TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

RINGLUSSEVÕETUD ASFALDI KASUTAMINE UUTES ASFALTSEGUDES

THE USE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN NEW ASPHALT MIXTURES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Magnus Martinson

Üliõpilaskood: 211766EAXM

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.

"....." ..... 20…..

Autor: Magnus Martinson
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20…..

Juhendaja: Kristjan Lill
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."..... 20… .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina Magnus Martinson

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Ringlussevõetud asfaldi kasutamine uutes asfaltsegudes"

mille juhendaja on Kristjan Lill ja kaasjuhendaja Sven Sillamäe,

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Magnus Martinson, 211766EAXM
Õppekava, peaeriala: EAXM15/18 Teede- ja sillaehitus
Juhendaja(d): doktorant, Kristjan Lill, +372 5302 2437
projektijuht, Sven Sillamäe, +372 5302 5265

Lõputöö teema:
(eesti keeles) Ringlussevõetud asfaldi kasutamine uutes asfaltsegudes
(inglise keeles) The use of reclaimed asphalt pavement in new asphalt mixtures
Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida võimalusi RA kasutuselevõtuks pealiskihi asfaltsegudes.
2. Anda ülevaade RA käsitlemisest kehtivates normdokumentides ning tuua välja muu maailma kogemus RA kasutamisel.
3. Anda ülevaade RA kasutamisega seotud väljakutsetest ning võimalustest.
4. Hinnata RA kasutamise majanduslikku ja keskkonnaalast mõju.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teaduskirjanduse läbitöötamine ja kehtivate nõuetega tutvumine	31.03.2023
2.	Teooriaosa kirjutamine	23.04.2023
3.	Laboratoorsed katsetused	05.05.2023
4.	75% tööst on valmis	02.05.2023
5.	Katsetulemuste analüüs	14.05.2023
6.	Töö on valmis ning esitatakse retsenseerimisele	24.05.2023

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

Üliõpilane: Magnus Martinson ..... "....."..... 20.....a
/allkiri/

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

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

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

SISUKORD

EESSÕNA 7
Lühendite ja tähiste loetelu 8
1. SISSEJUHATUS 9
2. TEOREETILISED ALUSED 10
2.1 Ringlussevõetud asfaldi käsitlus standardites ja juhistes 10
2.1.1 EVS-EN 13108-8:2016 Ringlussevõetud asfalt 10
2.1.2 EVS 901-3:2021 Asfaltsegud 10
2.1.3 Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhis 11
2.1.4 Edasised suunad 12
2.2 Teiste riikide praktika ringlussevõetud asfaldi kasutamisel 13
2.2.1 Soome 13
2.2.2 Norra 14
2.2.3 Taani 15
2.2.4 Jaapan 16
2.2.5 Saksamaa 16
3. RA KASUTAMISEST TULENEVAD VÄLJAKUTSED 19
3.1 Asfaldi eemaldamine 19
3.2 RA purustamine ja sõelumine 21
3.3 RA ladustamine 23
3.4 RA kasutamine uute asfaltsegude tootmisel 24
3.4.1 RA lisamine külma meetodiga 25
3.4.2 RA lisamine sooja meetodiga 26
3.5 Sideaine elavdajate ehk rejuvenaatorite kasutamine 28
3.5.1 Sideaine vananemise protsess 28
3.5.2 Sideaine elavdamine 29
3.5.3 Elavdajate ehk rejuvenaatorite doseerimine 30
4. RINGLUSSEVÕETAVA ASFALDI KATSETAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS ... 32
4.1 Freesimine 32
4.2 Ringlussevõetava asfaldi katseplaan 32
4.2.1 Võõrlisandite sisaldus 34
4.2.2 Täitematerjalide terakoostis 34
4.2.3 Terade tihedus 35
4.2.4 Purunemiskindlus 37
4.2.5 Kulumiskindlus 37
4.2.6 Plaatsustegur 38
4.2.7 Sideaine nõelpenetratsioon ja pehmenemistäpp 39

5. ASFALTSEGUDE KATSETAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS 43
5.1 Seguretseptide projekteerimine 43
5.1.1 Asfaltsegude segamine 44
5.2 Asfaltsegude katseplaan 45
5.2.1 Mahumass ja erimass 46
5.2.2 Jäävpoorsus 47
5.2.3 Terastikuline koostis ja lahustuva sideaine sisaldus 48
5.2.4 Bituumeni nõelpenetratsioon ja pehmenemistäpp 51
5.2.5 Veepüsivus 53
5.2.6 Deformatsioonikindlus 54
5.2.7 Kulumiskindlus 56
5.2.8 Pragunemistugevus 58
5.3 Analüüs ringlussevõetud asfaldit sisaldavate segude kasutuselevõtuks 60
5.3.1 Keskkonnamõjude võrdlus 60
5.3.2 Majanduslik võrdlus 62
5.3.3 Järeldused 64
KOKKUVÕTE 66
SUMMARY 68
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 70
LISAD 74

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema väljatöötamisel oli oluline panus Tallinna Tehnikaülikooli doktorandil Kristjan Lillel ja projektijuht Sven Sillamäel. Töö eesmärgiks oli uurida ringlussevõetava asfaldi laialdasemat kasutamist uute asfaltsegude tootmisel. Valikus selle teema kasuks mängis olulist rolli ka autorile tundunud taristuehitussektori ebapiisav tähelepanu taaskasutusele ning suur potentsiaal majanduslikult paremate lahenduste kasutuselevõtuks ja CO_2 jalajälje vähendamiseks, mis aitaksid kaasa elukvaliteedi parandamisele Eestis.

Soovin siiralt tänada juhendajaid Kristjan Lillet ja Sven Sillamäed, kes olid kaasas kogu protsessi vältel ning pakkusid väärtuslikku abi ja juhiseid.

Samuti soovin avaldada tänusõnad Tallinna Tehnikaülikooli teedelabori meeskonnale, kes viis läbi lõputöö raames vajalikud laboratoorsed katsetused. Olles teadlikud töö ajakriitilisusest, olid nad valmis tegema katseid ka väljaspool tavapärast tööaega.

Suur tänu kuulub ka Verston OÜ juhtkonnale, kes toetas lõputöö katsetuste rahastamist ning kes pidevalt ja isetult mõtleb sellele, kuidas saaks taristuehitust Eestis muuta keskkonnasäästlikumaks. Samuti tahan tänada Verston OÜ objektimeeskonda riigitee nr 4 Pärnu-Uulu objektil, kes oma professionaalse tegevusega võimaldasid mul leida aega lõputöö kirjutamiseks.

Viimaks soovin väljendada sügavat tänulikkust oma elukaaslasele ja perekonnale, kes olid mõistvad ning toetasid mind kogu magistritöö kirjutamise perioodil, hoolimata sellest, et oli keeruline neile sel perioodil piisavalt aega pühendada.

Kõigile nimetatud isikutele ja organisatsioonidele olen südamest tänulik nende panuse eest käesoleva magistritöö valmimisel.

Võtmesõnad: taristuehitus, taaskasutus, ringlussevõetud asfalt, asfaltsegud, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

AC Base – Base asphalt concrete (ingl k), ehk aluskihi asfaltsegu
AC Bin – Binder asphalt concrete (ingl k), ehk siduvkihi asfaltsegu
AC Surf – Surface asphalt concrete (ingl k), ehk kulumiskihi asfaltsegu
AKÖL – aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus
CEDR - Conference of European Directors of Roads (ingl k) ehk Euroopa Direktoriaadi Teede Konverents
EAPA – European Asphalt Pavement Association (ingl k) ehk Euroopa Asfaldiliit
EL – Euroopa Liit
EPD - Environmental Product Declarations (ingl k) ehk Toote Keskkonnadeklaratsioon
ESTEL – Eesti Taristuehituse Liit
HMA – Hot mix asphalt (ingl k), ehk kuum asfaltsegu
KFA – Kontrollordningen For Asfaltgjenvinning (norra k) ehk Asfaldi Ringlussevõtu Kontrollorganisatsioon
NAPA – National Asphalt Pavement Association (ingl k) ehk Ameerika Ühendriikide Riiklik Asfaldiliit
PA – Porous Asphalt (ingl k) ehk poorne asfaltbetoon
PCR - Product Category Rules (ingl k) ehk Asfaldi Keskkonnatoodete Reeglid
RA – Ringlussevõetud asfalt
SMA – Stone mastic asphalt (ingl k) ehk killustikmastiksasfalt

1. SISSEJUHATUS

Maailmas on juba täna, aga veelgi enam tulevikus probleemiks ressursside nappus ja keskkonnahoid, mistõttu jätkusuutliku arengu printsiibid muutuvad üha olulisemaks. Ehitussektor, sealhulgas taristuehitus, on üks suurimaid ressursikasutajaid ja keskkonnajalajälje tekitajaid. Seetõttu on oluline leida uusi viise, kuidas ehitada jätkusuutlikult ning vähendada ehitustegevuse negatiivset mõju keskkonnale. Üheks võimaluseks selle eesmärgi saavutamiseks on materjalide taaskasutus.

Asfaldi tootmine on üks märkimisväärseid ehitussektori ressursikasutajaid, mis toob kaasa ulatusliku keskkonnamõju. Autori hinnangul ei pöörata Eesti taristuehituse sektoris piisavalt tähelepanu taaskasutamisele, kuigi selles valdkonnas on suur potentsiaal keskkonnamõjude vähendamiseks.

Üks võimalus ümbritsevat keskkonda säästa on vana asfaldi taaskasutamine võimalikult kõrgetes asfaltkihtides, mis võimaldab Eestisse juba imporditud täitematerjalide ja bituumeni taaskasutamist ning vähendab täiendava impordi vajadust. Ringlussevõetud asfalt (RA) on vanast asfaldist saadud materjal, mida on võimalik taaskasutada uue asfaldi tootmisel, kuid Eestis kasutatakse seda võrreldes teiste lääneriikidega väga piiratud ulatuses. RA kasutamine võib vähendada uute loodusvarade tarbimist, säästa energiat ning vähendada ehituskulusid. Käesoleva magistritöö peamiseks eesmärgiks on uurida taaskasutamise võimalusi Eestis üldiselt, võttes aluseks freesasfaldi ja paigaldatava asfaltsegu näite riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehituselt.

Magistritöö esimeses osas antakse ülevaade Eestis kehtivatest standarditest ja juhenditest, mis reguleerivad RA kasutamist ning võrreldakse teiste lääneriikidega. Teises osas kirjeldatakse kõiki olulisi protsesse, kuidas freesasfaldist saab ringlussevõetud asfalt ning analüüsitakse teiste riikide kogemusi ja parimaid praktikaid.

Kolmas ja neljas osa keskendub laboratoorsele katseprogrammile, kus kasutatakse Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehituselt saadud freesasfaldit ning teostatakse sellele täiskatsetus, selgitamaks, kas see sobib kasutuselevõtuks sama projekti AC 20 surf 70/100 asfaltsegus. Lõputöös võrreldakse referentssegu omadusi vastavalt 10%, 30% ja 50% RA-d sisaldavate segudega. Lisaks tehakse ka keskkonnamõjude ja majandusliku võrdluse analüüs RA kasutamise tulemusel.

2. TEOREETILISED ALUSED

2.1 Ringlussevõetud asfaldi käsitlus standardites ja juhistes

2.1.1 EVS-EN 13108-8:2016 Ringlussevõetud asfalt

Vastavalt EVS-EN 13108-8:2016 standardile koosneb objektilt saadud asfalt asfaltkatte kihtidest freesitud asfaldist, asfaltkattest rebitud tükkidest ja tootmise käigus üle jäävast või välja praagitud asfaldist. Objektilt saadud asfaldi töötlemise tulemusena saadakse ringlussevõetud asfalt, mis pärast selle standardi järgi katsetamist, hindamist ja klassifitseerimist on sobiv ja valmis kasutamiseks asfaltsegu lähtematerjalina. Ringlussevõetud asfalti (RA) võib kasutada lähtematerjalina asfalditehases toodetavates asfaltsegudes, kooskõlas nende segude spetsifikatsioonidega. [1]

Kuna nõuded on samad asfaltsegudele koos ringlussevõetud asfaldiga ja ilma selleta, siis on RA teatud omaduste kogum oluline. Täitematerjali terasuurus ja omadused, sideainesisaldus, sideaine omadused ja ringlussevõetud asfaldis sisalduvad võõrlisandid on toote ehk värske asfaltsegu, kuhu seda lisatakse, kvaliteedi seisukohalt olulised. Nõudmisel tuleb määrata kavandatud kasutusotstarbe või -otstarvete puhul asjakohased oluliste omadustega seotud parameetrid: sideaine proovide keskmine penetratsioon, keskmine pehmenemistäpp või keskmine sideaine viskoossus (4.2.2), lähtematerjali moodustav(ad) segugrupp(-grupid) (5.2 Ringlussevõetud asfaldi päritolu), täitematerjalide tüübid ja asjakohased omadused standardi EN 13043 järgi (5.3) ning lähtematerjali homogeensus (5.4). Nõudmisel määramine tähendab, et seda tuleb teha juhul, kui klient seda nõuab. [1]

Materjali tegelik homogeensus määrab ära maksimaalse kasutatava RA sisalduse segus. Ümbertöötlemise kasutamine asfaltsegude tootmises muudab vajalikuks määratleda ringlussevõetud asfalti lähtematerjalina sarnaselt täitematerjalide ja sideainetega. Asfaltsegude tootestandardites EN 13108-1 kuni EN 13108-7 ja EN 13108-9 on lubatud ringlussevõetud asfaldi kasutamine koos nõuetega selle protsentuaalsele sisaldusele. Standardi käsitlusalas on toodud muuhulgas märkus, et Eestis on nõutud ringlussevõetud asfaldi vastavuse tõendamine. Seega saab ringlussevõetud asfalti sertifitseerida sarnaselt täitematerjalidele ja sideainetele. [1]

2.1.2 EVS 901-3:2021 Asfaltsegud

EVS 901-3:2021 standard lubab ringlussevõetud asfaldi kasutamist asfaltsegudes, kuid seab ka teatud piirangud selle kasutamisele. Kui asfaltsegudes kasutatakse enam kui

10% ringlussevõetud asfalti kulumiskihtides ning enam kui 20% siduvkihtides, tasanduskihtides ja kandevkihtides, peab ringlussevõetud asfalt vastama standardi EVS-EN 13108-8:2016 nõuetele ning sisaldama vaid teebituumenit. Samuti peab valitud bituumeni mark vastama nõuetele, mida mõõdetakse sihtsegude puhul (penetratsioon ja pehmenemistäpp). Eelnevaid nõudeid täites on maksimaalne lubatav asfaltsegusse lisatav ringlussevõetud asfaldi kogus ≤ 30 %, kui tehnilised kirjeldused ei sätesta teisiti. [2]

Kui tootja lisab asfaltsegusse rohkem kui 30% ringlussevõetud asfalti, peab ta võtma kasutusele lisameetmeid ringlussevõetud asfaldi sõelkõvera stabiilsuse tagamiseks, ringlussevõetud asfaldi sideaine sisalduse stabiilsuse tagamiseks ning kaaluma ringlussevõetud asfaldis sideaine elavdamist (elavdajate ehk rejuvenaatorite kasutamine). Sõelkõvera stabiilsuse tagamiseks on võimalus RA lähtematerjali sorteerimine sideaine sisalduse järgi, RA lähtematerjali kihikaupa freesimine ning lähtematerjali kitsamateks fraktsioonideks lahti sõelumine. [2]

Ringlussevõetud asfaldi täitematerjalide omadused peavad vastama sihtsegu täitematerjalidele esitatavatele nõuetele ning võõrlisandite kategooria peab olema vähemalt F5. Kui tehnilistes kirjeldustes on nõutud, tuleb ringlussevõetud asfalt, segu grupp ja/või katendikiht, millest ringlussevõetud asfalt on saadud või saadakse, deklareerida tüübikatsetuste aruandes. [2]

2.1.3 Transpordiameti asfaldist katendikihtide ehitamise juhis

Ringlussevõetud asfalti ei ole lubatud Transpordiameti objektidel kasutada kulumiskihtide asfaltsegudes (SMA ja AC surf tüüpi segud). Ringlussevõetud asfaldi kasutamisel AC bin, AC base ja MSE segudes tuleb lähtuda standardis EVS 901-3:2021 esitatud asfaltsegude nõuetest. Maksimaalne lubatav ringlussevõetud asfaldi osakaal AC bin ja AC base segudes on 30%. Samuti tuleb deklareerida ringlussevõetud asfaldi omadused vastavalt standardile EVS-EN 13108-8:2016 ning täitematerjalide omadused. Põlevkivibituumenit sisaldavat ringlussevõetud asfalti kasutada ei tohi. Asfaltsegudesse lisatava ringlussevõetud asfaldi omaduste deklareerimisel tuleb arvestada ka sihtsegu arvutusliku penetratsiooni ja nõutud bituumeni margiga. Lisaks kehtivad ringlussevõetud asfalti sisaldava asfaltsegu kohta samad laotamis- ja tihendamisnõuded, mis sama segutüübi puhul ilma ringlussevõetud asfaldita. Mustsegus kasutatav täitematerjal peab vastama standardis EVS 901-3 esitatud nõuetele. [3]

Täiendavalt on Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis välja toodud, et olemasolevast kattest saadavat freesipuru tuleb kasutada maksimaalselt sama objekti remondis. [4]

2.1.4 Edasised suunad

Detsembris 2015 toimunud Pariisi kliimakonverentsil COP21 võtsid 195 riiki vastu globaalse, õiguslikult siduva kokkuleppe kliima soojenemise pidurdamiseks. Kokkulepe jõustus 4.novembril 2016. aastal. Kokkuleppe põhieesmärgid on kliimamuutuste leevendamine ja heitkoguste vähendamine, et hoida globaalse keskmise temperatuuri tõus tuntavalt alla 2°C võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse ajaga. [5]

Euroopa kliimamääruse „Eesmärk 55" kohaselt on ELi kliimaeesmärgi – vähendada 2030. aastaks ELi heitkoguseid vähemalt 55% – saavutamine juriidiline kohustus. Selle eesmärgi saavutamiseks ja ELi 2050. aastaks kliimaneutraalseks muutmiseks töötavad ELi liikmesriigid välja uusi õigusakte. Selleks on vaja kasvuhoonegaaside heitkoguste praeguse taseme olulist vähenemist järgmistel kümnenditel. [6]

Euroopa Asfaldiliidu (EAPA) jaoks on taaskasutus prioriteetne valdkond. Viimastel aastatel on jätkusuutlikkus ja ringmajandus muutunud ELi administratsiooni ja ka enamiku riiklike haldusasutuste peamiseks prioriteediks kogu Euroopas. Arvestades, et asfalt on materjal, mida on lihtne parandada, 100% korduvkasutatav ja taaskasutatav ning et üle 90% Euroopa teedevõrgust on praegu asfaltkattega, on selge, et Euroopa asfalditööstusel on potentsiaali saada võtmetähtsusega vahend valitsustele kõige ambitsioonikamate keskkonnaeesmärkide saavutamiseks. [7]

Euroopa Asfaldiliidu (EAPA) ja Euroopa Direktoriaadi Teede Konverents (CEDR) ühisel veebiseminaril toodi muuhulgas välja, et riigid peaksid töötama selle nimel, et vähendada taaskasutuse rakendamise takistusi ning hõlbustada võimalikult palju korduvkasutamist ja ringlussevõttu. Antud veebiseminari fookuses oli ka ühtsete asfaldi keskkonnatoodete reeglite (PCR) ja toodete keskkonnadeklaratsiooni (EPD) reeglite väljatöötamine. [8]

R.Toom uuris oma 2022 aasta magistritöös erinevaid võimalusi asfaldi tootmisel CO_2 heidete vähendamiseks ning tõi välja, et CO_2 emissioonid asfaldi tootmises alates toorainete tootmisest ja transpordist asfalditehaseni kuni asfaltsegu valmimise hetkeni olid 2020. aastal kokku 80 936,1 tonni CO_2eq heiteid toodetud 1 715 151 tonni asfaltsegu kohta. Üks magistritöös pakutud variant keskkonnaalase jalajälje vähendamiseks oli RA laialdasem kasutuselevõtt uute asfaltsegude tootmisel. [9]

Teede ja Tehnokeskuse poolt teostatud Riigiteede teehoiu rahavajaduse strateegiline analüüs 2019-2048 lõpparuandes on toodud, et teedevõrgu säilituse ja arendamise osas on mahajäämus 2848 miljonit eurot. Teede seisukorra säilitamise ja arendamise keskmine vajalik aastane eelarve maht on 328-352 miljonit eurot, mis ei arvesta juba olemasoleva remondivõla vähendamisega. [10] Kehtiva Teehoiukava kohaselt on 2023.

aastal planeeritud 202 miljonit eurot, 2024. aastal 153 miljonit eurot, 2025. aastal vaid 108,3 miljonit eurot. [11] Vähenev rahastus taristuehituse sektoris sunnib leidma majanduslikult otstarbekamaid lahendusi. K.Kontson, K.Lill ja S.Sillamäe avaldasid 2022. aasta Teejuht ajakirjas artikli, kus pakuti välja freespuru kasutamine kulumiskihi asfaltsegudes kui üks võimalik lahendus materjali hinnatõusu leevendamiseks. [12]

2.2 Teiste riikide praktika ringlussevõetud asfaldi kasutamisel

2.2.1 Soome

Soomes on lubatud kulumiskihi asfaltsegudes kasutada maksimaalselt 50% ja muudes kihtides kuni 70% ringlussevõetud asfalti, kuid tellija heakskiidul on võimalik ka kõrgem sisaldus tingimusel, et segude täitematerjali kulumiskindluse kvaliteedinõuded on An14 või An19. Kui freespuru sisaldus segus ületab 10%, tuleb seda eelnevalt soojendada [13]. 2023. aastal uuendatud asfaldinormide kohaselt tuleb RA täitematerjalile teha alati kulumiskindluse katse. [14]

Asfaldinormides on kehtestatud RA-d sisaldavate asfaltsegude bituumeni penetratsioonile miinimumnõuded peale asfaltsegude laotamist, vastavalt tabelis 2.1 toodule. [15]

Tabel 2.1 Bituumeni penetratsioonile esitatud minimaalsed nõuded pärast asfaldi laotamist vastavalt asfaltsegus kasutatud bituumenitele [15]

Nr	Bituumeni mark	Bituumeni penetratsioon 1/10 mm
1	70/100	32
2	100/150	43
3	160/220	60

Kui soovitakse lisada 50% RA-d, siis peab RA minimaalne penetratsioon olema 28, kuid näiteks 20% RA lisamisel sobib ka RA penetratsioon ≥10. [15]

Soomes ei ole rejuvenaatorite kasutamine laialdaselt levinud. Täiendav bituumen valitakse tavaliselt 1–2 klassi võrra pehmem, sõltuvalt lõpptoote penetratsioonist. Üldjuhul kasutatakse lisabituumenina klasside 160/220 või 250/330 bituumenit, kuid võib kasutada ka 70/100 bituumenit. [15]

Sõltuvalt asfaldi tootmise tehnoloogiast varieerub lubatava kasutatava RA sisaldus järgmiselt [15]:

- külmalt segamisel < 10%;
- RA kuumutamisel täitematerjaliga samas trumlis ilma, et RA puutuks kokku otsese leegiga: 20-40%;
- RA soojendamine eraldi trumlis: 70-80%.

