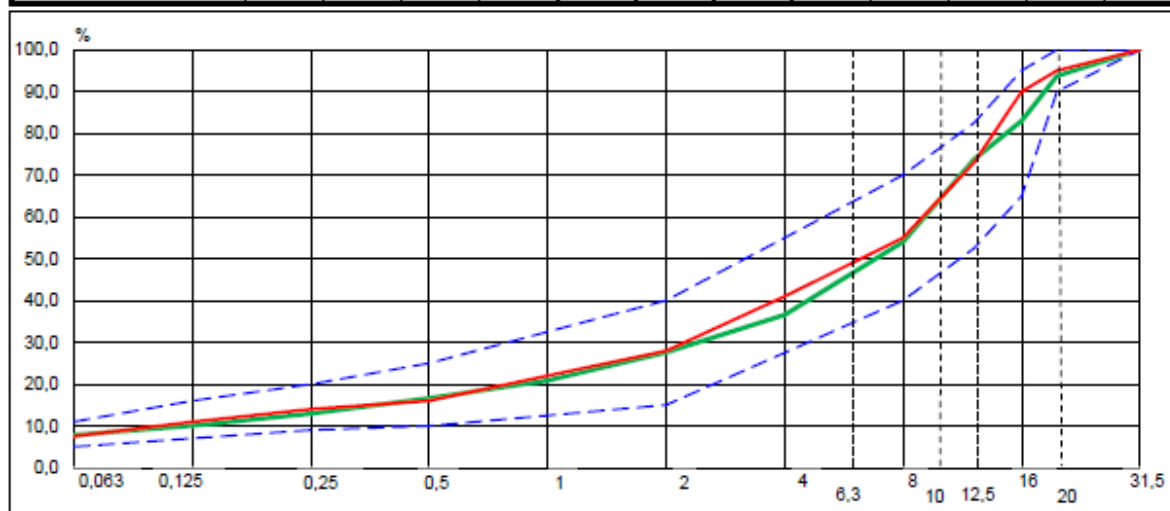
- [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-932-3-2022>. [Kasutatud 29 aprill 2023].
- [67] Eesti Stanmdardikeskus, „Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste kastetamine. Osa 9: Kulumiskindluse määramine abrasiivsele hõõrdkulumisele naastrehvide toimel. Põhjamaade katse,“ juuni 2014. [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-1097-9-2014>. [Kasutatud 29 aprill 2023].
- [68] Eesti Standardikeskus, "Bituminous mixtures-Test methods-Part 35: Laboratory mixing," 2016. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12697-35-2016>. [Accessed 8 mai 2023].
- [69] Eesti standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetod. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga,“ august 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/rt/evs-en-12697-30-2018>. [Kasutatud 25 aprill 2023].
- [70] Eesti standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 31. Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega,“ juuli 2019. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-31-2019>. [Kasutatud 25 aprill 2023].
- [71] Eesti standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine,“ aprill 2020. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-6-2020>. [Kasutatud 25 aprill 2023].
- [72] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine,“ juuli 2019. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-5-2018>. [Kasutatud 25 aprill 2023].
- [73] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegude proovikehade poorsusomaduste määramine,“ jaanuar 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12697-8-2018>. [Kasutatud 15 mai 2023].
- [74] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine,“ Juuli 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-12-2018>. [Kasutatud 25 aprill 2023].
- [75] Eesti Standardikeskus, „Asfaltsegud. Katsmeetodid. Osa 22: Rattarooma katse,“ august 2020. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-22-2020>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [76] Eesti Standardikeskus, „Asfaldsegud. Katsemeetodid. Osa 16: Vastupidavus naastrehvide toimele,“ mai 2016. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-16-2016>. [Kasutatud 26 aprill 2023].
- [77] Eesti Standardikeskus, "Bituminous mixtures-Test methods-Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test," 2019. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12697-44-2019>. [Accessed 26 aprill 2023].