Soome seab aktiivselt eesmärgiks süsinikuneutraalsuse saavutamise aastaks 2035 ja soovib tugevdada oma rolli ringmajanduse teerajajana. Asfaldi ümbertöötlemine on asfalditehastes muutunud tavapäraseks ning keskmine RA sisaldus uute asfaltsegude tootmisel on ca 20%. Helsingis teostati pilootprojekt, kus vaadeldi Hämeentie tänava renoveerimisprojektis kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamise potentsiaali. Projektis leiti, et kasutades RA killustikku uue asfaldi materjalina, on võimalik kokku hoida CO_2 ekvivalenti ca 22%. Projekti eeldatav keskmine RA kasutusmäär asfaltsegudes oli 50-60% ning kuluanalüüsis eeldati, et asfaldi hind on sellest tulenevalt 40% madalam. [16]

2.2.2 Norra

Alates 2001. aastast peab mittetulundusühing Asfaldi Ringlussevõtu Kontrollorganisatsioon (KFA) riigiülest arvestust ülesvõetud ja taaskasutatud asfaldi kohta. KFA-d rahastatakse Norras müüdud bituumeni "rohelise tasu" kogumisega. Rohelise tasu kogumise ja haldamisega tegelevad bituumeni tarnijad [17]. Aastal 2021 tekkis Norras 1,129 miljonit tonni freesasfalti, millest 46,1% kasutati uute asfaltsegude tootmisel ning 53,9% kasutati madalamates tee aluskihtides. Kasutamata freesasfaldi jääk oli 2021 aasta seisuga 1,057 miljonit tonni. [18]

Kuni 2022. aasta lõpuni oli uutes asfaltsegudes lubatud kasutada kuni 40% RA-d, täpsemad lubatud kogused on kirjeldatud tabelis 2.2 [19] Uute asfaldinormide jõustumisel 2023. aasta alguses tühistati RA lisamise piirangud kõikidel asfaltsegudel v.a polümeermodifitseeritud bituumeniga (PMB) asfaltsegud, kus jäi endiselt kehtima maksimaalne lubatud RA kasutusmäär 10%. [20]

Tabel 2.2 Maksimaalne lubatud RA kasutusmäär uute asfaltsegude tootmisel Norras kuni aastani 2023 [19]

Asfaldikiht	Külmalt segades, %	Soojalt segades,%
PMB kihid	10	10
Kulumiskiht AKÖL≥5000	15	25
Kulumiskiht AKÖL<5000	15	40
Siduvkiht	25	40
Aluskiht	25	40

PMB segude piirang 10% kehtib tavalist bituumenit sisaldava RA lisamisel, kui RA sisaldab polümeerbituumenit, siis on lubatud lisada kuni 30% RA-d. [21] Norras on võetud eesmärgiks asfaldi optimaalne taaskasutamine keskkonnahoiu seisukohast ning on leitud, et suurim kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamine saavutatakse siis, kui RA sideaine asendab uue asfaldi tootmiseks vajaminevat sideainet. [21] Uuringutes on leitud, et 10% RA kasutamine ja 4,5% bituumeni lisamine uue asfaltsegu tootmisel aitab vähendada CO_2 heitkoguseid bituumenist 0,95 kg CO_2 ja kivimaterjalidest 0,35 kg CO_2 võrra, kokku 1,30 kg CO_2 ühe tonni toodetud asfaldi kohta. Bituumeni transpordist tulenev keskmine vähenemine leiti olevat 0,36 kg CO_2. Kuna Norras kasutatakse uue asfaldi tootmisel kohalikku kivimaterjali, siis kivimaterjalide pealt on kokkuhoid väiksem kui bituumeni pealt, samas on välja toodud, et riigisisene kivimaterjali laevaga transport võib suurendada heitkoguste teket 20-30 korda. [21] Rejuvenaatorite kasutamine Norras ei ole laialdaselt levinud ja uuritud, kuna taaskasutuse osakaal ei ole olnud nii kõrge. [21]

2.2.3 Taani

Taanis on uute asfaltsegude tootmisel kasutatud RA-d juba alates 1980.ndatest ning kuni aastani 2015 moodustas RA kasutamine 18% asfaldi kogutoodangust, millest 8% kasutati kulumiskihtide tootmisel. 2015 kuni 2018 teostati Taanis arendusprojekt „Ringlussevõetud asfaldi tootmine Taanis". Projekti rahastas Taani Keskkonnaamet ning seal osalesid Taani Tehnoloogiainstituut (DTI), Taani Asfaldiühing (Asfaltindustrien), Asfaltsegude tootja ja paigaldaja YIT Denmark, samuti Taani Transpordiamet ja Kohalike omavalitsuste esindusorganisatsioon. Projekti eesmärk oli dokumenteerida võimalused RA kasutuselevõtuks kulumiskihi ja siduvkihi asfaltsegudes. [22]

Projekti tulemused põhinesid põhjalikul ja laiapõhjalisel laboratoorsel katseprogrammil, mis päädis segude kasutamisega Herningi ja Holstebro vahelise maantee ehitamisel. Kõik saadud tulemused näitasid üheselt, et kui taaskasutatud asfaldi sisaldus uues SMA kulumiskihis ja AC bin siduvkihis on kuni 30%, siis on uue asfaldi vastupidavus ja funktsionaalsus samaväärne referentsmaterjaliga. Täiendavalt jõuti järeldusele, et RA kasutamine 30% ulatuses toob kaasa ulatusliku keskkonnasäästu (14–22% CO_2-heidete vähenemine) ning samuti sotsiaalmajanduslikud säästud tänu importmaterjalide vajaduse vähenemisele. [22]

EAPA iga-aastane statistika näitab, et 2021. aastal kasutati Taanis kogu tekkinud freesasfaldist 85% uute asfaltsegude tootmisel (1,172 miljonit tonni). Kogu asfalditoodang 2021. aastal oli 3,6 miljonit tonni, seega ligi 30% uuest asfaldist moodustas RA-d sisaldav asfalt. [23]

Ühtlustatud tootestandardid kuumsegatud asfaldile lubavad kasutada taaskasutatud asfalti vastavalt standardile DS/EN 13108-8. Taani asfaldinormides on täpsustatud, et nõuded kehtivad valmis asfaldile ning sealjuures ei jälgita ega seata piiranguid lisatava RA kogusele uute asfaltsegude tootmisel. [24]

2.2.4 Jaapan

Jaapanis lisatakse uute asfaltsegude tootmisel segusse keskmiselt 47% RA-d. Riigis on ca 1150 asfalditehast, mis toodavad aastas keskeltläbi 55 miljonit tonni asfaltsegusid. Nendest 55 miljonist tonnist sisaldab umbes 41,9 miljonit tonni RA-d. Kogu ringlussevõetud asfaldist kasutatakse orienteeruvalt 99% uute asfaltsegude tootmiseks. RA kasutust ei mõjuta riigisisene geograafiline ja klimaatiline asukoht, kuna sisaldused on sarnased nii põhjapoolsemates külmades kui ka lõunapoolsetes soojemates piirkondades ning RA-d lisatakse 20-60%. [25]

Jaapanlased omistavad oma edukat kõrge RA sisalduse kasutamist HMA-s kolmele olulisele tegurile [25]:

- kvaliteedile keskendumine, sh RA töötlemine (nt fraktsioneerimine) ja ladustamisalade katmine;
- RA kuumutamine niiskuse eemaldamiseks ja RA sideaine pehmendamiseks;
- rejuvenaatorite kasutamine soovitud segukarakteristikute saavutamiseks.

RA kvaliteeti hinnatakse kolme kriteeriumi järgi [25]:

1. kasutatava RA minimaalne sideainesisaldus >3,8%;
2. RA sideaine penetratsioon peab olema minimaalselt 20 või tihendatud RA proovide kaudse tõmbetugevuse koefitsient peab olema väiksem kui 1,70 MPa/mm;
3. Töödeldud RA ei tohi sisaldada rohkem kui 5% peenosist;
4. Rejuvenaatorite sisaldus moodustab 5-10% kogu lisatava sideaine kogusest.

2.2.5 Saksamaa

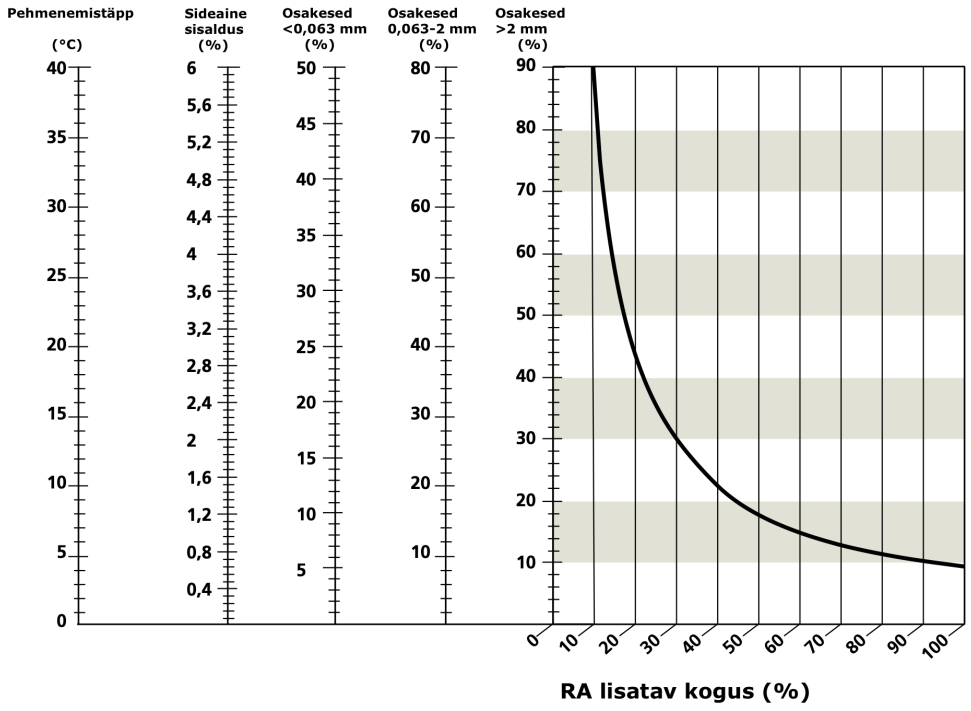
Saksamaal toodeti 2021. aastal kokku 38 miljonit tonni asfaltsegusid. Freesasfalti tekkis kokku 14 miljonit tonni, millest uute asfaltsegude tootmisel kasutati 11,9 miljonit tonni, mis moodustas 31,3% kogu asfalditoodangust. [26]

Taaskasutamiseks sobib RA, mille keskmine pehmenemistäpp on kuni 70°C ning üksikproovide puhul on lubatud kuni 77°C. RA kasutamise sobivusel on määravaks [27]:

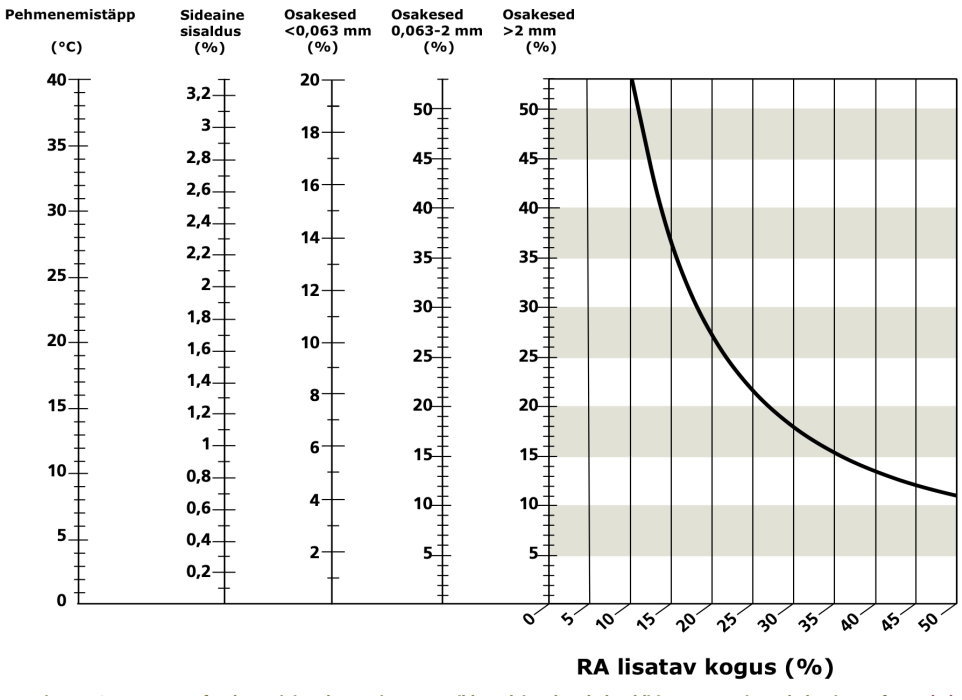
- RA sobivus uue asfaltsegu sõelkõveraga;
- RA homogeensus;
- asfalditehase segamisvõimekus (kas on võimalus eraldi trumliks jne).

Segude projekteerimisega (st asfaltsegu koostise koostamisel ja optimeerimisel enne esmast tüübikatsetust) tuleb tagada, et saadud asfaltsegu vastaks kõikidele riiklikele asfaldinormidele (vastavalt TL Asphalt-StB 07). Peenosise sisaldus või sideaine pehmenemistäpi väärtus võib juba määrata maksimaalse võimaliku lisatava RA koguse. Kasutataval RA-l on oluline määrata sõelkõver, sideaine sisaldus, pehmenemistäpp ja täitematerjali terade tihedus. [27]

Teadmata päritolu ja mittehomogeensete freespurude kasutuselevõtuks asfaltsegudes on Saksamaal loodud nomogrammid, kus on viis kriteeriumit, mis määravad maksimaalse lubatava RA koguse, mis on lubatud uude asfaltsegusse lisada. Nomogrammile tuleb kanda kõikide võetud proovide suurim erinevus viiel kriteeriumil (bituumeni pehmenemistäpp; sideaine sisaldus; 0,063 mm sõela läbinud osakeste protsent; osakeste protsent, mis läbib 2 mm sõela ja ei läbi 0,063 mm sõela; osakeste protsent, mis ei läbi 2 mm sõela). Vastavalt proovide erinevusele tuleb väärtused kanda nomogrammile ning kasutatava RA koguse määrab kriteerium, mis puudutab nomogrammi kõverat kõige madalama lisatava RA protsendi juures. Eraldi nomogramm on aluskihi segule (joonis 2.1) ja siduv- ning kulumiskihi segule (joonis 2.2). [27]



Joonis 2.1 Nomogramm RA maksimaalse kasutuse kohta asfaldi aluskihtides (AC base) [27]



Joonis 2.2 Nomogramm RA maksimaalse kasutuse kohta asfaldi siduv- ja kulumiskihtides (AC bin, AC surf) [27]

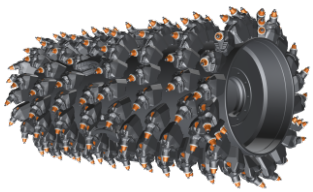
Käesoleva lõputöö lisas 9 on toodud praktiline näide nomogrammi kasutamise kohta.

3. RA KASUTAMISEST TULENEVAD VÄLJAKUTSED

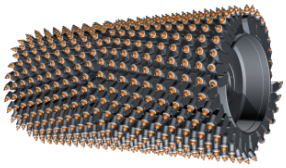
3.1 Asfaldi eemaldamine

Asfaltkatte eemaldamiseks on kaks peamist meetodit - lammutamine ja freesimine. Lammutamine hõlmab asfaltkatte füüsilist purustamist ja lõhkumist raskete masinate abil, nagu pneumaatilised haamrid, purustajad või ekskavaatorid. Suuremate mahtude puhul on lammutamine vähemlevinud. Peamine meetod asfaltkatete eemaldamiseks on freesimine. Freesimine hõlmab spetsiaalsete freeside kasutamist, mis võimaldab eemaldada asfalti kihtide kaupa. Wirtgenil on olemas freesid, mille töölaius on vahemikus 0,35 m kuni 4,4 m ja maksimaalne freesimise sügavus 35 mm [28]. Eestis on peamiselt kasutusel freesid laiusega 0,5 m kuni 2,2 m. Sõltuvalt töö iseloomust on võimalik valida erineva freesi trumlite vahel, millel on erinev terade vahekaugus [28]:

1. standardne trummel (terade vahe 12 mm kuni 18 mm) – sobib kuni 350 mm kihi eemaldamiseks (joonis 3.1);
2. peenfreesimise trummel (terade vahe 8 mm kuni 10 mm) – sobib kuni 80 mm eemaldamiseks ning tagab tasasema tulemuse;
3. mikro-peen trummel (terade vahe 4 mm kuni 7 mm) – sobib kuni 30 mm kihi eemaldamiseks, ning kasutatakse õhukeste ülekatete korral (joonis 3.2);
4. ECO trummel (terade vahe 20 mm kuni 25 mm) – sobib kuni 350 mm kihi eemaldamiseks, kasutatakse ka betooni freesimisel. [29]



Joonis 3.1 Standardne trummel (Freesi terade vahe 15 mm) [29]



Joonis 3.2 Mikro-peen trummel (Freesi terade vahe 6 mm) [29]

2015 kuni 2018 teostati Taanis arendusprojekt „Ringlussevõetud asfaldi tootmine Taanis", mille käigus uuriti põhjalikult ka nö selektiivset freesimist. Katse viidi läbi Sindingi lähedal asuval teelõigul, mis oli seotud uue Herning-Holstebro maanteega. Antud teelõigult freesiti selektiivselt nii "peene" (terade vahe 6 mm) kui ka "standardse" (terade vahe 15 mm) trumliga (joonis 3.1) ning seejärel analüüsiti saadud freesasfaldi koostist ja omadusi. Saadud katsetulemused on kajastatud tabelis 3.1. [22]

Tabel 3.1: Herning-Holstebro maantee freesimise katsetulemused [22]

Proovi nr.	**Freesi terade vahekaugus, mm**	**Freesitav kiht, cm**	**Segu tüüp**	**Peenosis <0,063 mm, %**	**Filleri sisaldus, %**	**Bituumeni penetrat-sioon, 0,1mm**
16043	15	0 - 2,5	100% AC surf	9-10,2	1,7-1,9	13
16044	15	2,5 - 5	Peamiselt PA			52
16045	15	0 - 5	Segu			25
16046	6	0 - 2,5	100% AC surf	11,7-13,5	2,4-4,1	19
16047	6	2,5 - 5	Peamiselt PA			32
16048	6	0 - 5	Segu			36

Tulemustest järeldati, et peenfreesimine tekitab suurema peenosise ja filleri sisaldusega freespuru, mis seab piirangu RA protsentuaalsele lisamisele uutesse asfaltsegudesse. Sellest tulenevalt soovitatakse kasutada pigem standardse trumliga freesimist. [22]

Kihiti freesimise meetodi kasutamine on oluline, kui freesitavates asfaldikihtides on erinevad asfaltsegud, mille kivimaterjali ja bituumeni omadused on erinevad. Selektiivse freesimise meetodi abil on võimalik kasutada pealiskihist freesitud materjali kulumiskihi asfaltsegude tootmiseks ning aluskihi materjali aluskihtides kasutatava asfaltsegu tootmiseks. [30]

Freesimise erinevate parameetrite mõju RA kvaliteedile uuriti Šveitsis 2021. aastal kui teostati katsetused neljal erineval teelõigul. Uurimise eesmärk oli välja selgitada, kas freesmasina liikumiskiirus, trumli pöörlemiskiirus ja freesimissügavus mõjutab bituumeni vananemist, täitematerjali terade plaatsust, suurte tükkide osakaalu ja peenosise sisaldust. [31] Hõõrdumise tõttu võib freesiterade temperatuur kattega kokkupuutel ulatuda Wirtgen andmetel kuni 1000°C [28] ning sellest tulenevalt arvati olevat oht freesimisest tulenevale bituumeni vananemisele. Katsetused viidi läbi võimalikult homogeense asfaldiga lõikudes ning võrdlusmomendi tekitamiseks võeti

puurkehad, mille katsetulemusi võrreldi freesitud asfaldi katsetulemustega. Peamised järeldused antud uuringust [31]:

- standardse trumli kasutamisel ei ole mõju bituumeni vananemisele. Peenfreesimise- ja mikro peene trumli kasutamisel arvati tekkivat risk bituumeni vananemisele kuna terade kokkupuutepind asfaltkattega on suurem, kuid sellekohaseid katsetusi läbi ei viidud ning see vajaks täiendavat uurimist;
- freesimisel ei leitud olevat märkimisväärset mõju täitematerjalide plaatsustegurile;
- õhukese kihi freesimisel ei ole freesi liikumiskiirusel otsest mõju suurte tükkide tekkele;
- paksemate kihtide freesimisel on freesi liikumiskiirusel mõju suurte tükkide tekkele;
- paksemate kihtide freesimine tekitas suuremal hulgal peenosist, samuti tekkis suuremal hulgal peenosist freesi kiiremal liikumisel;
- trumli pöörlemiskiirus ja õhutemperatuur ei avaldanud mõju suurte tükkide tekkimisel.

Freesitud materjal ühest kihist võib olla väga homogeensete omadustega ning sellisel juhul ei pruugi olla vajadust freesasfaldi täiendavaks töötlemiseks.

RA sisalduse maksimeerimiseks asfaltsegudes on oluline teha otsused RA käitlemise kohta projekti varajases staadiumis. Töövõtjale teekatte puurkehade tulemuste esitamine võimaldab tal teha otsuse selle väärtusliku materjali kasutamise osas ning sellega arvestada freesimistööde planeerimisel. RA taaskasutamine asfaldis vähendab asfaldi tootmisel materjalide impordivajadust ja kulusid. [32]

Autor leiab, et enne freesimistöödega alustamist oleks oluline koostada põhjalik freesimise projekt, mis sisaldaks üksikasjalikku asfaltkatete analüüsi olemasoleva asfaldi kihipaksuse ja omaduste kohta. Antud uuringud võiks teostada koos ehitusgeoloogiliste uuringutega enne projekteerimistööde teostamist või projekteerimistööde vältel. Selline lähenemine võimaldaks maksimeerida olemasoleva asfaldi taaskasutust kõrgetes ja kulukates kihtides.

3.2 RA purustamine ja sõelumine

Kuigi katendi enda omadusi muuta ei saa, võib RA asjakohane haldamine ja töötlemine säilitada RA omadusi, võimaldades kõrgekvaliteedilistes segudes kõrget RA sisaldust. [33]

Vastuvõetud taaskasutatud asfalt töödeldakse sobivateks fraktsioonideks. Selle jaoks on peamiselt kaks võimalust, kas materjal purustada, sõeluda või mõlemad koos. Freesitud asfalt töödeldakse, et saada ühtlane tooraine, mis sobib uue kuuma asfaldi tootmiseks.

Tüüpiline taaskasutatud asfaldi fraktsioon Taanis on 0/16 mm, kuna enamik Taanis ehitatavatest kandekihtidest koosneb sellest fraktsioonist. Sageli sõelutakse materjalid läbi väiksema sõela, et saada ka peenema teraga RA, näiteks 0/6 või 0/8 mm, mis sobib paremini peenemateraliste asfaltsegude jaoks. Kulumiskihi taaskasutamisel on tavaliselt tegemist 0/6, 0/8 või 0/11 mm fraktsiooniga, kuna Taanis kasutatakse harva kivisid, mis on suuremad kui 11 mm. Eraldi tuuakse välja, et tuleks vältida materjali liigset purustamist, vältimaks suurt peenosiste hulka, mis omakorda seab piirangud freesasfaldi kasutamisele. Eraldi ladustatakse ka polümeerbituumenit sisaldav freesasfalt, mida sealsete uuringute kohaselt saab kuni 30% ulatuses kasutada ka tavalistes asfaltsegudes, kuna selliselt on vanal polümeeril ainult piiratud mõju. [22]

Soomes purustatakse asfalt enamasti 0/16 mm fraktsiooniks, kuid vajadusel ka 0/11 mm fraktsiooniks. [15]

Jaapanis kasutatava praktika kohaselt freesitud asfalt samuti purustatakse ja sõelutakse. Fraktsioonid on küll erinevad, kuid peamiselt kasutatakse kahte gruppi: 5-13 mm ja 0-5 mm. [25]

Norras kasutatakse kõige sagedamini mobiilseid löök- ehk rootorpurusteid koos sõelumisseadmetega. Kui purustamiseks kasutatakse lõugpurusteid, siis tavaliselt kasutatakse sellega paralleelselt ka sõela. Lõugpurustitel võib olla probleeme purustamisel alla 0/20 mm fraktsiooni, kuna purustamist selliselt ei toimu. Lõugpurustiga purustamine peaks toimuma madalatel temperatuuridel, soovitavalt mitte üle +10°C. Löök- ehk rootorpurustid on hea tootlikkusega, 150 – 200 tonni/h ja võivad asfalti purustada aastaringselt. Löökpurusti kipub andma sujuvama kõvera, kuid ka rohkem peeneid osakesi kui lõugpurusti. Peenosiste sisaldus on oluline kui RA-d kavatsetakse segudesse lisada 100% külma meetodiga. [21]

Praegu puudub meetod, mis võimaldaks kvantitatiivselt võrrelda töötlemistoimingute mõju toodetud RA omadustele. Purustus- ja sõelumisoperatsioonide süstemaatilise hindamise lähenemisviis võimaldaks teha teadlikke otsuseid erinevate purustajate võrdlemisel ja konkreetse purustamise- ja sõelumistoimingu konfiguratsiooni optimeerimisel. [33]

3.3 RA ladustamine

Tee ehitamise kvaliteedi nõuded seab piirangud asfaltbetoontehastes materjalide ladustamisele, muuhulgas peab arvestama, et täitematerjalid peavad olema ladustatud liikide ja fraktsioonide kaupa, vältimaks nende segunemist. Fraktsioneerumise vähendamiseks ladustatakse materjal kuhilasse kuni ühe meetriste kihtide kaupa. Samuti peab asfaltbetoonitehase täitematerjalide laoplatsi pinna kate tagama vee äravoolu ja välistama täitematerjali segunemist aluspinnasega. [34]

Välitingimustel ladustamisel tuleb arvestada, et kivimaterjalis esineb paratamatult teatud looduslik niiskusesisaldus, eelkõige võivad kivimaterjali kõige peeneteralisemad koostisosad liiv, filler ning taaskasutatud asfalt sisaldada märkimisväärses koguses niiskust. Asfaldi tootmisel on see niiskusesisaldus probleemiks, kuna see tuleb tootmise käigus välja kuumutada, mis omakorda tekitab suurema energiakulu ja suurema CO_2 heitekoguse. Seega on kivimaterjali niiskusesisalduse ja soovitud asfalditemperatuuri saavutamiseks vajaliku energiahulga vahel otsene seos. Soojadel ja kuivadel suvepäevadel on niiskusesisaldus madal, kuid sellist aega on Eestis vähe ning sellega ei saa meie kliimas arvestada. Põhjamaades ja ka mujal maailmas on ehitatud spetsiaalsed "kuivatushallid", kus kivimaterjale hoitakse avatud hallides katuse all, et tuul saaks materjali kuivatada.

Joonis 3.3 Katuse alla ladustatud RA Taanis [22]

Mitmetes riikides, kus RA kasutamise protsent on kõrge, hoiustatakse RA-d kinnistes angaarides või tuulele avatud katusealuste all. Peamine põhjus on hoida asfaltsegus kasutatav materjal võimalikult kuivana. Saksamaa praktika kohaselt laohoone puudumisel võib taaskasutatud asfalti hoida kuivana ka muude sobivate vahenditega, kattes selle näiteks presendiga. [35]

YIT Taani kogemus näitab, et katmata olekus ladustatud freespuru veesisaldus on vahemikus 4–8% (olenevalt ilmast ja aastaajast). Freespuru ladustamisel katuse all,

nagu on näidatud joonisel 3.3, on võimalik veesisaldus viia kuni 2%ni ning mõningatel juhtudel isegi madalamaks. Sealsed arvutused näitasid, et veesisalduse viimisel viielt protsendilt kahe protsendini ja asfaltsegudesse 30% RA lisamisega vähenes tootmise energiakulu 15%. [22]

Üks peamisi põhjuseid, miks Ameerika Ühendriikides ollakse teatud piirkondades RA kasutamisel skeptilised, on RA ladustamisel tehtavad puudujäägid. RA ja teiste täitematerjalide haldamine peaks olema oluline osa asfalditehaste kvaliteediprogrammist [36]. Jaapanis pööratakse RA ladustamisel väga suurt tähelepanu ning tihti hoiustatakse ja töödeldakse freesasfalti suletud hoonetes. USA delegatsioon, kes külastas 2014. aastal kolme asfalditehast Jaapanis, tõi välja, et RA niiskussisaldus ladustusplatsidel hunnikus oli ainult 1,5-2%. Samuti toodi välja, et freesasfaldi purustamisel kasutati minimaalselt vett. Taaskasutatud asfaldi kuivana hoidmine toodi välja ühe peamise erinevusena, miks Jaapanis on võimalik kasutada sedavõrd suuremates kogustes RA-d uute asfaltsegude tootmisel. [25]

Uuringutes on leitud, et asfalteeritud ja kaldega laoplatsil ladustatud materjal on keskmiselt 2,26% kuivem kui ilma kõvakatteta ja tasase pinnaga laoplatsil ladustatud materjal. [9] [37] Kui arvestada, et asfaltsegude tootmisel kasutatakse ka teisi peeneteralisi täitematerjale, mis on niiskuse suhtes tundlikumad, siis võiks asfalditehased juba täna kaaluda katusealuste ehitust investeeringuna. Selle abil oleks võimalik vähendada tootmise energiatarbimist ning sellega koos ka CO_2 heitkoguseid. Ameerika Ühendriikide Asfaldiliit (NAPA) on oma juhistes välja toonud järgmised soovitused materjalide ladustamisel [37]:

- aluspinna kalle 2-4%;
- aluspinna katmine kõvakattega;
- materjalide katmine ilmastikutingimuste eest (eriti peenosist sisaldav materjal).

3.4 RA kasutamine uute asfaltsegude tootmisel

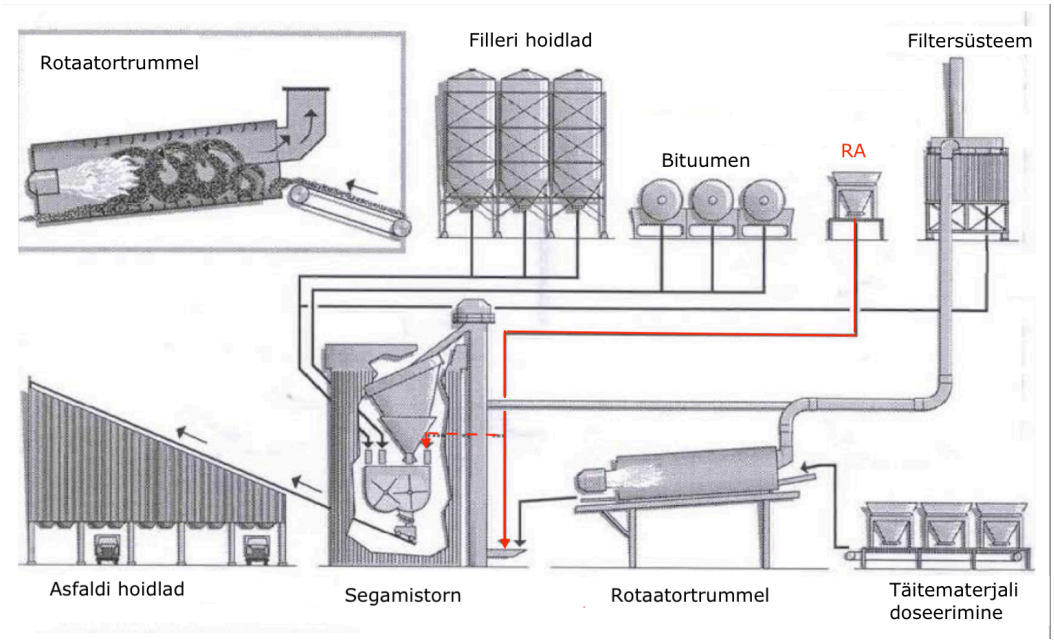
Parim viis RA kasutamiseks on selle lisamine uute asfaltsegude tootmisel, sest ainult selliselt saab RA-s olevat sideainet aktiveerida ja sihipäraselt taaskasutada. Asfalditehastes on kolm peamist meetodit RA soojendamiseks [38]:

- kuumutatud täitematerjalidega otsesel kokkupuutel;
- koos uue täitematerjaliga, aga ilma otsese kokkupuuteta;
- spetsiaalsete seadmetega.

Kuumutatud täitematerjalidega otsesel kokkupuutel RA soojendamine on külm meetod ning teised kaks on soojad meetodid.

3.4.1 RA lisamine külma meetodiga

Külma meetodiga jõuab RA segamisprotsessi kas kuivati tühjendamisel või täitematerjalide kaalul. Sellistes olukordades kuumutatakse taaskasutatud asfalt täitematerjaliga otse seguris (Joonis 3.4). Kuna täitematerjal peab oma temperatuuriga üles soojendama ka RA, siis kuumutatakse täitematerjali kõrgematel temperatuuridel (Tabel 3.1). Sobiv kogus uut bituumenit lisatakse segu lõplike omaduste järgi ning on oluline vältida taaskasutatud asfaldi ülekuumenemist. Selline meetod võimaldab asfaltsegusse lisada kuni 30% RA-d, sõltuvalt RA niiskussisaldusest [7], kuid näiteks Soomes on antud meetodit kasutades lubatud lisata vaid 10% RA-d. [15]



Joonis 3.4 Külma meetodiga RA lisamine [7]

Antud meetodi kasutamisel on oluline hoida RA niiskussisaldus võimalikult madalana, kuna selle piisavaks kuivatamiseks ja kuumutamiseks võib vaja minna pikemat segamisaega. Ülekuumenenud täitematerjalide ja külma RA kokkupuutel tekib tavaliselt oluline temperatuurikadu. Kirjeldatud asfalditehaste probleem on ka aur, mis tekib RA kokkupuutel ülekuumenenud täitematerjalidega - kahe materjali segunemine põhjustab kerge plahvatuse ning ulatusliku niiskuse ja tolmu eraldumise. [39] RA kokkupuudet ülekuumenenud täitematerjaliga tuleks vältida, kuna see põhjustab RA sideaine täiendavat vananemist ning süsivesinike eraldumist. [40]

Külma meetodi puhul tuleb arvestada ka kõrgemate segamistemperatuuride kasutamisega, näiteks Saksamaal on reguleeritud segamise temperatuur vastavalt lisatavale RA protsendile ja täitematerjali veesisaldusele (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Asfaldi tootmise temperatuuri tõstmine, seoses lisatava RA veesisaldusega Saksamaa normides [41]

RA sisaldus segus, %.	**Täitematerjalide segamise temperatuuri tõus, °C**					
	Täitematerjali veesisaldus, %					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
10	4	8	12	16	20	24
15	6	12	18	24	30	36
20	8	16	24	32	40	48
25	10	20	30	40	50	60
30	12	24	Ei ole lubatud			
35	14	28				
40	16	32				

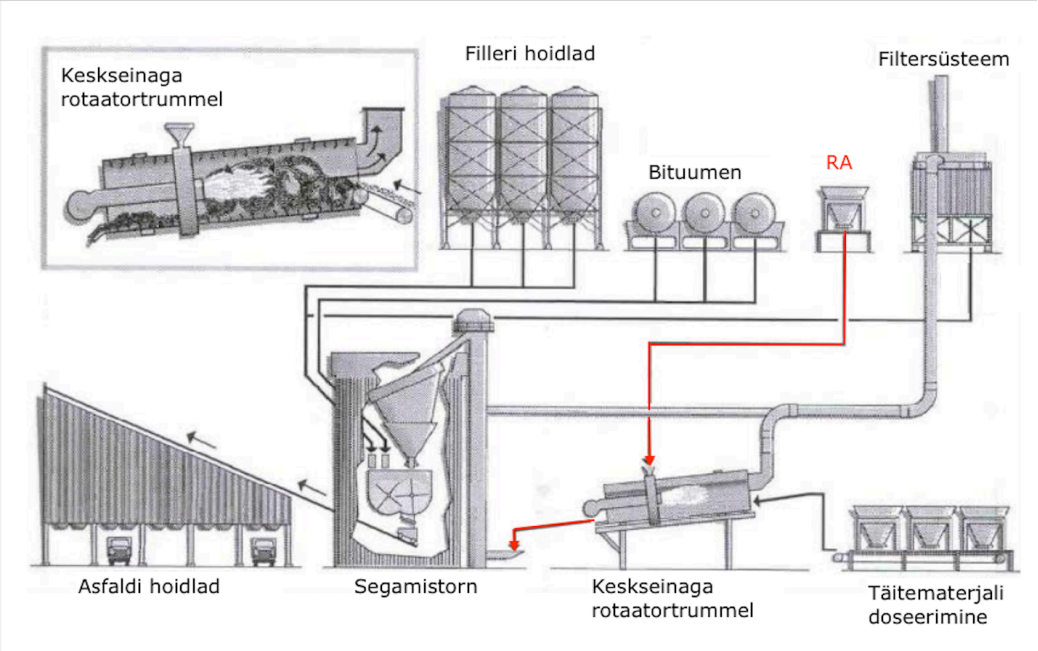
Kõrgemate temperatuuride kasutamine toob kaas suurema energiakulu ning uuringud on näidanud, et iga 12°C temperauuri tõus suurendab asfaldiaurude hulka 50%. [42]

3.4.2 RA lisamine sooja meetodiga

Sooja meetodiga RA lisamiseks on kasutusel peamiselt kaks meetodit:

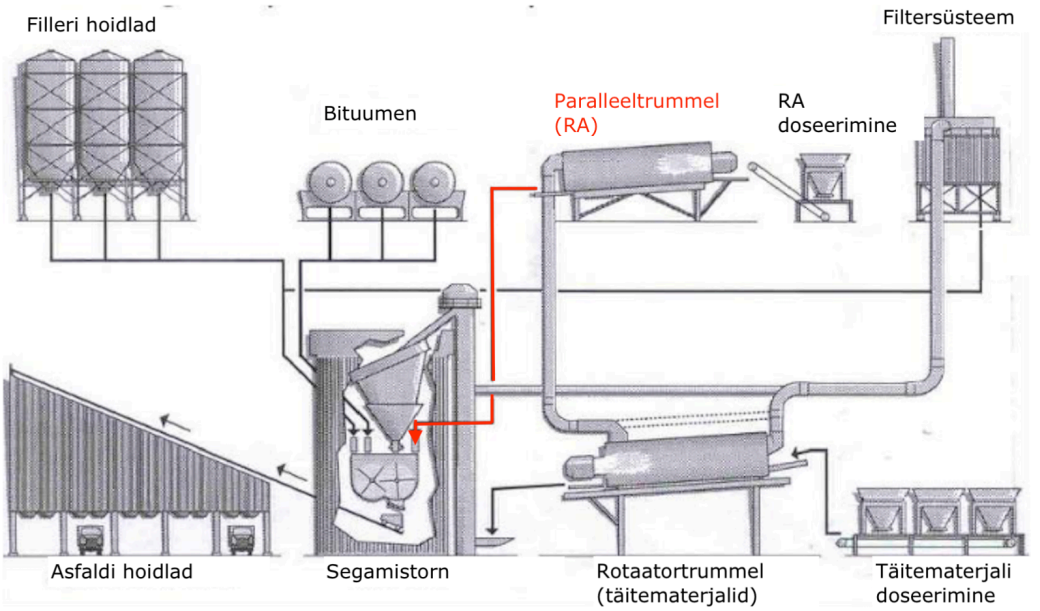
1) keskseinaga rotaatortrumli kasutamine;
2) paralleeltrumli kasutamine.