- [78] Transpordiamet, „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised,“ Transpordiamet, Tallinn, 2021.
- [79] K. Anupam and S. Erkens, "A state-of-the-art review of Natural bitumen in pavement: Underlining challenges and the way forward," 1 jaanuar 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622045309>. [Accessed 11 mai 2023].
- [80] D. R. N. Hunter, A. Self and P. J. Read, "The Shell Bitumen Handbook, 6th edition," Shell International Petroleum Company, London, 2015.
- [81] Eesti Standardikeskus, "Bituumen ja bituumensideained. Frassi murdumistäpi määramine," august 2015. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-12593-2015>. [Accessed 12 mai 2023].
- [82] L. S. Sterling, *The Art of Agent-Oriented Modeling*, London: The MIT Press, 2009.
- [83] S. Buechler, A. C. Falchetto, A. Walther, C. Riccardi, D. Wang and M. P. Wistuba, "Wearing Course Mixtures Prepared with High Reclaimed Asphalt Pavement Content Modified by Rejuvenators," Mai 2018. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/325151562\\_Wearing\\_Course\\_Mixtures\\_Prepared\\_with\\_High\\_Reclaimed\\_Asphalt\\_Pavement\\_Content\\_Modified\\_by\\_Rejuvenators](https://www.researchgate.net/publication/325151562_Wearing_Course_Mixtures_Prepared_with_High_Reclaimed_Asphalt_Pavement_Content_Modified_by_Rejuvenators). [Accessed 20 Aprill 2023].
- [84] Z. Han, P. Cong ja J. Qiu, „Microscopic experimental and numerical research on rejuvenators: A review,“ 2 April 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756422000149?via%3Dihub>. [Kasutatud 16 Veebruar 2023].
- [85] M. Elkashef, R. C. Williams and E. Cochran, "Effect of Asphalt Binder Grade and Source on the Extent of Rheological Changes in Rejuvenated Binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 12, 2018.
- [86] M. Elkashef, R. C. Williams and E. Cochran, "Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures," märts 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112317304395>. [Accessed 18 mai 2023].
- [87] K. Zhao, Y. Wang, L. Chen and F. Li, "Diluting or dissolving? The use of relaxation spectrum to assess rejuvenation effects in asphalt recycling," 10 november 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818320282>. [Accessed 18 mai 2023].
- [88] M. Radenberg, S. Boetcher and N. a Sedaghat, "Effect and efficiency of rejuvenators on aged asphalt binder – German experiences," 2016. [Online]. Available: <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=913>. [Accessed 18 mai 2023].

- [89] Eesti Standardikeskus, "Bitumen and bituminous binders- Determination of complex shear modulus and phase angle-Dynamic Shear Rheometer (DSR)," 2012. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-14770-2012>. [Accessed 17 mai 2023].
- [90] Eesti Standardikeskus, "Bitumen and bituminous binder- Determination of the flexuralcreep stiffness- Bending Beam Rheometer (BBR)," 2012. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-14771-2012>. [Accessed 17 mai 2023].
- [91] Eesti Standardikeskus, "Bitumen and bituminous binder- Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV)," 2012. [Online]. Available: <http://www.evs.ee/et/evs-en-14769-2012>. [Accessed 17 mai 2023].
- [92] X. Zhang, H. Chen, B. M. Barbieri, B. Lou and I. Hoff, "The classification and reutilisation of recycled asphalt pavement binder: Norwegian case study," 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522006234>. [Accessed 17 mai 2023].