Keskseinaga rotaatortrumli kasutamisel kuumutatakse RA ja täitematerjal samas trumlis, kuid eraldi tsoonides, kus RA-d ja täitematerjali eraldab kesksein (Joonis 3.5). RA-l ei ole otsest kokkupuudet leegiga ning selliselt on võimalik RA lisamine uutesse asfaltsegudesse kuni 50%. [7]



Joonis 3.5 RA lisamine keskseinaga rotaatortrumli kasutamisel [7]

Paralleeltrumli kasutamisel (näidatud joonisel 3.6) kuumutatakse RA eraldi trumlis. Selliselt on lubatud asfalditootmisel kasutada kuni 80% RA-d pealiskihi segudes, kuid teoreetiliselt on võimalik kuni 100% RA kasutamine uue asfaltsegu tootmisel. Saksamaal on maksimaalne lubatud temperatuur RA kuumutamisel 130°C, et vähendada sideaine vananemist. [41]

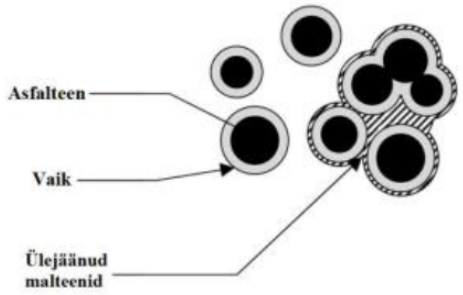


Joonis 3.6 RA lisamine paralleeltrumli kasutamisel [7]

3.5 Sideaine elavdajate ehk rejuvenaatorite kasutamine

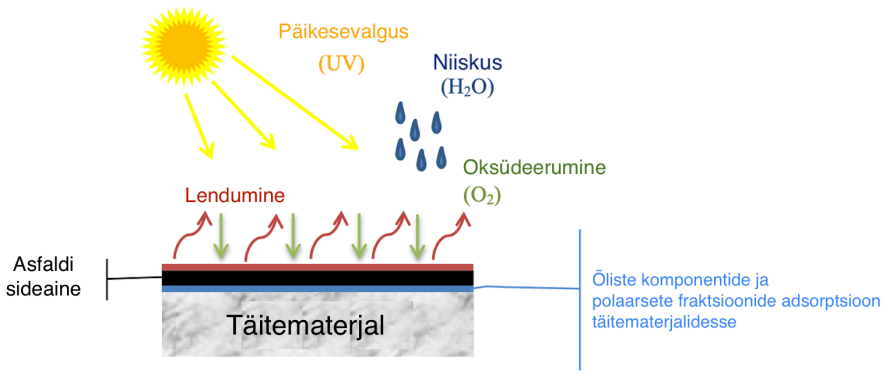
3.5.1 Sideaine vananemise protsess

Asfaldi sideaine on keeruline materjal. RA-sideaine ja vananemisnähtuse paremaks mõistmiseks on vajalik teada bituumeni fraktsioone. Bituumen fraktsioneeritakse kaheks alajaotuseks: asfalteenid ja malteenid. Asfalteenide funktsioon on aine konsistentsi paksendamine, pärast millede sadestumist jäävad malteenid alles. [43] Bituumeni koostist lihtsustatud kujul kujutab joonis 3.7. [44] [45]



Joonis 3.7 Bituumeni koostis lihtsustatud kujul [44] [45]

Vananemisprotsessi käigus väheneb malteenide/asfalteenide suhe, mille tulemuseks on lõpuks jäigem, kuivem ja rabedam sideaine. Selle protsessi saab jagada kaheks etapiks. Esimene faas toimub ehitusperioodil kõrge temperatuuri tõttu. Seda protsessi nimetatakse lühiajaliseks vananemiseks ja seda mõjutavad peamiselt sideaine oksüdatsioon, lendumine ja õli koostisosade, sealhulgas asfalteenide ja vaigu redutseerimine täitematerjalidesse imendumise teel. Teist faasi nimetatakse pikaajaliseks vananemisprotsessiks, mis toimub katendi kasutusea jooksul, kui asfaltsegud on allutatud ilmastikumõjudele ja oksüdeerumisele ning mille väärtus sõltub segu tühimike hulgast (joonis 3.8). Pikaajaline vananemine toimub pinnakihtide oksüdatsiooni, polümerisatsiooni ja fotooksüdatsiooni tõttu. Pikaajaline vananemine sõltub asfaltsegu struktuurist. Näiteks avatud asfaltsegud, nagu poorne asfaltbetoon, on pikaajalise vananemise suhtes tundlikumad. [46]



Joonis 3.8 Asfaldi sideaine vananemisnähtused [43]

3.5.2 Sideaine elavdamine

Asfaltkatte taaskasutamisel tuleks vananenud sideaine pehmendamiseks ja vananemise negatiivse mõju minimeerimiseks kasutada uut sideainet. See sideaine võib olla kas ainult rejuvenaator või pehmem bituumen koos rejuvenaatoriga. [47] Kirjanduses on toodud, et väiksema koguse RA kasutamisel võib kasutada pehmemat bituumenit, kuid kõrge RA sisalduse korral tuleks eriti pehme bituumeni kasutamisele eelistada rejuvenaatoreid. [48]

Rejuvenaatorid on ained, mille eesmärk on vananenud bituumeni reoloogiliste omaduste taastamine. Rejuvenaatorid ei suuda tootmisetapis taastada algse bituumeni keemilist koostist. Eelkõige bituumeni teatud osade oksüdeerumise mõju ei saa ümber pöörata tööstuslikul tootmisel asfalditehases. Eesmärk on parandada reoloogilist käitumist, et taastada bituumeni kõik olulised mehaanilised omadused, mis on vajalikud kehtivatele tehnilistele eeskirjadele vastava ja sihtotstarbeliseks kasutamiseks sobiva asfaltsegu tootmiseks. [49]

Rejuvenaatorid tuleks asfaldile lisada ainult siis, kui on võimalik näidata, et [49]:
• rejuvenaatorite ladustamise, töötlemise, kasutamise ja pealekandmise ajal ei esine praegu ega tulevikus negatiivseid keskkonnamõjusid;
• toodetud asfaldi töötlemise, kasutamise ja laotamise ajal ei ole praegu ega tulevikus mingeid puudusi töötajate ja elanikkonna tervise ja ohutuse seisukohast;
• asfaldi edaspidine taaskasutamine ei ole ohus;
• asfaldi tervise- ja keskkonnaklassifikatsiooni ei mõjutata rejuvenaatori lisamisega (nt kui see on saadud jäätmetest);
• puudub negatiivne mõju asfaldi toote tehnilistele omadustele praegu ja tulevikus.

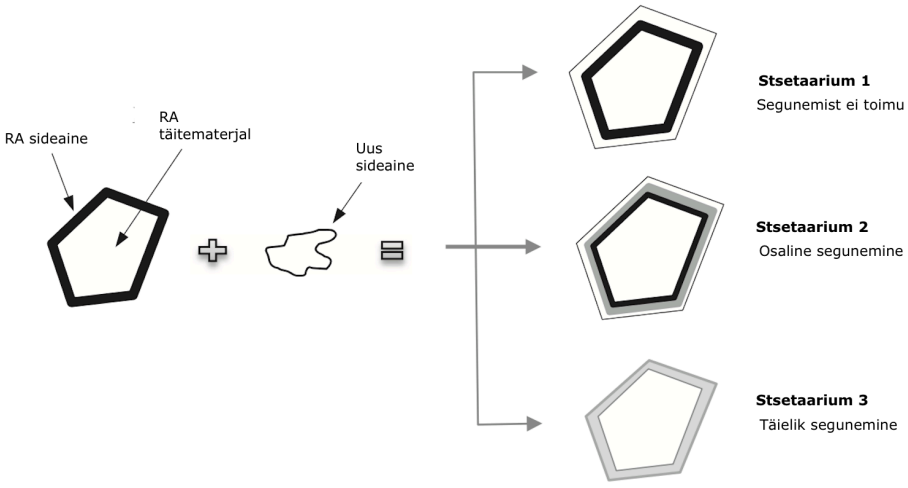
Rejuvenaatoreid on erinevat tüüpi ning nende jagamine on kirjandusest lähtuvalt erinev. Üks võimalus rejuvenaatorite liigitamiseks on nende jagamine viieks suuremaks

kategooriaks: parafiinsed õlid, aromaatsed ekstraktid, nafteenõlid, triglütseriidid ja rasvhapped ning tallõlid. [50]

3.5.3 Elavdajate ehk rejuvenaatorite doseerimine

Lõpliku sideaine homogeensus on oluline tegur, mis üldiselt sõltub tootmisparameetritest (nt segamisaeg, segamistemperatuur), tootmisseadmete tüübist, RA sisestamise meetodist ja esmase sideaine või noorendava aine tüübist. [51] Uuringutes on välja toodud, et RA sideaine ja värske lisatava bituumeni homogeniseerimine toimub järk-järgult ning sõltub suuresti tootmistemperatuurist ja segamisajast. Kui segamistemperatuuri alandada 30°C võrra, tuleks segamisaega kahe- või kolmekordistada, et saavutada identne segamisaste. [52]

Rejuvenaatorite kasutamisel tuleb kindlaks määrata vananenud RA sideaine ja värske sideaine vahelise koostoime tase. Joonisel 3.9 on skemaatiline vaade kolmest erinevast segamisstsenaariumist RA ja värske lisatava bituumeni vahel. Jooniselt nähtub, et vananenud asfaldisideaine toimib musta kivina. Juhtudel kui nn musta kivi bituumen ei segune ringlussevõtu ainega segunemist ei toimu. HMA-segude RA materjalide kavandamisel eeldatakse, et kogu vananenud bituumen on segus saadaval ja seda saab täielikult segusse lisada, ehk toimub täielik segunemine. [43] Kuid katsetused on näidanud, et enamikul juhtudel toimub RA ja uue sideaine osaline segunemine. [52] Seetõttu tuleb lõpliku segu sobivuse uurimiseks läbi viia laboratoorsed katsetused.



Joonis 3.9 Uue ja vana sideaine segunemise kolm stsenaariumit [53]

Kirjanduse andmetel on elavdamiseks kolm meetodit. Kõige levinum viis rejuvenaatorite kasutamiseks on nende segamine kõrgel temperatuuril (140–150°C) vananenud asfaltseguga. [43] Teine võimalus on rejuvenaatorite kapseldamine ja segusse segamine. Katte vananedes aastate jooksul kapslid purunevad ja vabastavad sideaine

elavdajad, mis pehmendavad vananenud bituumenit. Kolmas võimalus on rejuvenaatorid lahjendada veepõhistes emulsioonides ja pihustada teekattele. [38]

Asfalditehastes segatakse rejuvenaatorid tavaliselt bituumeniga ning seejärel täitematerjalidega. Teine võimalus on segada rejuvenaator kuumutatud või ka kuumutamata RA-ga enne, kui segatakse uue täitematerjali ja bituumeniga. Näiteks mõned Jaapani asfalditehased soojendavad RA 165°C-ni ja segavad seejärel rejuvenaatoriga [25]; Šveitsis pihustati rejuvenaatorit kuumutamata RA-le enne, kui RA segati esmase täitematerjali ja bituumeniga. [54]

Rejuvenaatorite kasutamisel on oluline alati määrata lisatav rejuvenaatori kogus laboratoorsel katsetamisel, mitte lähtudes varasemast kogemusest või muust lähteallikast. [55]

4. RINGLUSSEVÕETAVA ASFALDI KATSETAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Freesimine

Käesoleva lõputöö raames kasutatud freespuru saadi riigitee nr 4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 141,7-142,1 freesimisel. Teeregistri andmetel on antud teelõigul pealiskihiks 2012. aasta juulis Novaflex meetodil ehitatud killustikmastikasfalt SMA 12, kihi paksus on h=3 cm. Aluskihtideks on AC 12 surf kihipaksusega h=4 cm ning selle all AC 16 base segu kihipaksusega h=6 cm.

Freesimistööd teostati 27.03.2023 Wirtgen W 210 Fi asfaldifreesiga (joonis 4.1), mille laius on 2000 mm ja maksimaalne freesimise sügavus 330 mm [28], freesimisel oli kasutusel standardne trummel (joonis 4.1). Freesimistööde käigus eemaldati asfaldi pealiskiht h=5 cm, mis Teeregistri andmetel on SMA 12 ja AC 12 surf segu.

Joonis 4.1 Wirtgen W 210 Fi asfaldifrees teostamas kihiti freesimist (Autori erakogu)

4.2 Ringlussevõetava asfaldi katseplaan

Vastavalt EVS-EN 13108-8:2016 standardile tuleb ringlussevõetud asfaldil määrata: võõrlisandite olemasolu, sisaldus ja tüüp (standardi jaotis 4.1), sideaine tüüp (4.2.1), keskmine täitematerjali terakoostis (4.3), keskmine sideainesisaldus (4.4) ja maksimaalne ringlussevõetud asfaldi tükisuurus (4.5). [1]

RA katseplaan koostati selliselt, et materjali oleks võimalik kasutada riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel kasutatavas AC 20 surf 70/100 asfaltsegus, mille AKÖL on 3000-5999 ja raskeliikluse osakaal >10%.

EVS-EN 901-3:2021 Osa 3 Asfaltsegud seab AKÖL 3000-5999 korral täitematerjalide kvaliteediomadustele nõuded, mis on esitatud tabelis 4.1. [2]

Tabel 4.1 EVS-EN 901-3:2021 Osa 3 Asfaltsegud kohased nõuded täitematerjalide kvaliteediomadustele AKÖL 3000-5999 korral [2]

Purustatud pindade kategooria	**Purunemiskindlus LA**	**Kulumiskindlus Nordic**	**Külmakindlus NaCl**
C100/0	LA25	AN14	FNaCl4

Objektilt võetud proovid toimetati Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis, kus viidi läbi käesoleva lõputöö raames teostatavad katsetused. Ringlussevõetavale asfaldile teostatud katsetused koos kasutatud katsestandardiga on kajastatud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Ringlussevõetava asfaldiga teostatud katsetused ja kasutatud katsemeetodid

Nr	**Katse nimetus**	**Katsestandard**
1	Ekstraheerimine	EVS-EN 12697-1:2020; EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019
2	Tüki suurus (kuivsõelumine)	EVS-EN 13108-8:2016 ja EVS-EN 933-1:2012
3	Võõrlisandite sisaldus	EVS-EN 12697-42:2021
4	Bituumeni eraldamine rotaatoraurustiga	EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018
5	Nõelpenetratsiooni määramine	EVS-EN 1426:2015
6	Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga	EVS-EN 1427:2015
7	Tera kuju määramine plaatsusteguriga	EVS-EN 933-3:2012
8	Purunemiskindluse määramine Los Angelese meetodiga	EVS-EN 1097-2:2020
9	Terade tiheduse ja veeimavuse määramine	EVS-EN 1097-6:2022 p 8
10	Petrograafiline kirjeldus	EVS-EN 932-3:2022
11	Kuivtihedus+kulumiskindlus Nordic	EVS-EN 1097-9:2014

Objektilt võetud freesasfaldi katseproov on näidatud joonisel 4.2.

Joonis 4.2 Objektilt võetud freesasfaldi katseproov (Autori erakogu)

4.2.1 Võõrlisandite sisaldus

Võõrlisandite sisaldus tuleb määrata vastavalt EVS-EN 12697-42:2021, mis kirjeldab, et proovi kogus peab olema minimaalselt 20 kg. Vastavalt standardile sõeluti proov läbi 8 mm-se sõela ning seejärel jagati kaheks osaprooviks. [56] Võõrlisandite sisalduse katse teostati kõigile neljale osaproovile. Standard näeb ette, et võõrlisandid määratakse visuaalsel vaatlemisel (Joonis 4.3). Lõputöö raames kasutatud freespurus võõrlisandite sisaldust ei esinenud ning seega oli katse tulemusena võõrlisandite sisaldus 0,0%.

Joonis 4.3 Võõrlisandite sisalduse katse vastavalt EVS-EN 12697-42 (Autori erakogu)

4.2.2 Täitematerjalide terakoostis

Täitematerjali terakoostis leiti vastavalt EVS-EN 12697-2:2015, mille kohaselt täitematerjal esmalt eraldati segust ning visuaalselt veenduti, et teradele ei ole jäänud

kleepunud sideainet. Seejärel kuivatati proov püsiva massini ning veenduti, et osakesed on üksteisest täielikult lahutatud. Lisaks sõelumata materjalile teostati terastikulise koostise katsetus ka sõelutud materjalile, selle jaoks sõeluti freesasfalt läbi 8 mm-se sõela ning koostati terastikuline koostis kokku kolmele täitematerjali proovile (fr. 0-12, 0-8 ja 8-12). Ringlussevõetava asfaldi täitematerjali sõelkõvera katsetulemused on näha tabelis 4.3. Täiendavalt sõeluti fr. 0-8 ja 8-12, et asfaltsegu sõelkõvera projekteerimisel oleks võimalik valik laiem. Teatavasti seab RA peenosiste sisaldus asfaltsegu sõelkõvera projekteerimisel piirangu lisatavale RA kogusele.

Tabel 4.3 Ringlussevõetava asfaldi täitematerjali sõelkõvera katsetulemused

Sõel, mm	**Fr. 0-12**	**Fr. 0-8**	**Fr. 8-12**
	Sõela läbind, %		
16	100	100	100
12,5	100	100	99
8	85	100	67
6,3	75	97	52
4	57	80	39
2	44	62	31
1	34	48	25
0,5	28	38	20
0,25	22	29	16
0,125	17	21	13
0,063	13,4	15,7	10,7

Katsetulemustest nähtub, et sõelumisel peenemaks fraktsiooniks suurenes peenosiste sisaldus 2,3% ja sõelumisel jämedamaks fraktsiooniks vähenes peenosiste sisaldus 2,7%.

4.2.3 Terade tihedus

Täitematerjali terade tihedus leiti vastavalt EVS-EN 1097-6:2022 punkt 8, mille kohaselt määrati täitematerjali terade tihedus püknomeetrimeetodiga. Antud meetodit tuleb kasutada 31,5 mm katsesõela läbinud ja 4 mm katsesõelale jäänud täitematerjali terade puhul. Peenosiste eraldamiseks pesti osaproovi sõeltel 31,5 mm ja 4 mm. Ettevalmistatud katseproov kallati püknomeetris temperatuuril 22°C olevasse vette ning eemaldati kaasatud õhk kallutatud püknomeetrit ettevaatlikult raputades. Püknomeeter katseprooviga asetati veevanni ja seda hoiti seal temperatuuril (22±3°C) 24 tundi. Immutamise lõpul võeti püknomeeter vannist välja ning eemaldati kaasatud õhk püknomeetrit ettevaatlikult raputades. Seejärel täideti püknomeeter veega kuni ülevoolamiseni ja suleti selliselt, et anumasse ei satuks õhku. Püknomeetri välispind

kuivatati ja kaaluti (M_2). Täitematerjal võeti veest välja ning sellel lasti mõni minut nõrguda, mille järel püknomeeter täideti uuesti veega ning suleti kaanega. Välispind kuivatati ja püknomeeter kaaluti (M_3). Siinkohal on oluline silmas pidada, et vee temperatuuride erinevus kahel kaalumisel ei ületa 2°C. Nõrutatud katseproov asetati vettimavale rätikule, millega õrnalt kuivatati täitematerjali pinda, seejärel laotati täitematerjali terad teisele rätikule ühekordse kihina õhu kätte seisma kuni nähtav veekiht terade pinnal oli kadunud, kuid täitematerjal oli endiselt niiske. Küllastunud ja pindkuiv katseproov asetati alusele ja täitematerjal kaaluti (M_1). Seejärel kuivatati täitematerjal kuivatuskapis temperatuuril 110°C konstantse massini ning lasti sellel jahtuda ümbritseva keskkonna temperatuurini ning seejärel kaaluti täitematerjal (M_4). [57]

Terade tihedus (vastavalt ρ_a, ρ_{rd}, ρ_{ssd}) megagrammides kuupmeetri kohta arvutatakse valemitega (4.1-4.3) ning materjali veeimavus WA_{24} valemiga (4.4). [57]

Valem 4.1 [57]:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4-(M_2-M_3)} \quad (4.1)$$

Valem 4.2 [57]:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1-(M_2-M_3)} \quad (4.2)$$

Valem 4.3 [57]:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1-(M_2-M_3)} \quad (4.3)$$

Valem 4.4 [57]:

$$WA_{24} = \rho_w \frac{M_1-M_4}{M_4} * 100 \quad (4.4)$$

kus

ρ_w *on vee tihedus katsetemperatuuril megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m³);*

M_1 *on küllastunud ja pindkuiva täitematerjali mass õhus grammides (g);*

M_2 *on küllastunud katseproovi ja vett sisaldava püknomeetri mass grammides (g);*

M_3 *on ainult veega täidetud püknomeetri mass grammides (g);*

M_4 *on väljakuivatatud katseproovi mass õhus grammides (g).*

Katse tulemusel saadi, et terade näivtihedus ρ_a=2,71 Mg/m³ , väljakuivatatud terade tihedus ρ_{rd}=2,70 Mg/m³ , küllastunud pindkuivade terade tihedus ρ_a=2,70 Mg/m³ ja veeimavus WA_{24}=0,2%. Tulemustest saab järeldada, et tegu on 100% tardkivimiga,

mida kinnitab ka visuaalne hinnang. Sellest tulenevalt ei teostatud materjalile petrograafilise kirjelduse katset vastavalt EVS-EN 932-3:2022.

4.2.4 Purunemiskindlus

Täitematerjali purunemiskindlus määrati Los Angelese meetodiga vastavalt EVS-EN 1097-2:2020 standardile. Katse teostati täitematerjaliga, mis läbib 14 mm sõela ning jäi pidama 10 mm avadega katsesõelal (fraktsioon 10/14 mm). Kaaluti välja katseproovi mass, mis standardi kohaselt peab olema (5000±5) grammi. Enne katse teostamist veenduti trumli puhtuses ning seejärel asetati trumlisse esmalt kuulid ja seejärel katseproov. Trumli täiteava suleti kaanega ja lasti konstantsel pöörlemissagedusel 31 pööret/minutis teha 500 pööret. Peale trumli töö lõpetamist tühjendati trummel seadme alla paigaldatud anumasse. Anumast võetud mass sõeluti 1,6 mm avaga kaitsesõelal. Kaitsesõelale ja 1,6 mm avadega kaitsesõelale jäänud materjal pesti voolava puhta veega ning asetati kaussi. Kaussi asetatud materjal kuivatati konstantse massini ning lasti jahtuda toatemperatuurini. Seejärel registreeriti mass m, täpsusega 1 gramm.
Los Angelese tegur LA arvutati valemiga (4.5). [58]

Valem 4.5 [58]:

$$\mathrm{LA} = \frac{5000-m}{50} \qquad (4.5)$$

kus m on jääk 1,6 mm avadega sõelal grammides.

Tulemus esitatakse vastavalt standardile täisarvuna. [58] Antud lõputöös katsetatava materjali purunemiskindlus leiti olevat 25%.

4.2.5 Kulumiskindlus

Täitematerjali kulumiskindlus määrati vastavalt EVS-EN 1097-9:2014 standardile, mille kohaselt pesti proov 2 mm sõelal ning kuivatati konstantse massini kuivatuskapis temperatuuril 110°C. Pestud ja kuivatatud proov sõeluti kaheks üksikkatseprooviks fraktsioonid 11,2/14 mm ja 14/16 mm. Täide ja teraskuulid asetati kolme ribiga trumlisse (joonis 4.4) ning trumlisse lisati 2 liitrit vett. Trummel pöörlemissagedusega 90 pööret/minutis teostas kokku 5400 pööret, mille järel koguti täitematerjal ja teraskuulid pannile. Materjal valati koos pesuveega, mida kasutati trumli kaane ja sisepindade pesemisel 2,0 mm kaitsesõelaga sõelale. Seejärel pesti materjal puhta vee all. Peale pesemist eemaldati täitematerjali osakesed teraskuulidest. Kaitsesõelale ja 2,0 mm sõelale jäänud täitematerjali osakesed asetati kandikule ning kandik koos materjaliga läks kuivatuskappi temperatuuril 110°C kuivama. Sama tehti läbi ka teise osaprooviga (fr. 14/16). [59]

Põhjamaade katse kulumiskindluse väärtus A_N leitakse valemiga (4.6). [59]

Valem 4.6 [59]:

$$A_N = 100 - (M_1 - M_2)/M_1 \quad (4.6)$$

kus

M1 on üksikkatseproovi esialgne kuivmass grammides;

M2 on suurema kui 2 mm läbimõõduga terade kuivmass, mis on saadud pärast kulumist, grammides.

Joonis 4.4 Kolme ribiga trummel (Autori erakogu)

Tulemus esitatakse vastavalt standardile täpsusega 0,1. Katsetatud proovi kulumiskindluse väärtus oli 7,6%.

4.2.6 Plaatsustegur

Plaatsusteguri katse teostati vastavalt EVS-EN 933-3:2012. Katse käigus sõeluti materjal esmalt läbi tavaliste sõelte ning seejärel sõeluti iga fraktsioon läbi fraktsioonile vastava ruutavadega varbsõela. Varbsõelte komplekti näidis on kajastatud joonisel 4.5. Proovile määrati üldine plaatsustegur, mis on kõikide varbsõelu läbinud terade summaarne mass protsentides katsetatud materjali üldisest kuivast massist. [60]

Joonis 4.5 Varbsõelte komplekt [61]

Materjali kõrge plaatsustegur mõjutab oluliselt asfatsegude tugevus- ja stabiilsusomadusi. Uuringud on näidanud, et plaatsusteguri suurenedes 10% võrra langeb ka asfaltsegude Marshalli stabiilsus ca 10%. J.Gayathri ja Dr P.Lakshmaiah Chowdary uuringust järeldati, et plaatsustegur tuleks hoida alla 30% [62].

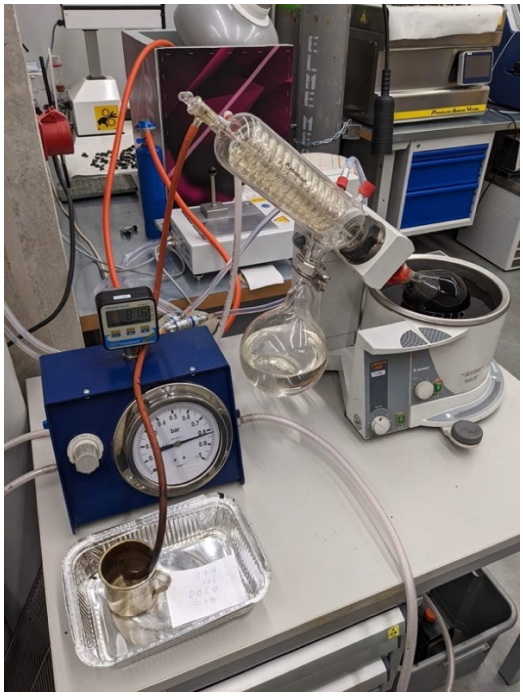
Lõputöös katsetatud täitematerjali plaatsusteguri katsetulemus oli 8%. Tulemustest saab järeldada, et täitematerjali plaatsustegur ei ole freesimise mõjul suurenenud, mida järeldati ka Zaumanise jt poolt Šveitsis läbiviidud uuringus. [31]

4.2.7 Sideaine nõelpenetratsioon ja pehmenemistäpp

Bituumeni ekstraheerimine teostati vastavalt EVS-EN 12697-1:2020 standardile. Esmalt segati piisavas koguses välja mõõdetud proov lahustiga, milleks kasutati metüleenkloriidi. Lahusti eesmärgiks on lahustada bituumen. Pärast seda valati proov poolautomaatsesse ekstraheerimise seadmesse (kujutatud joonisel 4.6). Ekstraheerimise tulemusel eraldati täitematerjalid ning lahusti koos lahustunud bituumeniga. [63] Viimane koguti kokku, et teostada edasine bituumeni eraldamine rotatsioonaurustiga destilleerides.

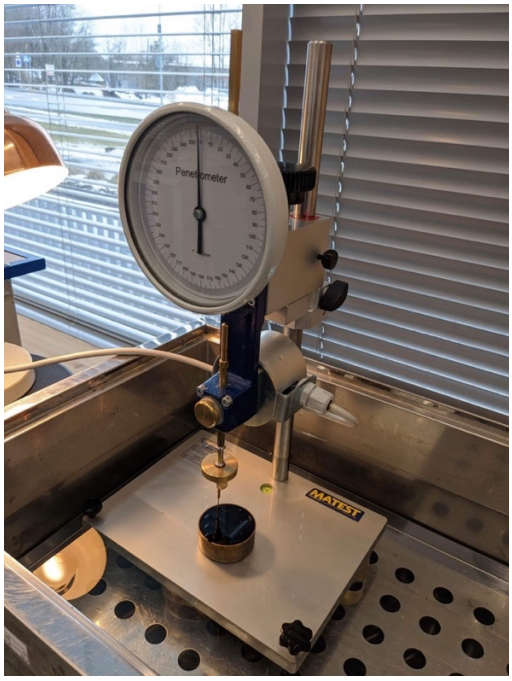
Joonis 4.6 Poolautomaatne ekstraheerimise seade (Autori erakogu)

Pärast täitematerjalide eemaldamist tuli eraldada lahusest metüleenkloriid, et bituumen taastada. Selleks sooritati bituumenilahusega vaakumdestillatsioon, kasutades rotatsiooniaurustit. Bituumeni eraldamine rotatsiooniaurustiga destilleerides teostati vastavalt EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018 ning kasutatud katseseade on kujutatud joonisel 4.7. [64] Seejärel suunati bituumen edasi nõelpenetratsiooni ja pehmenemistäpi katsetustesse.



Joonis 4.7 Bituumeni eraldamine rotatsiooniaurustiga (Autori erakogu)

Nõelpenetratsiooni katse teostati vastavalt EVS-EN 1426:2015. Katse põhimõtteks on määrata bituumeni viskoossust. Katsetulemused saadi kui mõõdeti koormatud standardse nõela läbitungimist bituumeni katseproovi (Joonis. 4.8). Olenevalt bituumeni margist on ettenähtud erinevate parameetritega katsed. Antud juhul oli tegemist 70/100 ja 100/150 bituumenitega, mis tähendab, et penetratsioonide puhul väärtustega kuni 330 mm × 0,1 mm on katseparameetriteks temperatuur 25°C, rakendatav koormus 100 g ning koormamisaeg 5 sekundit. [65]



Joonis 4.8 Bituumeni penetratsiooni katsetamine penetromeetriga (Autori erakogu)

Samuti määrati pehmenemistäpp, kasutades selleks kuuli ja rõnga meetodit, mida teostati EVS-EN 1427:2015 põhjal. Katse eesmärk on iseloomustada temperatuuri, kus bituumeni toimivus teekattes lakkab ning see pole võimeline vastu võtma koormusi. Antud katse abil on võimalik hinnata vastupidavust plastsetele deformatsioonidele. [66] Kõik RA bituumenile teostatud katsetulemused on esitatud tabelis 4.4.

Tabel 4.4 Kolme RA fraktsiooni lahustuva sideaine sisaldus ning RA 0/12 bituumeni penetratsioon ja bituumeni pehmenemistäpp katsetulemused

RA fraktsioon, mm	**Lahustuva sideaine sisaldus, %**	**Bituumeni penetratsioon, 0,1 mm**	**Bituumeni pehmenemistäpp, °C**
0/12	5,8	63	50
0/8	6,8	Ei teostatud	Ei teostatud
8/12	5,8	Ei teostatud	Ei teostatud

Tulemustest saab järeldada, et bituumeni omadused on väga hästi säilinud ja ei ole ekspluatatsiooni käigus oluliselt halvenenud. Võrreldes tulemusi muu maailma praktikaga, saab samuti järeldada, et materjal sobib väga hästi kasutamiseks uute asfaltsegude tootmisel, näiteks Jaapanis kasutatakse uute asfaltsegude tootmisel RA-d, mille penetratsioon on 20. [25] Saksamaal on maksimaalne lubatud pehmenemistäpp kasutatava RA bituumenil 77°C. [27] Soomes on lubatud lisada kuni 50% RA-d AC surf segudes, kui bituumeni penetratsioon on ≥28. [15]

5. ASFALTSEGUDE KATSETAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS

5.1 Seguretseptide projekteerimine

Seguretseptide koostamisel võeti referentsiks riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel kasutatav AC 20 surf 70/100 segu, mille AKÖL on 3000-5999 ja raskeliikluse osakaal >10%.

Käesoleva lõputöö raames katsetatud freespuru vastab kõikidele EVS 901-3:2021 Osa 3 Asfaltsegud standardis AKÖL 3000-5999 ja raskeliiklus >10% sätestatud tingimustele ning on sobilik kasutamiseks antud asfaltsegu täitematerjalina.

RA tulemustest johtuvalt valiti võrdluse tekitamiseks kolm erinevat asfaltsegu, millele lisati vastavalt 10%, 30% ja 50% RA-d. RA bituumeni reoloogilisi omadusi peeti piisavalt heaks, millest tulenevalt valiti lisatava bituumeni margiks 70/100. Pehmema bituumeni mõju hindamiseks segati üks 50% RA sisaldusega katsesegu ka 100/150 bituumeniga.

Seguretsepti sõelkõverad projekteeriti selliselt, et sõelkõver oleks kõikidel segudel võimalikult sarnane. Sõelkõvera projekteerimisel kasutati ringlussevõetud asfaldit fraktsiooniga 0/12 mm. Märkusena võib välja tuua, et suurema kui 50% lisamise korral oleks vajalik ilmselt RA lähtematerjali töödelda ning lisada segusse jämedama fraktsioonina (näiteks fr 8/12), mille peenosiste sisaldus oleks madalam.

Seguretsepti bituumeni sisalduse arvutamiseks leiti ka uute bituumenite penetratsioon, mis oli 70/100 bituumeni puhul 80 ja 100/150 bituumeni puhul 120. Selle põhjal oli võimalik leida arvutuslik segu penetratsioon vastavalt valemile (5.1). [67]

Valem 5.1 [67]

$$pen_{mix} = a * pen_1 + b * pen_2 \quad (5.1)$$

kus
pen_{mix} on valmistatava segu arvutuslik penetratsioon;
pen_1 on RA penetratsioon;
pen_2 on uue sideaine penetratsioon;
a ja b on vastavalt lisatava RA kogus (a) ja lisatava uue bituumeni kogus (b);
a+b=1.

Saadud tulemused on kajastatud tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Valmistatava segu arvutuslik penetratsioon

Asfaltsegu tüüp	Arvutuslik bituumeni penetratsioon, 0,1 mm
AC 20 surf 70/100 referentssegu	80
AC 20 surf 70/100 RA10%	78
AC 20 surf 70/100 RA30%	75
AC 20 surf 70/100 RA50%	72
AC 20 surf 100/150 RA50%	92

Asfaltsegude projekteeritud seguretseptid on välja toodud lõputöö lisades 1–5.

5.1.1 Asfaltsegude segamine

Asfaltsegude segamine toimus TREV-2 Grupp AS akrediteeritud laboris vastavalt EVS-EN 12697-35:2016 standardile. Lisaks referentssegule segati käesoleva lõputöö tarbeks veel neli proovi vastavalt tabelis 5.2 toodule. Enne segamist kaaluti ja kuivatati kõik täitematerjalid kaasaarvatud RA Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis vastavalt standardis kirjeldatule. Ettevalmistavad tegevused bituumeniga teostati TREV-2 Grupp AS laboris. Standardis on toodud nõuded maksimaalsele tihendamistemperatuurile, mis 70/100 bituumeni puhul on 145°C ja 100/150 bituumeni puhul 140°C. Standardis ei ole otseselt käsitletud segude nõutav segamistemperatuur, kuid on välja toodud, et see ei tohi olla rohkem kui 20°C kõrgem tihendamistemperatuurist. Kõikide lõputöö raames katsetatud asfaltsegude segamisel kasutati segamistemperatuuri 160°C. Esmalt segati omavahel muu täitematerjal koos bituumeniga ilma RA-d lisamata ning alles seejärel lisati RA ja segati kokku muu täitematerjali ja bituumeniga. Segamine teostati joonisel 5.1 näidatud laboratoorse seguriga ning kõiki segusid segati kokku 70 kg. [68] Lähtematerjalide täpsed kogused asfaltsegude laboratoorsel segamisel on toodud iga segu kohta käesoleva lõputöö lisas 8. Edasiseks katsetamiseks transporditi proovid Tallinna Tehnikaülikooli laborisse.

Tabel 5.2 TREV-2 Grupp AS laboris segatud asfaltsegud

Nr	Asfaltsegu	Doseeritav bituumen, %	Segu kogus, kg
1	AC 20 surf 70/100	5,00	70
2	AC 20 surf 70/100 (RA 10%)	4,41	70
3	AC 20 surf 70/100 (RA 30%)	3,24	70
4	AC 20 surf 70/100 (RA 50%)	2,08	70
5	AC 20 surf 100/150 (RA 50%)	2,08	70

Joonis 5.1 TREV-2 Grupp AS laboris kasutusel olev laboratoorne segur asfaltsegude segamiseks (Autori erakogu)

5.2 Asfaltsegude katseplaan

Antud lõputöö raames teostatavad katsed teostati Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Kõigile viiele asfaltsegule teostati katsed vastavalt tabelis 5.3 toodule.

Tabel 5.3 Ringlussevõetava asfaldiga teostatud katsetused ja kasutatud katsemeetodid

Nr	Katse nimetus	Katsestandard
1	Ekstraheerimine (lahustuva sideaine sisaldus ja terastikuline koostis)	EVS-EN 12697-1:2020; EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019
2	Proovikehade valmistamine lööktihendajaga ja güraatortihendajaga	EVS-EN 12697-30:2018; EVS-EN 12697-31:2019
3	Mahumassi määramine (meetod B)	EVS-EN 12697-6:2020
4	Näiva erimassi määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-5:2018
5	Veepüsivus (meetod A)	EVS-EN 12697-12:2018
6	Deformatsioonikindlus (meetod B)	EVS-EN 12697-22:2020
7	Kulumiskindlus (meetod A)	EVS-EN 12697-16:2016
8	Pragude levimine poolringikujulisel proovikehal paindekatsega	EVS-EN 12697-44:2019
9	Bituumeni eraldamine rotaatoraurustiga	EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018
10	Nõelpenetratsiooni määramine	EVS-EN 1426:2015
11	Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodiga	EVS-EN 1427:2015

5.2.1 Mahumass ja erimass

Erimass on õhupoorideta asfaltsegu mass mahuühiku kohta. Mahumass on asfaltsegu mass mahuühiku kohta koos proovikeha õhupooridega. Erimassi koos mahumassiga kasutatakse tihendatud proovikeha poorsuse ja tihendatud asfaltsegude muude mahuliste omaduste määramiseks. Mahumassi määramise eelduseks on proovikehade valmistamine ning seda tehti EVS-EN 12697-30:2018 Standardi järgi. Proovikehad valmistati lööktihendajaga - valmistamine algas asfaltsegu kuumutamisega tihendamistemperatuurile, mis peab vastama bituumeni penetratsioonile. Enne esimese proovikeha valmistamist kuumutati vorm ja tihendamisvasar. Peale vajalike temperatuurideni jõudmist täideti vorm ühtlaselt asfaltseguga, vältides segregeerumist. Segu tihendamine toimus tihendusvasaraga, mis töötab langevaraskusena. Kokku sooritati 50 lööki. Peale tihendamist lasti proovikehal ja vormil jahtuda vähemalt 40°C ning seejärel eemaldati proovikeha vormist. [69]

Asfaltsegu erimass (poorideta mass) leiti vastavalt standardile EVS-EN 12697-5:2018. Näiva erimassi määramiseks kasutati mahulist protseduuri (meetod A), mille korral mõõdetakse teadaoleva kuivmassiga proov jämedateks osisteks ja aglomeraatideks kobestatud asfaltsegu maht vee väljasurve alusel püknomeetris. [70]

Asfaltproovikeha mahumass määrati proovikeha massi ja mahu põhjal kasutades meetodit B – immutatud ja kuivatatud pinnaga (SSD), mis on kirjeldatud standardis EVS-EN 12697-6:2020. Proovikeha maht saadakse selle kaalumisel õhus ja vees, seejuures enne vees kaalumist immutatakse proovikeha vees ning seejärel see kuivatatakse niiske seemisnahkse lapiga ja kaalutakse uuesti õhus. [71] Mahumassi ja erimassi katsetulemused on esitatud tabelis 5.4.

Tabel 5.4 Proovikehade mahumass ja erimass

Nr	Asfaltsegu	Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3
1	AC 20 surf 70/100	2,462	2,490
2	AC 20 surf 70/100 (RA 10%)	2,465	2,489
3	AC 20 surf 70/100 (RA 30%)	2,459	2,492
4	AC 20 surf 70/100 (RA 50%)	2,460	2,480
5	AC 20 surf 100/150 (RA 50%)	2,469	2,481

Katsetulemustest saab järeldada, et olulisi erinevusi RA lisamine ei tekitanud ning tulemused on väga sarnased.

5.2.2 Jäävpoorsus

Asfaltsegude jäävpoorsus leitakse punktis 5.2.1 leitud proovikehade mahumassi ja erimassi alusel. Jäävpoorsuse arvutamisel kasutatakse valemit (5.2). [72]

Valem 5.2 [72]:

$$\mathrm{Va} = \frac{\rho\mathrm{m}-\rho\mathrm{v}}{\rho\mathrm{m}} x100 \qquad (5.2)$$

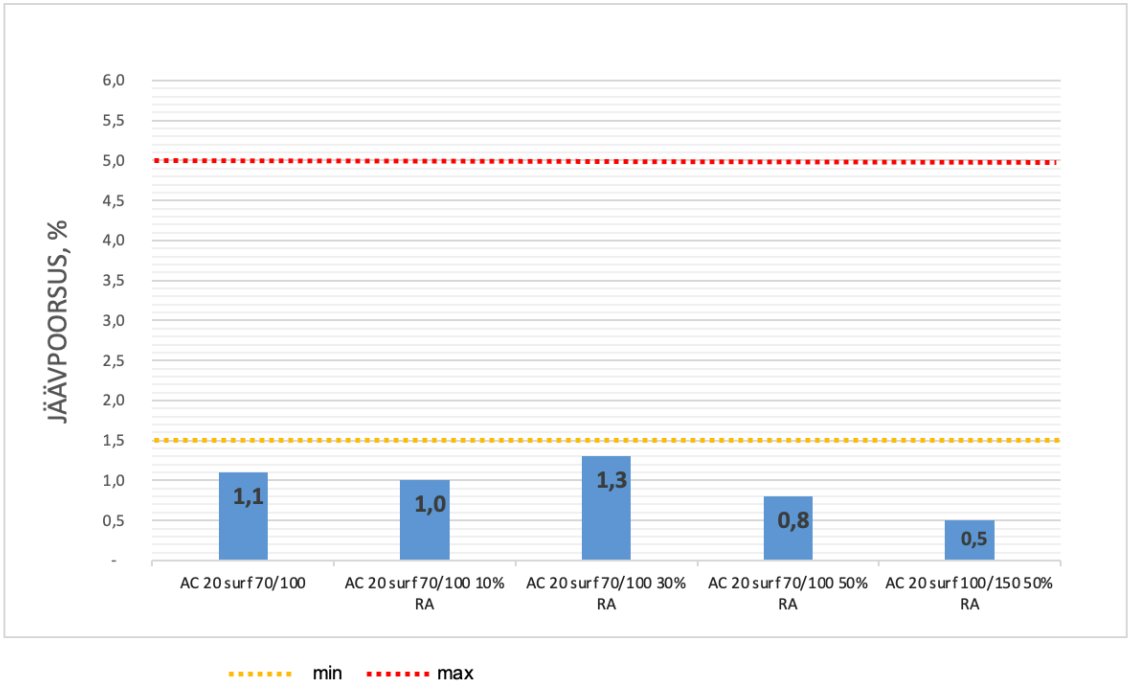
,kus

V_a *on asfaldist proovikeha poorsus, täpsusega 0,1 protsenti (mahu järgi);*

ρ_m *on segu erimass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m³);*

ρ_v *on proovikeha mahumass megagrammides kuupmeetri kohta (Mg/m³).*

Jäävpoorsus iseloomustab tihendatud asfaltkatte õhupooride sisaldust protsentides. Jäävpoorsuse hindamine on katte kvaliteedi seisukohalt oluline. Liiga tihe ja poorideta kate kaotab ekspluatatsiooni käigus oma deformatsioonikindluse ja kattesse tekivad roopad. Liiga poorne segu on ilmastikule vastuvõtlikum (sulamis- ja külmumistsüklid). Liiga poorne kate võib ka liikluskoormuse mõjul järeltiheneda, mis omakorda soodustab defektide teket. [73] Katsetatud segude jäävpoorsuse tulemused on kajastatud joonisel 5.2.