### Lisa 1 AC 20 Surf RA 50% 70/100 seguretsept

Nr	fr	Tüüp	Tootja, dekl / karjäär	Ter tih Mg/m <sup>3</sup>	LA	A <sub>N</sub>	f	MB <sub>F</sub>	C	FI	F	F <sub>Naci</sub>	
1	liiv	liiv	kohalik										
2	0/4	tardkivi	linkoo	2,70									
3	4/8	tardkivi	linkoo	2,68									
4	8/16	tardkivi	linkoo	2,70									
5	16/22	tardkivi	linkoo	2,70									
6	RA 0/12	RA	objektilt freesitud asfalt	2,71									
7													
8													
9	filler	filler	Nordkalk/ Rakke	0,00									
Lisandid	Mark	Tootja		%	Projekteeritud segu koostis.								
					Materjal		Materjali osakaal %			Materjali vajadus kg/t			
Sideaine	Mark	70/100			Nr	fr	Täitematerjal	Segu					
	Tootja	AS Nynas			1	liiv		0,0	0,0				
	Penetratsioon				2	0/4	8	7,8	78,3				
					3	4/8	0	0,0	0,0				
					4	8/16	25	24,5	244,8				
					5	16/22	17	16,6	166,4				
	Nake	>50			6	RA 0/12	50	49,0	489,5				
Sideaine lisandid	Mark	Tootja		%	7	0	0	0,0	0,0				
	Wetfix BE	Akzo Nobel		0,4	8	0		0,0	0,0				
					9	filler	0	0,0	0,0				
					0	B doseeritav		2,1	21,0				
					B katseline			0,0					
Terastikuline koostis					SUMMA		100	100,0					
Nr	Materjal	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	12,5	16	20	31,5
1	liiv												
2	0/4	9,3	14	19	27	40	61	89	99	100			
3	4/8	1,1	1	2	2	3	4	17	95	100			
4	8/16	1,0	1	1	1	2	2	3	13	61	91	100	
5	16/22	0,7	1	1	1	1	1	1	2	3	13	63	100
6	RA 0/12	13,4	17	22	28	34	44	57	85	100			
7	0	10,7	13	16	20	25	31	39	67	99	100		
8	0	15,7	21	29	38	48	62	80	100				
9	filler	81,5	97	100	100	100							
		0	1	2	3	4	5	6	7	7,6	8	8,3	9
Sidendnormkoostis		7,8	10	13	17	21	28	37	54	74	83	94	100
Norm	min	5,0	7	9	10	12,5	15	27,5	40	52,5	65	90	100
	max	11,0	16	20	25	32,5	40	55	70	82,5	95	100	100
Väljundnormkoostis		7,5	11	14	16	22	28	41	55	73	90	95	100





Lisa 2 AC 20 Surf 70/100 seguretsept

Nr	fr	Tüüp	Tootja, dekl / karjäär	Ter tih Mg/m <sup>3</sup>	LA	A <sub>N</sub>	f	MB <sub>F</sub>	C	FI	F	F <sub>NaCl</sub>	
1	liiv	liiv	kohalik										
2	0/4	tardkivi	Inkoo	2,70									
3	4/8	tardkivi	Inkoo	2,68									
4	8/16	tardkivi	Inkoo	2,70									
5	16/22	tardkivi	Inkoo	2,70									
6													
7													
8													
9	filler	filler	Nordkalk/ Rakke	2,70									
Lisandid	Mark	Tootja		%	Projekteeritud segu koostis.								
					Materjal		Materjali osakaal %		Materjali				
Sideaine					Nr	fr	Täitematerjal	Segu	vajadus		kg/t		
	7	Mark	70/100		1	liiv		0,0	0,0				
		Tootja	AS Nynas		2	0/4	36	34,2	342,0				
		Penetratsioon			3	4/8	9	8,6	85,5				
					4	8/16	35	33,3	332,5				
					5	16/22	15	14,3	142,5				
					6	0		0,0	0,0				
		Nake	>50		7	0		0,0	0,0				
					8	0		0,0	0,0				
					9	filler	5	4,8	47,5				
Sideaine lisandid	Mark	Tootja		%	0	B doseeritav		5,0	50,0				
	Wetfix BE	Akzo Nobel		0,4		B katseline			0,0				
Terastikuline koostis					SUMMA		100	100,0					
Nr	Materjal	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	12,5	16	20	31,5
1	liiv					40	61	89	99	100			
2	0/4	9,3	14	19	27	3	4	17	95	100			
3	4/8	1,1	1	2	2	2	2	3	13	61	91	100	
4	8/16	1,0	1	1	1	1	1	1	2	3	13	63	100
5	16/22	0,7	1	1	1	1	1	1	2	3	13	63	100
6	0	13,4	17	22	28	34	44	57	85	100			
7	0	10,7	13	16	20	25	31	39	67	99	100		
8	0	15,7	21	29	38	48	62	80	100				
9	filler	81,5	97	100	100	100							
		0	1	2	3	4	5	6	7	7,8	8	8,3	9
Sidendnormkoostis		8,0	10	12	15	21	28	40	54	72	84	94	100
Norm	min	5,0	7	9	10	12,5	15	27,5	40	52,5	65	90	100
	max	11,0	16	20	25	32,5	40	55	70	82,5	95	100	100
Väljundnormkoostis		7,5	11	14	16	22	28	41	55	73	90	95	100