Joonis 5.2 Afaltsegude jäävpoorsus(V_a) võrreldes standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetega

Katsetulemustest nähtub, et kõikide segude jäävpoorsuse näitaja on liiga madal. Kuna madal on ka referentsegu poorsusnäitaja, siis ei saa katsetulemustest järeldada, et madal tulemus on tingitud RA lisamisest.

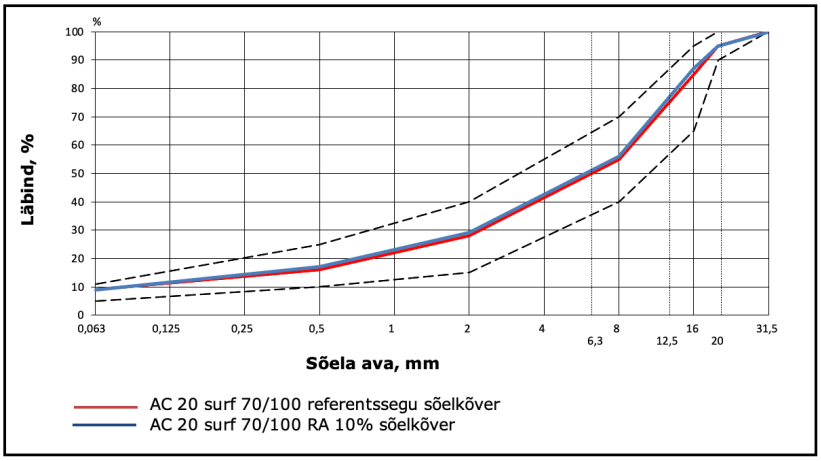
Soome asfaldinormide kohaselt on sarnase segu (AB 16 – AB 22) jäävpoorsuse nõutav keskmine vahemik 1-4% (üksikproovide puhul on lubatud $V_a \leq 5\%$). AKÖL 2500-5000 korral peab proovide keskmine jäävpoorsus olema $V_a \leq 4\%$. [67]. Antud nõuetest saab järeldada, et Soomes ei peeta madalat jäävpoorsuse väärtust sarnase liikluskoormusega teedel probleemiks, jälgitakse, et jäävpoorsuse väärtus ei oleks liiga kõrge.

5.2.3 Terastikuline koostis ja lahustuva sideaine sisaldus

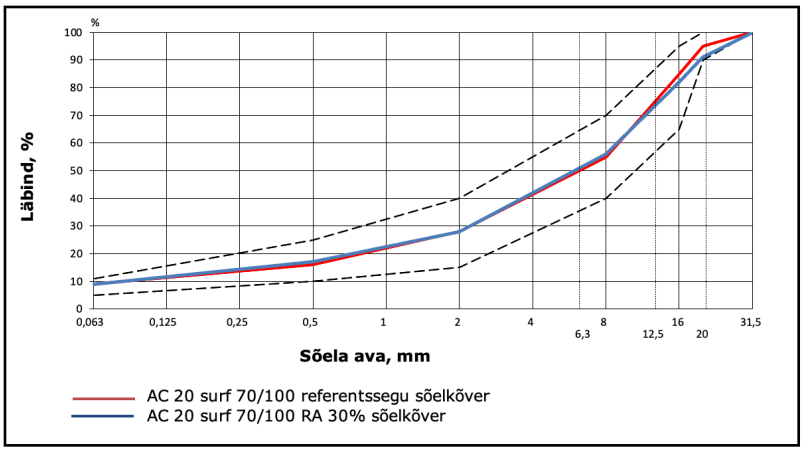
Terastikuline koostis ja lahustuva sideaine sisaldus määrati ekstraheerimise teel vastavalt standarditele EVS-EN 12697-1:2020 ja EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019.

Lahustuva sideaine sisalduse leidmisel rakendatakse massierinevuse meetodit. Selleks eraldatakse ettevalmistatud asfaltsegust ekstraheerimise teel lahustuv sideaine. Ekstraheerimise käigus sideainest puhtaks pestud kivimaterjal kuivatatakse, kaalutakse ning seejärel sõelutakse. Sõelkõvera saamiseks leitakse sõelte läbindid. Saadud tulemuste põhjal saab hinnata asfaltsegu vastavust kehtestatud nõuetele. Katse sooritamisel kasutati poolautomaatset ekstraktorit. [63] [74]

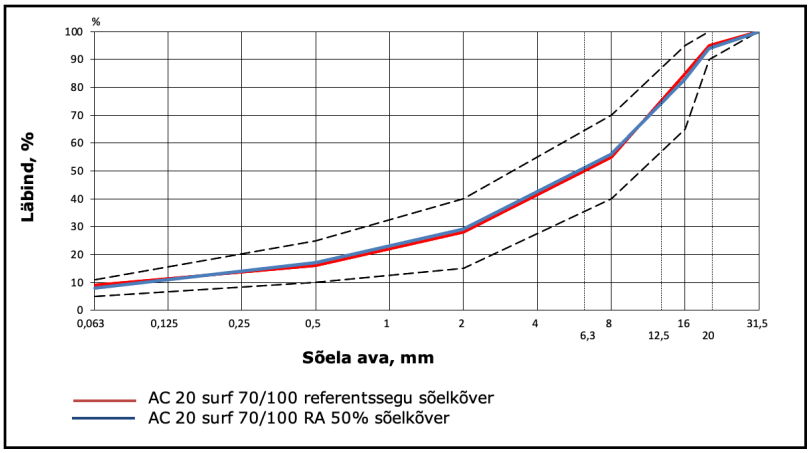
Jooniste 5.3-5.6 abil saab hinnata seguproovide terastikulise koostise vastavust standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetele ja võrrelda referentssegu sõelkõverat RA-d sisaldavate segude sõelkõveratega. Samuti on võimalik terakoostise tulemuste põhjal hinnata kaudselt ka teisi segu toimivusega seonduvaid näitajaid. Kui segu sõelkõver ei vasta nõuetele, siis on suur tõenäosus, et tekib probleeme ka deformatsioonikindlusega ja veepüsivusega.



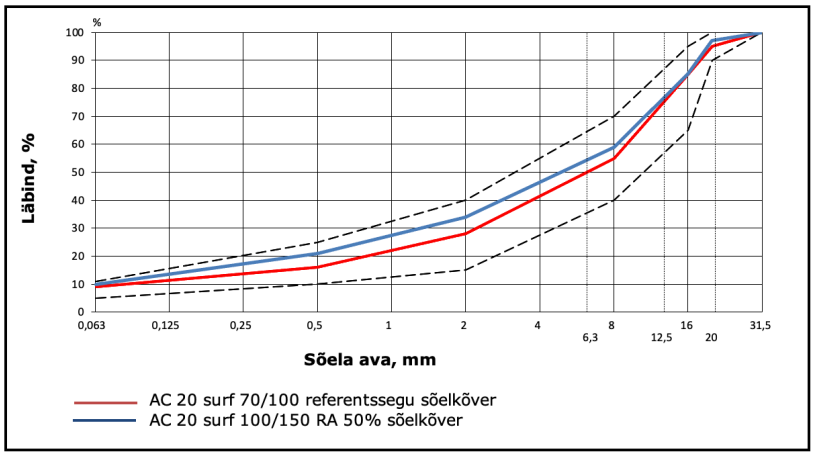
Joonis 5.3 AC 20 surf 70/100 referentssegu ja AC 20 surf 70/100 10% RA-ga segu sõelkõverad



Joonis 5.4 AC 20 surf 70/100 referentssegu ja AC 20 surf 70/100 30% RA-ga segu sõelkõverad



Joonis 5.5 AC 20 surf 70/100 referentssegu ja AC 20 surf 70/100 50% RA-ga segu sõelkõverad

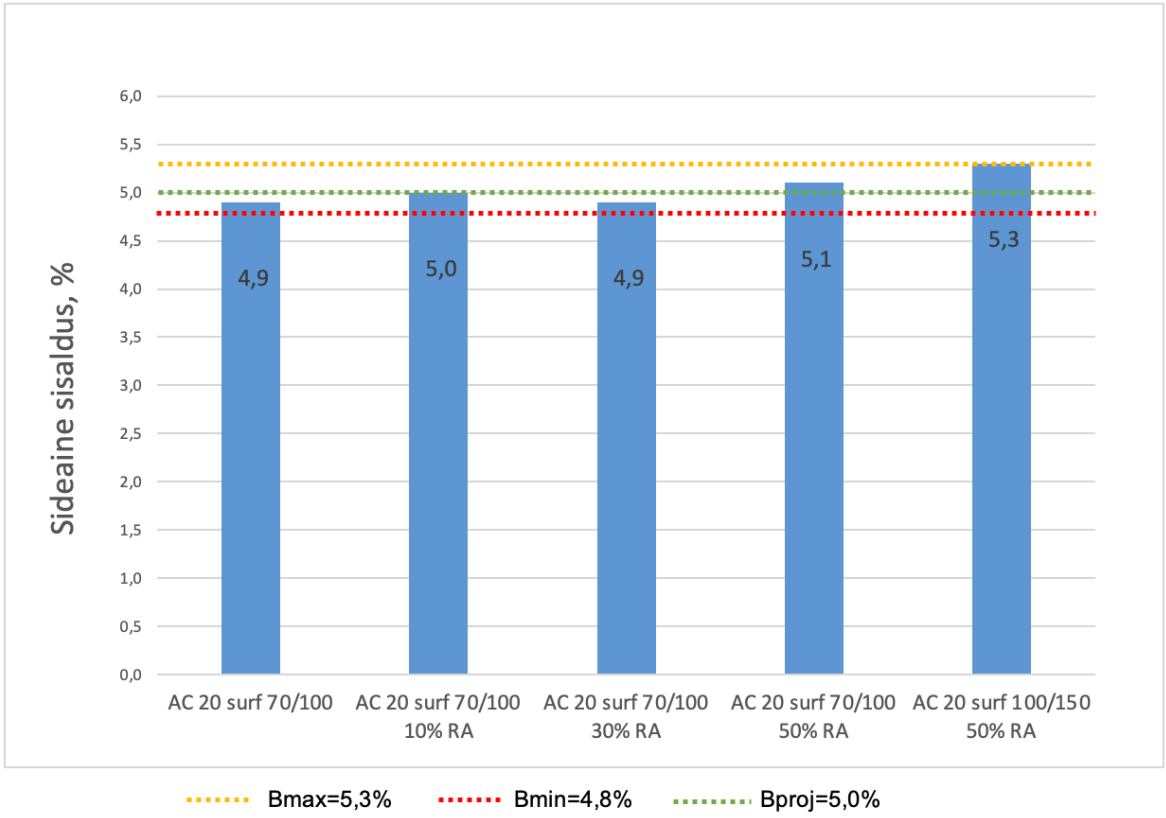


Joonis 5.6 AC 20 surf 70/100 referentssegu ja AC 20 surf 100/150 50% RA-ga segu sõelkõverad

Joonistelt 5.3-5.5 nähtub, et kolme segu sõelkõverad on väga sarnased referentsseguga (kõik 70/100 bituumeniga segud), ainsana on referentsseguga suurem erinevus AC 20 surf 100/150 50% RA-ga segu sõelkõveral (joonis 5.6). Sõelkõverast nähtub, et antud

segu on peenemateralisem, mis võib tähendada, et segu jäävpoorsuse ja deformatsioonikindluse katsetulemus tuleb madalam.

Asfaltsegude lahustuva sideaine sisalduse katsetulemused on esitatud joonisel 5.7.



Joonis 5.7 Afaltsegude sideaine sisaldus koos standardis EVS 901-3:2021 kehtestatud piirväärtustega AC 20 surf segudele ja projekteeritud seguretsepti sideaine sisaldusega

Projekteeritud segu sideaine sisaldus oli 5%. Sellest tulenevalt on vastavalt EVS 901-3:2021 lubatud maksimaalne sideaine sisaldus 5,3% ning EVS 901-3 sätestab ka minimaalse lubatud sideaine sisalduse AC 20 surf segudele, mis on 4,8%. [2] Kõigi viie proovi sideaine sisaldus mahub kehtestatud nõuete piiridesse, kuid AC 20 surf 100/150 50% RA asfaltsegu sideaine sisaldus on võrdne maksimaalse lubatud sideaine sisaldusega. Liiga kõrge sideaine sisaldus võib kaasa tuua asfaltsegu madalama deformatsioonikindluse, aga ka asfaltkatte „higistamise". Lahustuva sideaine sisalduse ja sõelkõvera katsetulemused näitavad, et AC 20 surf 100/150 segusse sattus natuke rohkem peeneteralist RA täitematerjali, mis tingis segus kõrgema sideaine sisalduse ja peenema sõelkõvera. Tabelis 4.4 on toodud erinevata RA fraktsioonide sideaine sisaldused ning sealt nähtub, et peenemateralisema RA (fr. 0/8) sideaine sisaldus on 1% suurem kui jämedateralisel RA-l.

5.2.4 Bituumeni nõelpenetratsioon ja pehmenemistäpp

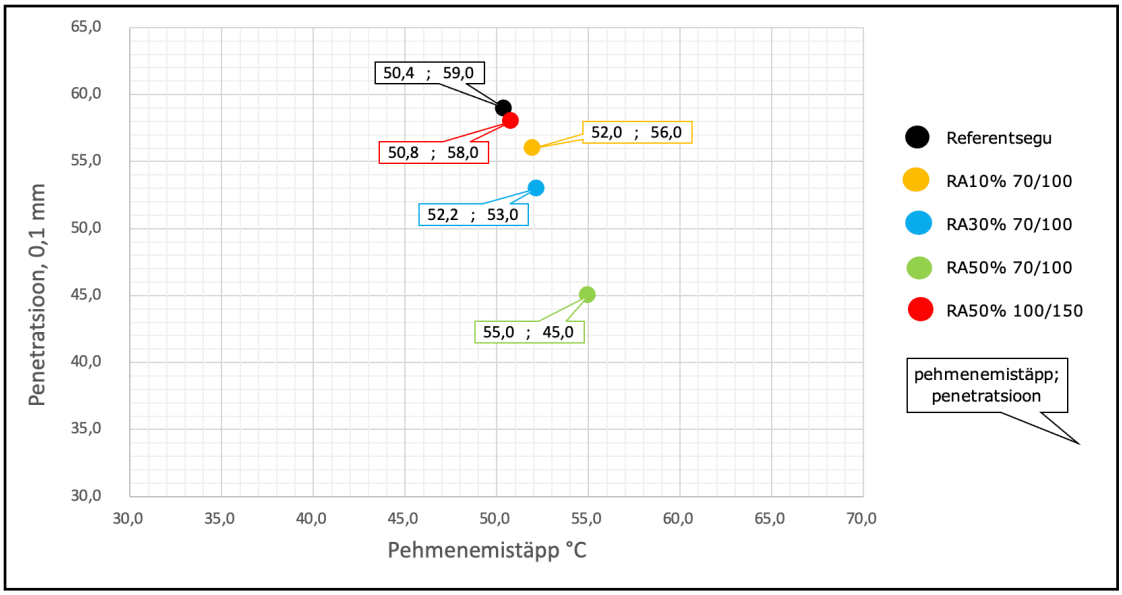
Nõelpenetratsiooni määramisel järgiti standardis EVS-EN 1426:2015 kehtestatud juhiseid. Katse põhimõte kujutab endast standardse nõela läbitungimist tingimustele vastavas katseproovis. Kuna katsetatavate bituumenite penetratsioon (70/100 ja 100/150) jääb vahemikku kuni 330 mm x 0,1 mm, siis sai valitud katseparameetriteks temperatuur 25°C, rakendatav koormus 100g ning koormamise aeg 5 s. [65]

Pehmenemistäppi määrati kuuli-rõnga meetodiga vastavalt standardile EVS-EN 1427:2015. Katse käigus kuumutatakse vedelikuvannis kahte õlgmikuga messingrõngasse valatud horisontaalset bituumensideainest ketast, mis mõlemad kannavad endal teraskuuli. Pehmenemistäpp esitatakse temperatuuride keskmisena, mille juures kaks bituumenketast pehmenevad piisaval määral, mis võimaldab kummalgi bituumensideainest ümbritsetud kuulil vajuda allapoole 25 mm ± 0,4 mm ulatuses. Iga kuuli-rõnga katse puhul protokolliti temperatuur, mille korral kuuli ümbritsev bituumen katkestab seadme poolt läbi keeduklaasi juhitud valguskiire. Tulemused esitatakse mõlema bituumenrõnga puhul valguskiire katkemise hetkel fikseeritud temperatuuride keskmise väärtusena. [66] Kasutatud katseseade on näidatud joonisel 5.8.

Joonis 5.8 Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetodil [45]

Soomlaste uuringu kohaselt väheneb bituumeni penetratsioon peale segamist ja kuumutamist ca 20%. [7] I.Kuldmaa uuris oma lõputöös bituumeni vananemist läbi RTFOT katse ning muuhulgas jõudis järeldusele, et 143°C juures langeb bituumeni

penetratsioon ca 30%, kuid täpne jäigenemine sõltub lisaks segamise temperatuurile mitmest erinevast tegurist, nagu segamise aeg või täitematerjale katva bituumenkihi paksus. [39] Bituumeni penetratsiooni ja pehmenemistäpi katsetulemused on kajastatud joonisel 5.9.



Joonis 5.9 Bituumeni penetratsiooni ja pehmenemistäpi katsetulemused

Käesoleva lõputöö raames teostatud bituumeni katsetused toetavad eelnevalt mainitud uuringuid ning bituumeni penetratsioon on langenud 26-37%. Bituumeni penetratsiooni muutus on segude kaupa kirjeldatud tabelis 5.5. Teebituumeni standardi EVS 901-2:2016 kohaselt peab olema jääkpenetratsioon 70/100 bituumenite korral ≥46 ja pehmenemistäpi väärtuse muutus peab olema ≤ 9°C. [75] Antud penetratsiooni tingimus on täidetud kõigil segudel peale AC 20 surf 70/100 RA50%, mille penetratsiooni väärtus on 45. Saksamaal on penetratsioonile esitatud tingimus sisuliselt sama ≥45,9 ning pehmenemistäpi puhul on toodud tingimus ≤53,8 [38], mis on samuti täidetud kõikidel segudel peale AC 20 surf 70/100 RA50%. Antud segu mõlemad tulemused on üsna piiripealsed ning ei pruugi segu omadustele mõjuda.

Tabel 5.5 Bituumeni penetratsiooni erinevus arvutusliku penetratsiooni ja segamisjärgse katsetatud penetratsiooni vahel

Asfaltsegu tüüp	**Arvutuslik bituumeni penetratsioon, 0,1 mm**	**Katsetatud bituumeni penetratsioon, 0,1mm**	**Muutus,%**
AC 20 surf 70/100 referentssegu	80	59	26
AC 20 surf 70/100 RA10%	78	56	28
AC 20 surf 70/100 RA30%	75	53	29
AC 20 surf 70/100 RA50%	72	45	38
AC 20 surf 100/150 RA50%	92	58	37

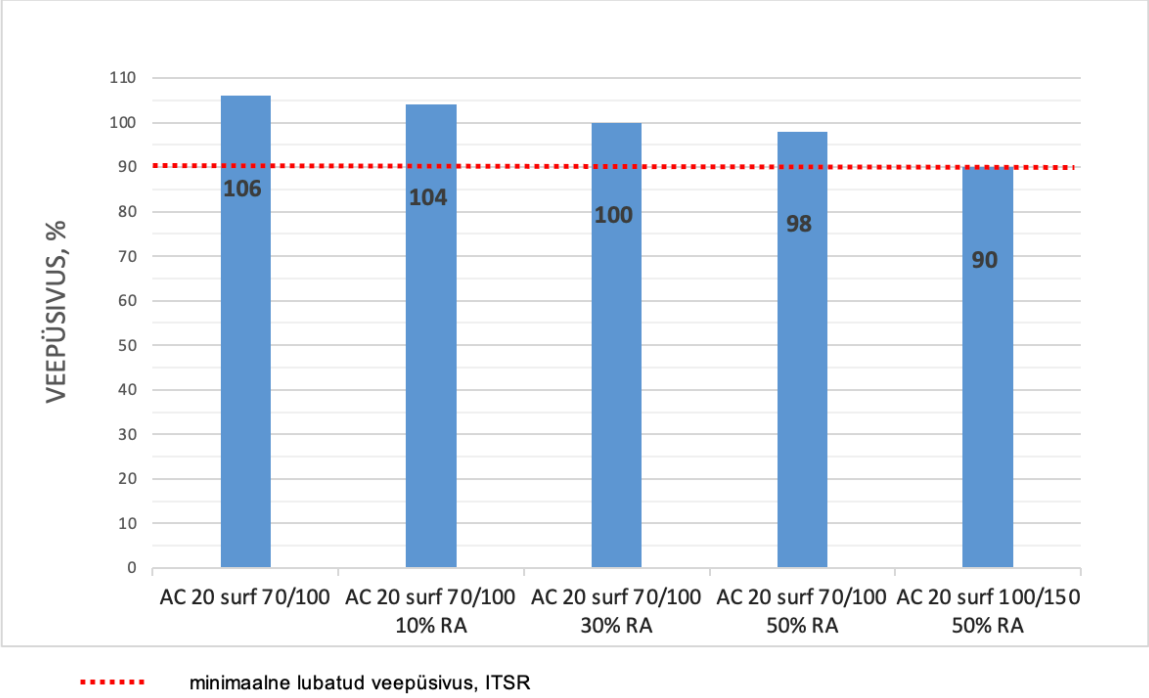
5.2.5 Veepüsivus

Asfaltsegust proovikehade veepüsivus katsetati standardis EVS-EN 12697-12:2018 oleva meetodi A kohaselt. Selleks jagatakse laboratoorselt valmistatud proovikehad kahte võrdsesse gruppi mahumassi alusel. Ühe grupi proovikehad jäeti kuivalt toatemperatuurile seisma (nn kuiva grupi proovikehad), teise grupi proovikehad küllastati veega ning neid hoiustati 72 tundi 40°C vees (nn märja grupi proovikehad on näidatud joonisel 5.10). Pärast 72 tunni möödumist viidi mõlema grupi proovikehad katsetemperatuurile, mis Eestis on 15°C. Veepüsivus on määratletud märja ja kuiva alagrupi proovikehade kaudsete tõmbetugevuste suhtena ja seda väljendatakse protsentides. [76]

Joonis 5.10 Veepüsivuse katse (Autori erakogu)

Asfaltsegude veepüsivuse alampiirid on määratletud Eestis standardis EVS 901-3:2021. Veekindlus kirjeldab sideaine ja täitematerjali vahelist adhesiooni. Veekindlus tähendab asfaldi täitematerjali ja sideaine vahelise haardumise tugevust ja vastupidavust, seega mõjutab seda nii täitematerjali kui ka sideaine kvaliteet. Vesi eraldab täitematerjali ja sideaine üksteisest, kui veekindlus ei ole piisavalt hea. Sellisel juhul kattekiht korrodeerub ja hakkab lagunema. [77] [78]

Katsetatud segude veepüsivuse tulemused on kajastatud joonisel 5.11.



Joonis 5.11 Veepüsivus ITSR katsetulemused

Katsetulemustest nähtub, et kõikide segude jäävpoorsuse näitaja vastab EVS 901-3:2021 kehtestatud nõuetele AKÖL 3000-5999 ja raskeliiklus >10% korral . Lisaks saab järeldada, et 70/100 bituumeniga segude puhul väheneb iga lisatud 10% RA korral veepüsivuse tulemus 2%. Soomes ja Rootsis on veepüsivuse nõue madalam ning pealiskihi segudel on olenemata liiklussagedusest nõue $ITSR_{75}$, mis tähendab 75%. [67] [79] Antud nõue hakkas Soomes kehtima 2023. aasta uute Asfaldinormide ilmumisega, varasemalt oli minimaalne veepüsivuse nõue 80%. [13] [67]

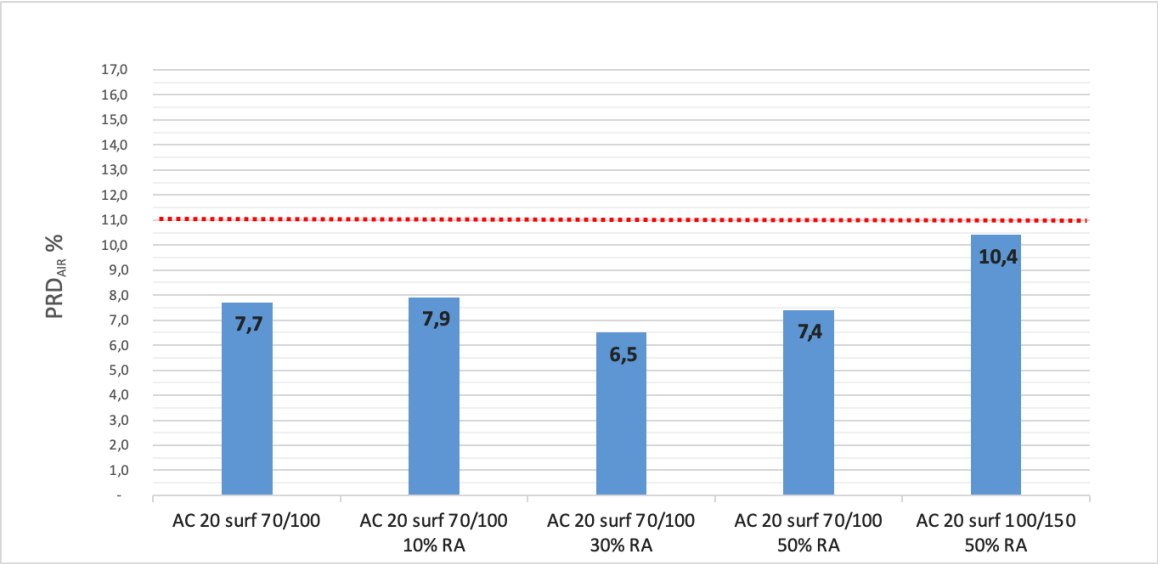
5.2.6 Deformatsioonikindlus

Asfaltsegu deformatsioonitundlikust hinnati vastavalt standardile EVS-EN 12697-22:2020. Selleks valmistati laboratoorse rulltihendajaga 145°C juures proovikehad, mida katsetati meetodi B kohaselt spetsiaalses katseseadmes (joonis 5.12), õhu keskkonnas. Deformatsioonikindluse määramiseks koormatakse proovikehi korduvate läbikutega 50°C juures ning seejärel mõõdetakse katse käigus tekkinud roopa sügavus. [80] Joonisel 5.13 on näidatud AC 20 surf 70/100 RA10% asfaltsegu katsekeha, mis on läbinud deformatsioonikindluse katse.

Joonis 5.12 Rattaroopa katseseade nn väike masin (Autori erakogu)

Joonis 5.13 AC 20 surf 70/100 RA10% deformatsioonikindluse katse läbinud katsekeha (Autori erakogu)

Deformatsioonikatse näitab katendis esinevaid jäävdeformatsioone, seega tähendab deformatsioonikindlus katendi võimet taluda jäävdeformatsioone. Kõrged temperatuurid ja rasked sõidukid on võimalikud deformatsiooni põhjused. Jäigem bituumen parandab katte deformatsioonikindlust, kuid samas nõrgendab ilmastikukindlust. [81] Joonisel 5.14 on kajastatud deformatsioonikindluse katsetulemused.



Joonis 5.14 Maksimaalne suhteline jäljesügavus PRD_{AIR} tulemused

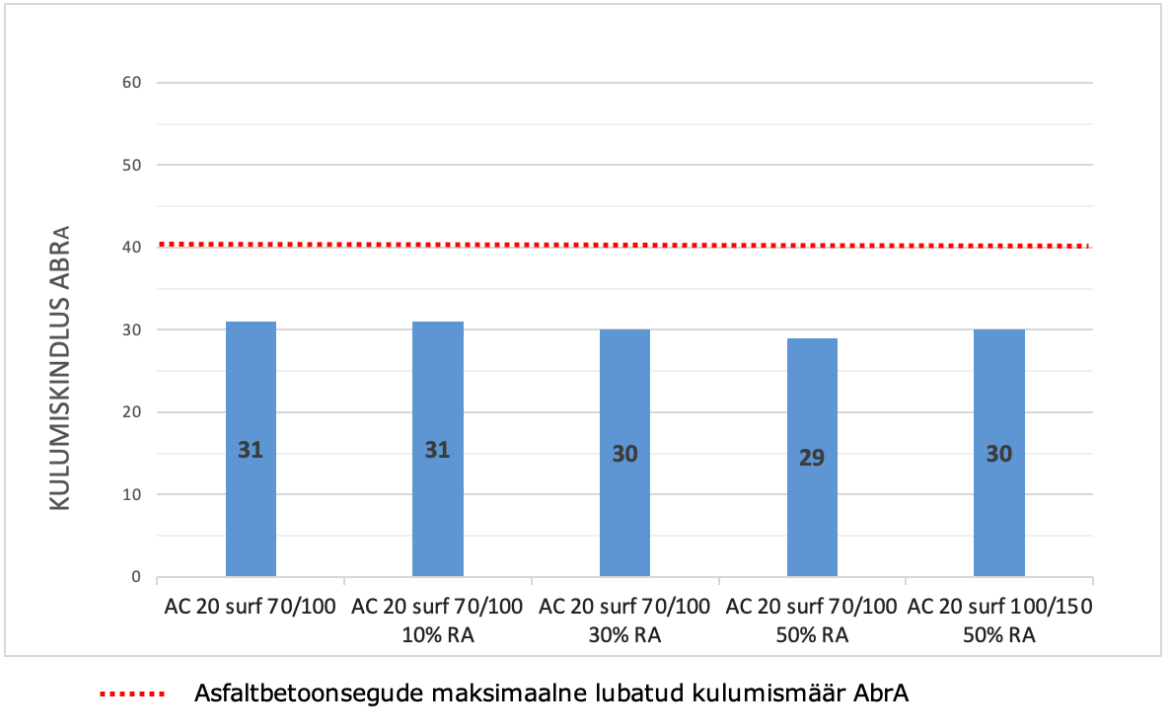
T.Sammaljoki leidis oma magistritöös, et RA lisamine asfaltsegudesse parandab deformatsioonikindlust kuna RA sideaine penetratsioon on madalam. [81] Käesolevas lõputöös teostatud katsetuste põhjal saab teha samad järeldused. Lisaks nähtub, et pehmema bituumeni (100/150) lisamisel deformatsioonikindlus halvenes rohkem kui 40% võrrelduna sama RA sisaldusega, aga jäigema bituumeniga (70/100) Lisaks on oluline välja tuua, et kõik katsetulemused vastavad EVS 901-3:2021 AKÖL 3000-5999 ja raskeliiklus >10% korral kehtestatud nõuetele. [2]

5.2.7 Kulumiskindlus

Kulumiskihis kasutatavale asfaltsegule määrati naastrehvide poolt tekitatava kulumise määr vastavalt standardis EVS-EN 12697-16:2016 kirjeldatud meetodile A. Katse käigus kulutatakse teraskuulide abrasiivsel toimel kindla ajavahemiku jooksul laboratoorselt valmistatud silindrilisi proovikehasid, mis on eelnevalt viidud katsetemperatuurile (5°C). Kulumismäärana protokollitakse proovikeha mahukadu milliliitrites. Katsed viidi läbi Tallinna Teede AS akrediteeritud laboris joonisel 5.15 näidatud kulumiskindluse määramise katseseadmega. [82]

Joonis 5.15 kulumiskindluse PRALL määramise katseseade (Autori erakogu)

Teostatud katsete tulemused on esitatud joonisel 5.16.



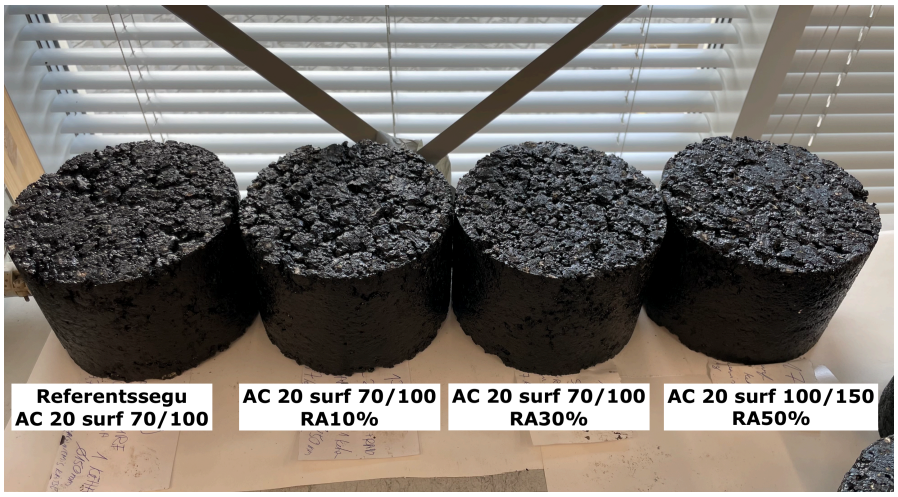
Joonis 5.16 kulumiskindluse PRALL katsetulemused

Kõikide segude kulumiskindluse katsetulemused on väga sarnased ning RA lisamine on pigem muutnud kulumiskindlust paremaks. Projekteeritud segudes on lubatud täitematerjalide kasutamine, mille kulumiskindlus on A_N14, kuid näiteks RA kulumiskindlus oli märgatavalt parem - $A_N7{,}6$. RA lisamisest tulenevat mõnevõrra paremat kulumiskindlust saabki põhjendada sellega, et RA täitematerjali kulumiskindlus on pisut parem kui ülejäänud kasutatava täitematerjali kulumiskindlus.

Nagu deformatsioonikindluse ja veepüsivuse katse puhul vastab kõikide katsetatud segude kulumiskindlus EVS 901-3:2021 AKÖL 3000-5999 ja raskeliiklus >10% kehtestatud nõuetele. Põhjamaades on kulumiskindlusele esitatud rangemad nõuded. Sarnase liiklussagedusega teedel on Soome Asfaldinormides nõue, et segude kulumiskindlus peab olema ≤30. [67] Antud juhul ei vasta Soome nõuetele referentssegu ja 10% RA-ga asfaltsegu, teised kolm segu vastavad ka Soomes esitatud nõuetele.

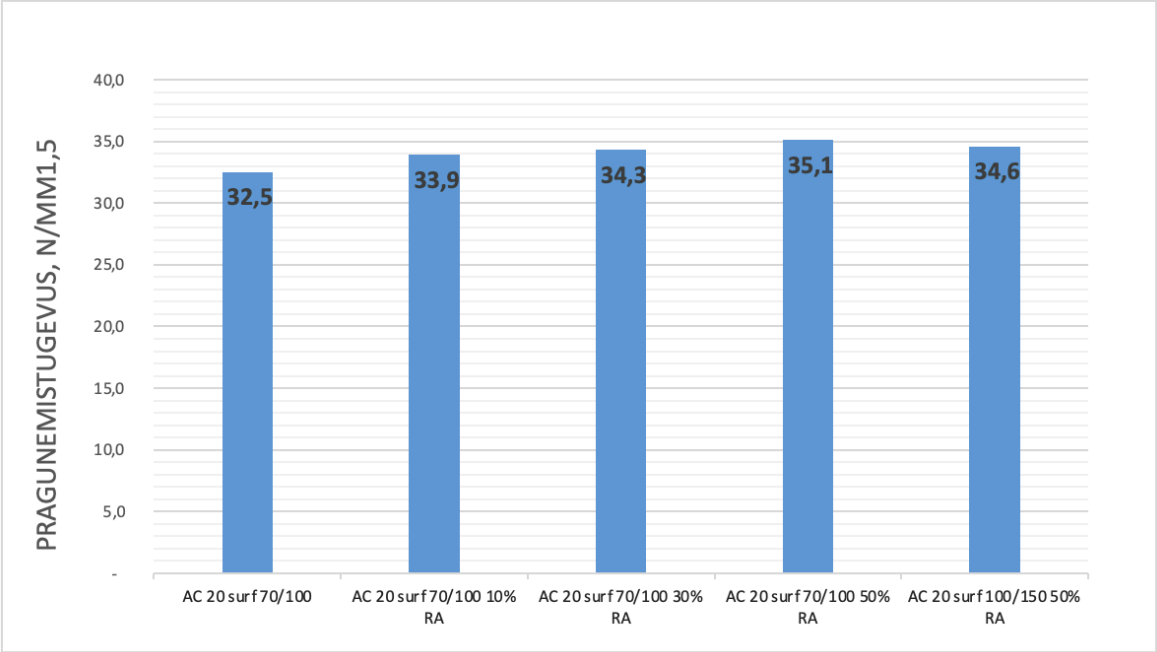
5.2.8 Pragunemistugevus

Asfaltsegude pragunemistugevus leiti pragude levimisel poolringikujulisel proovikehal ning see määrati paindekatsega vastavalt standardile EVS-EN 12697-44:2019. Antud katsemeetod võimaldab hinnata asfaltsegude proovikeha tõmbe- ja purunemistugevust. Katse põhjal on võimalik arvutada maksimaalne koormus, millele suudab praoga asfaltsegu proovikeha vastu pidada ning katse kirjeldab meetodit määramaks asfaltsegu pragude levikukindlus. [83] Katse proovikehad valmistati güraatoortihendajaga vastavalt EVS-EN 12697-31:2019 standardile (joonis 5.17). [84] Katse käigus lõigatakse güraatortihendajaga valmistatud proovikehad keskelt kaheks võrdseks poolsilindri kujuliseks osaks. Seejärel tehakse poolsilindrilisele katsekehale keskele pragu, mis peab mahtuma katsekaha servast 15 mm ala piiresse, et test oleks kehtiv. Katsetamise käigus rakendatakse kuivale katsekehale kolmepunktipainutust selliselt, et katseproovil tekib põhja keskosale tõmbepinge, mis tekitab pragunemise. [83]



Joonis 5.17 Güraatortihendajaga valmistatud proovikehad [84] (Autori erakogu)

Asfaltsegude standardis ei ole kehtestatud nõudeid pragunemistugevusele, kuid tegemist on toimivuspõhise katsega, mis kirjeldab asfaltsegude vastupidavust pragude tekkele. Pragunemiskindluse katsetulemused on kajastatud joonisel 5.18.



Joonis 5.18 Pragunemiskindluse katsetulemused

Kõrge RA sisaldusega segude levinumaid probleeme on pragunemiskindlus [85] [55], kuna vananenud bituumen võib tekitada asfaltsegudes väsimuspragusid. Maailma praktikas kasutatakse rejuvenaatoreid, et vähendada vananenud sideainest tingitud segude pragunemistundlikkust. [55] Vastupidiselt Rathore ja teiste järeldustele ilmneb katsetulemustest, et RA osakaalu suurendamisel asfaltsegu pragunemistugevus hoopis

suureneb, kuid mitte olulisel määral. Parim pragunemistugevus oli AC 20 surf 70/100 segul, mis sisaldas 50% RA-d (35,1 N/mm^{1,5}).

Tšehhis uurisid Vacková ja teised millist teavet annab poolsilindriliste proovikehade asfaldipragude levimise katse ning muuhulgas jõuti järeldusele, et esineb korrelatsioon purunemiskindluse ja purunemisenergia vahel, samuti esines loogiline langev trend jäikusmooduli ja murdumisomaduste vahel. See tähendab, et murdumisomadusi saab osaliselt prognoosida jäikusmooduli määramisega ning üksikuid murdumisomadusi saab hindamisel üksteisega asendada, kasutades ühte parameetrit. [86]

5.3 Analüüs ringlussevõetud asfaldit sisaldavate segude kasutuselevõtuks

5.3.1 Keskkonnamõjude võrdlus

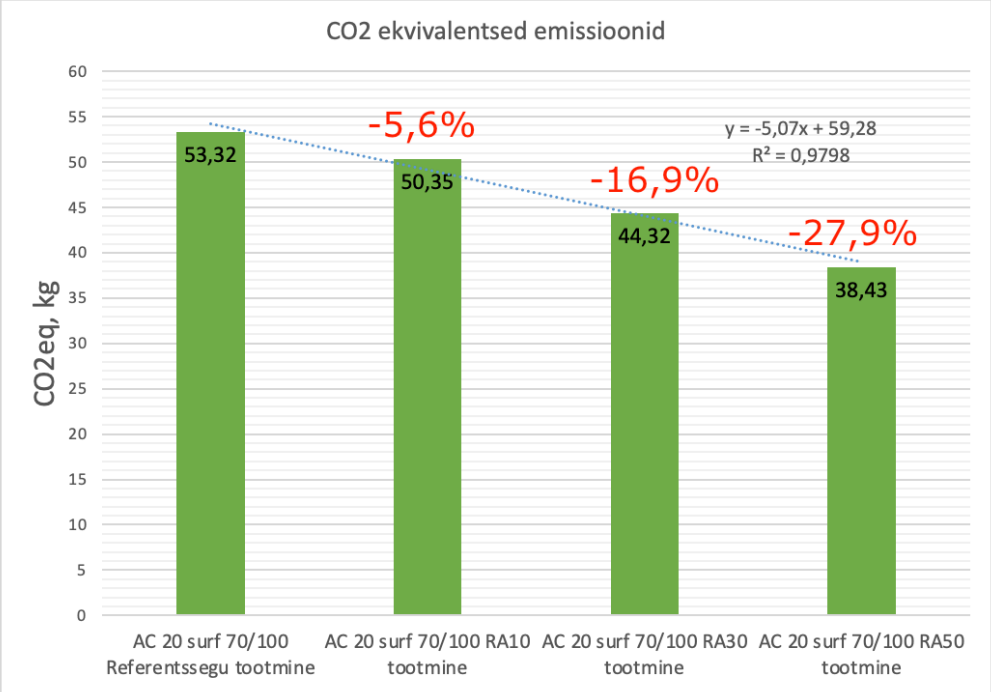
R.Toom uuris oma 2022 aasta magistritöös CO_2 emissioonid hulka asfaldi tootmisel. Magistritöös leiti, et 2020 aastal toodetud 1,715 miljoni tonni asfaltsegu CO_2 ekvivalentsed emissioonid kokku (tooraine tootmisest segu valmimiseni) olid 80 936,1 tonni. [9] Uurimaks RA lisamise mõju uute asfaltsegude tootmise keskkonnaalasele jalajäljele tuleb arvutada keskmine kasvuhoonegaaside emissioon vastavalt ühe tonni asfalditootmise kohta ning graniitkillustiku, bituumeni, lubjakivikillustiku ja liiva kasutamise kohta. Arvutuste aluseks on R.Toom magistritöö andmed ja tulemused on kajastatud tabelis 5.6. Tabelis kajastatud CO_2 ekvivalentsed emissioonid ühe tonni asfaltsegu tootmisel kõigile viiele protsessile leiti kui jagati iga protsessi poolt tekitatud CO_2eq kokku, vastava protsessi kogusega 2020.aastal.

Tabel 5.6 Asfaldi tootmisega kaasnevate komponentide keskmine kulu ühe tonni kohta

Jrk nr	Protsess	Kogus t	CO_2eq kokku, t	CO_2eq üks tonn, t
1	Asfaldi tootmine tehases	1 715 151	41 186	0,2400
2	Tardkivikillustik (sh transport)	916 304	18 013	0,0197
3	Bituumen (sh transport)	86 277	19 682	0,2281
4	Lubjakivi (sh transport)	647 648	1 786	0,0028
5	Liiv (sh transport)	64 921	221	0,0034

Teades materjalide osakaalusid, mis on vajalikud segu valmistamisel, saab arvutada ühe tonni asfaltsegu tootmisel tekkiva keskkonnaalase jalajälje kõikide segude kohta. Tulemused ja arvutuskäik on kajastatud lõputöö lisas 6. Ühe tonni referentssegu, mille bituumeni sisaldus on 5%, tootmisel tekitab bituumen arvutuste kohaselt 11,41 kg/CO_2eq. Võrdluseks Eurobitume teostatud bituumeni keskkonnaalase mõju

uuringus tüüpilise asfaltsegu kohta, mis sisaldab 5% bituumenit, oli toodud keskmine bituumeni jalajälg 8 kg/CO_2eq. Number on mõnevõrra suurem, kuid seal ei ole arvestatud maismaa transpordiga asfalditehasesse ning seda numbrit mõjutab ka riikide geograafiline asukoht. [87] Ühe tonni asfaltsegu tootmise CO_2 ekvivalentsed emissioonid on kajastatud joonisel 5.19.



Joonis 5.19 CO_2 ekvivalentsed emissioonid ühe tonni asfaltsegu tootmisel referentssegu ja erineva RA sisaldusega segude puhul

Norras tehtud uuringutes leiti, et 10% RA lisamine uute asfaltsegude tootmisel toob kasvuhoonegaaside emissioonidelt kokkuhoiu 1,66 kg CO_2 iga toodetud tonni kohta [21]. Magistritöös leitud võrreldav number on 2,97 kg CO_2 iga toodetud tonni kohta. Suurem keskkonnaalane sääst on mõistetav, kuna Eestisse on vajalik tardkivikillustik transportida laevaga. Taanis leiti, et RA kasutamine 30% ulatuses toob kaasa 14–22% CO_2-heidete vähenemise [22], mis on võrreldav käesolevas magistritööd leitud tulemusega (16,9%). Helsingis teostatud Hämeentie tänava renoveerimisprojektis leiti, et kasutades RA killustikku uue asfaldi materjalina, on võimalik kokku hoida CO_2 ekvivalenti ca 22% (RA kasutusmäär asfaltsegudes 50-60%). [16] Magistritöös on võrreldav number 27,9%. Kõrgem kokkuhoiu protsent on selgitatav asjaoluga, et Soomes puudub tardkivist täitematerjali impordivajadus.

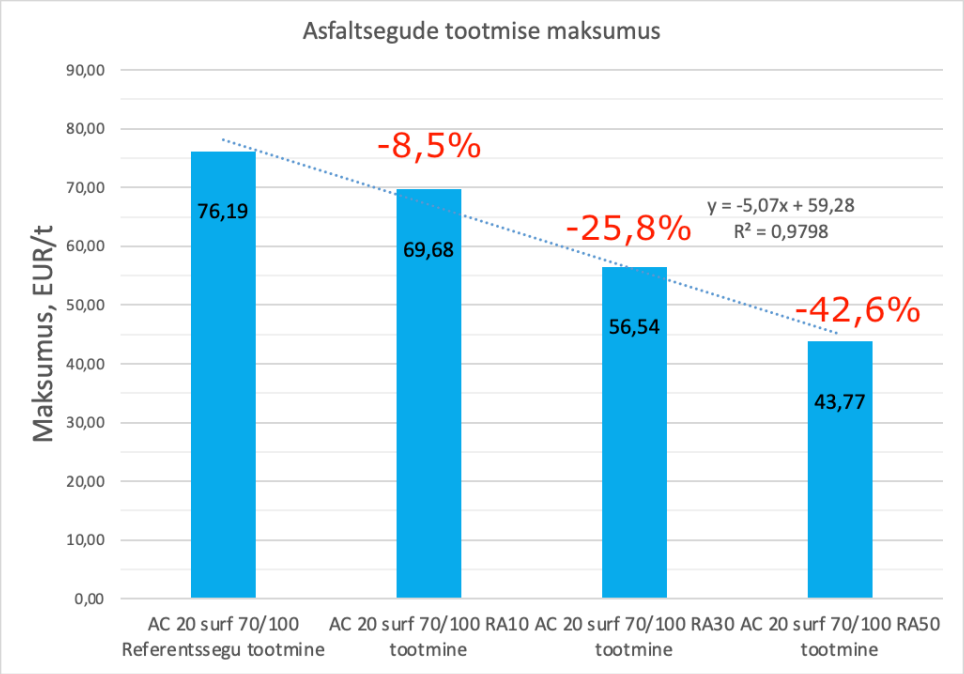
Riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel tuleb sarnaste omadustega freesasfalti hinnanguliselt 9500 tonni ning AC 20 surf 70/100 segu paigaldatakse kokku suurusjärk 9000 tonni. Lõputöö katsetustest saab järeldada, et teoreetiliselt oleks võimalik freesasfalti kasutada uue AC 20 surf segu tootmisel 50%.

Sellise taaskasutuse protsendi korral saaks asfaldi tootmisel vähendada CO_2 emissioone ca 134 tonni CO_2 ekvivalenti. Detailsem CO_2 ekvivalendi arvutus asfaltsegude kaupa on toodud lõputöö lisas 6.

Piirangud on toonud kaasa olukorra, kus riigis kasutusel olevatel asfalditehastel puudub võimekus RA lisamiseks asfaltsegudesse rohkem kui 30%, paljude kasutusel olevate tehaste puhul on maksimaalne lisatav kogus kõiges 10%.

5.3.2 Majanduslik võrdlus

Riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel kasutatava AC 20 surf 70/100 tootmise maksumuse arvutuskäik on esitatud käesoleva töö Lisa 7. Ühe tonni referentssegu tootmise maksumuseks kujunes 76,19 eurot/tonn. Lisa 7 arvutustest nähtub, et 10% RA lisamine vähendab segu maksumust 8,5% ja näiteks 30% RA lisamise korral on ühe tonni asfaltsegu tootmise maksumus 56,54 eurot/tonn. Segu tootmise maksumused on kajastatud joonisel 5.20.

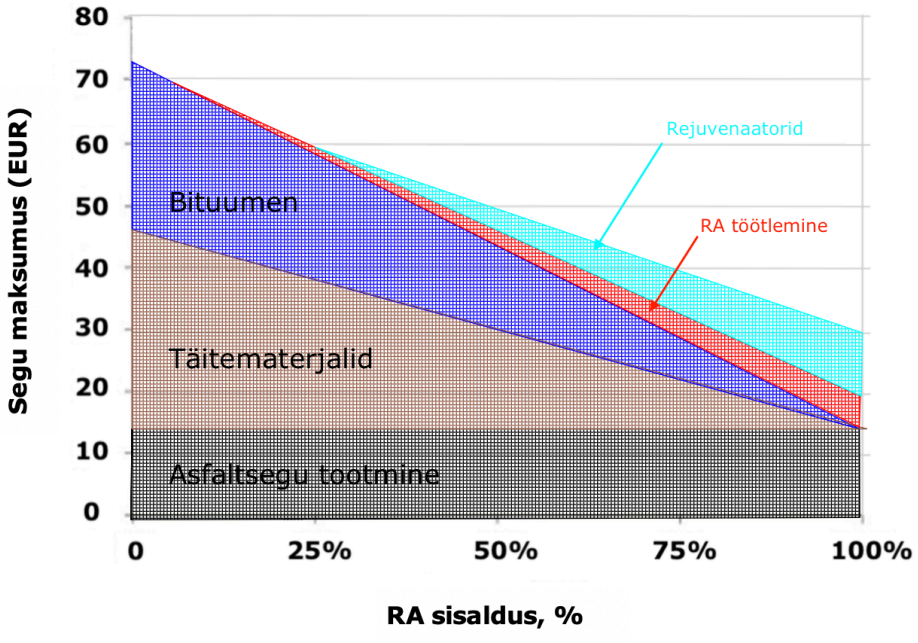


Joonis 5.20 Segu tootmise maksumus ühe tonni asfaltsegu tootmisel referentssegu ja erineva RA sisaldusega segude puhul

Riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel on asfaltsegude kogumaht ca 100 000 tonni. Aluskihi asfaltsegude maksumus on madalam ning arvutuste teostamiseks on võetud keskmiseks segu maksumuseks 60 eurot/tonn. Asfaltsegude tootmise kogumaksumuseks kujuneb selliselt 6 miljonit eurot. Kui lisada kõikidele asfaltsegudele keskmiselt 30% RA-d ja arvestada sellest tuleneva keskmise

odavnemisega 25%, saame, et keskmine asfaltsegu tootmise maksumus on 45 eurot/tonn ja asfaltsegude tootmise kogumaksumus 4,5 miljonit eurot.

Aastal 2020 toodeti Eestis kokku 1,42 miljonit tonni asfaltsegusid.[88] Sarnast arvutuskäiku ja segu keskmist hinda (60 eurot/tonn) kasutades kujuneb asfalditootmise kogumaksumuseks 85,2 miljonit eurot. Lisades segudesse 30% RA-d, mis on keskmine RA sisaldus uute asfaltsegude tootmisel muuhulgas Taanis, Norras ja Saksamaal, kujuneks asfalditootmise kogumaksumuseks 63,9 miljonit eurot. Rahaline kokkuhoid asfaldi tootmiselt oleks 21,3 miljonit eurot aastas. Selle rahaga saaks aastas muuta tolmuvabaks ca 200 km kruusateid ning kümne aastaga saaks muuta tolmuvabaks kõik riigiteed, mille liiklussagedus on suurem kui 50 autot/ööpäevas [89]. Siinkohal tuleb välja tuua, et selline arvutuskäik on üldistav ning ei ole arvestatud näiteks freesasfaldi kihiti freesimisel tekkiva täiendava kuluga ega freesasfaldi purustamise ja sõelumisega. Antud protsessid ei ole alati vajalikud ning nende mõju maksumusele on mastaape arvestades marginaalne (kihiti freesimise mõju <1 eurot/tonn ja purustamine/sõelumine ca 3 eurot/tonn). Lisaks tuleb arvesse võtta, et freesasfalt ja selle sideaine ei ole alati nii heade kvaliteediomadustega ning kehvemate bituumeniomaduste korral on vajalik ka rejuvenaatorite kasutamine. Hinnanguline asfaltsegu hinna kujunemine RA lisamisel on kajastatud joonisel 5.21.



Joonis 5.21 Asfaltsegu hinna muutus vastavalt lisatud RA kogusele erinevate komponentide kaupa

Soomlaste Hämeentie tänava renoveerimisprojektil leiti 50-60% RA kasutamisel olev rahaline kokkuhoid ca 40% [16], mis on sarnane lõputöös leitud 42,6%ga.

5.3.3 Järeldused

Kirjandusest leitu ning magistritöö raames teostatud katsetused näitavad selgelt, et Eestis on RA kasutamine põhjendamatult rangelt piiratud. Joonisel 5.22 on toodud katsetulemuste võrdlustabel, kus rohelisel taustal sümbolid näitavad, et asfaltsegu vastab AKÖL 3000-5999 ja raskeliiklus >10% esitatud nõuetele vastavalt EVS 901-3:2021 Asfaltsegud standardile ning punasel taustal sümbolid kajastavad, et vastavad tingimused ei ole täidetud. Tulemustest saab järeldada, et referentsseguga samaväärsed ning kohati ka paremad tulemused on võimalik täita kuni 50% RA lisamisega. Pehmema bituumeni kasutamisel on asfaltsegu veepüsivus ja deformatsioonikindlus pisut halvenenud, kuid antud juhul võib olla tegemist ka segu projekteerimisel tehtud valearvestusega ning asjaoluga, et segamisel sattus antud proovi peenem RA täitematerjal, mille sideaine sisaldus oli suurem. Jäävpoorsuse mittevastavus EVS 901-3:2021 Asfaltsegude standardis esitatud nõuetele on kergesti korrigeeritav, lisades segule rohkem jämedat täitematerjali.

	Sideaine sisaldus	Jääv-poorsus	Veepüsivus	Deformatsiooni-kindlus	Kulumis-kindlus	Pragunemis-kindlus
AC 20 surf 70/100 referentssegu	●	●	●	●	●	●
AC 20 surf 70/100 RA10%	→	→	→	→	→	→
AC 20 surf 70/100 RA30%	→	↑	→	↑	→	→
AC 20 surf 70/100 RA50%	→	↓	→	→	→	→
AC 20 surf 100/150 RA50%	→	↓	↘	↓	→	→

Erinevus referentssegust
→ 0-10%
↗ 11-15%
↘ 11-15%
↑ >15%
↓ >15%

Joonis 5.22 Asfaltsegudele teostatud katsetulemuste võrdlustabel

Muu maailma praktika näitab, et ringlussevõetava asfaldi kasutamine maksimaalselt kallistes asfaltkihtides sõltub suuresti freesasfaldi käitlemisest – alustades freesimisest ja lõpetades ladustamisega. Freesasfaldi korrektsel käitlemisel saadakse homogeenne materjal, mida saab uute asfaltsegude tootmisel 100% taaskasutada. Teadmata päritolu freesasfaldi kasutamisel asfaltsegudes võiks ka Eestis kaaluda Saksamaal kasutusel olevate nomogrammide (joonis 2.1 ja joonis 2.2) rakendamist, kuna eriti kulumiskihi segudes on oluline jälgida ka kivimaterjali omadusi, siis autori soovitusel võiks teadmata päritolu ja segamini ladustatud freesasfalti kasutada pigem madalamates asfaltkihtides.

Siinkohal mõned autori tähelepanekud, mida jälgida RA kasutamisel:

- freesimisel kasutada standardse teravahega trumlit, mis tekitab vähem peenosist ning võimalusel tuleks teostada selektiivset freesimist, mis aitab vähendada vajadust freesasfaldi edaspidiseks töötlemiseks;
- ladustada RA kattega ja kaldega platsil soovitavalt tuulele avatud katusealuste all. Vajalike platside ja katusealuste puudumisel kaaluda investeeringut, kuna

madalam peenosiste sisaldus aitab saavutada märkimisväärse kokkuhoiu energiakuludelt ning tagab parema asfaltsegu kvaliteedi;

- asfaltsegude tootmisel on parim lahendus RA soojendamine paralleeltrumlis ning seeläbi on võimalik lisada kuni 100% RA-d;
- RA kehvemate reoloogiliste omaduste (penetratsioon <30) kaaluda rejuvenaatorite kasutamist.

RA kasutamisel on Eesti mahajäämus paljudest teistest lääneriikidest enam kui 10 aastat ning seda mahajäämust tuleks autori hinnangul hakata kiiremas korras ning julgete sammudega vähendama. Ringlussevõetava asfaldi kasutamisel maksimaalselt kõrgetes asfaltkihtides peavad riiklikud organisatsioonid olema suunanäitajad, kuna just riiklikud piirangud on tekitanud olukorra, kus kohalikel eraettevõtetel ei ole võimekust toota kõrge (>30%) RA sisaldusega asfaltsegusid. Suuremal osal asfalditehastest puudub võimekus toota >10% RA sisaldusega asfaltsegusid. Selge üleriigiline suund RA kasutuselevõtul annaks erasektorile põhjuse vastavaid investeeringuid kaaluda, milledele kaasaaitamiseks tuleks esmalt tekitada riigihangetes ja töövõtulepingutes boonussüsteem, mis motiveeriks erasektorit vajalikke investeeringuid teostama võimalikult varakult. RA ulatuslikum kasutuselevõtt aitaks saavutada Euroopas kehtestatud CO_2 eesmärke, mille kohaselt on vajalik aastaks 2030 vähendada kasvuhoonegaaside heidet vähemalt 55%. Lõputöös koostatud majanduslik võrdlus näitab samuti RA kasutuselevõtu vajalikkust, eriti olukorras, kus riiklik rahastus on selgelt madalam kui tegelik vajadus selle järele ning teedeehituse remondivõlg suureneb praeguse stsenaariumi kohaselt iga-aastaselt edasi. RA kasutuselevõtust tulenev majanduslik kokkuhoid võimaldaks seda natukenegi leevendada.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli anda ülevaade ringlussevõetud asfaldi kasutamisest alates olemasoleva asfaltkatte freesimisest kuni uute asfaltsegude valmistamiseni. Antud teema sai valitud kuna autori hinnangul pööratakse Eesti taristuehitussektoris taaskasutusele teenimatult vähe tähelepanu ning antud valdkonnas on suur potentsiaal nii majanduslikult paremate lahenduste kasutuselevõtuks kui CO_2 jalajälje vähendamiseks.

Käesolev magistritöö pakub teavet ja soovitusi asfalditootjatele, taristuehituse ettevõtetele ning otsustajatele Eestis, kes soovivad astuda samme jätkusuutliku ehituse suunas, sealhulgas asfaldi taaskasutamise edendamiseks. Töö tulemused võivad aidata kaasa ressursitõhusamate ja keskkonnasõbralikemate ehituspraktikate kasutuselevõtule ning seeläbi aidata kaasa Eesti taristuehituse sektori üldisele arengule.

Töös võrreldi Eestis kehtivaid normdokumente ja juhendeid teiste lääneriikidega ning jõuti järeldusele, et RA kasutamisel on Eestis märkimisväärne mahajäämus võrreldes teiste riikidega. Lisaks leiti, et võttes arvesse teiste riikide praktilisi kogemusi, oleks vajalik võimalikult kiiresti läbi vaadata ja kohandada RA kasutamisega seotud piirangud. Samuti jagati olulisi soovitusi, millele tähelepanu pöörata, kui soovitakse freesasfaldit kasutada ringlussevõetava asfaldina uute asfaltsegude tootmisel.

Teostatud laboratoorsed katsetulemused näitasid, et homogeense RA korral on võimalik seda pealiskihi asfaltsegus kasutada kuni 50% ulatuses, ilma segu kvaliteediomadustes olulisi järeleandmisi tegemata. Katsetatud segud vastasid ka kõikidele EVS 901-3:2021 standardis esitatud AKÖL 3000-5999 (raskeliikluse osakaal >10%) nõuetele ning oleksid sobivad kasutamiseks riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitusel kasutatavas AC 20 surf 70/100 asfaltsegus. Keskkonnamõjude võrdluses leiti, et 50% RA lisamisel uutesse asfaltsegudesse on võimalik vähendada CO_2 ekvivalenti kuni 27,9%. Majanduslikus võrdluses leiti, et lisades segudesse keskmiselt 30% RA-d, mis on keskmine RA sisaldus uute asfaltsegude tootmisel muuhulgas Taanis ja Saksamaal, olnuks võimalik kokkuhoid 2020. aastal kõigi Eestis toodetud asfaltsegude näitel enam kui 20 miljonit eurot aastas.

Siinkohal mõningad teemad, mida võiks autori hinnangul tulevikus uurida:

- RA lisamine uutesse asfaltsegudesse läbi tootmisprotsessi asfalditehases ning hilisem katselõikude ehitamine ja vaatlus;
- kehvemate reoloogiliste omadustega RA kasutamine uutes asfaltsegudes;
- asfaldi keskkonnaalane jalajälg läbi terve elutsükli;
- RA mitmekordne ringlussevõtt uute asfaltsegude tootmisel;

- väga kõrge protsendi RA (kuni 100%) lisamine uute asfaltsegude tootmisel.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to provide an overview of the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) from the milling of existing asphalt pavement to the production of new asphalt mixtures. The chosen topic stemmed from the author's belief that the recycling of materials receives undeservedly little attention in the Estonian infrastructure construction sector, despite its significant potential for implementing economically superior solutions and reducing CO_2 emissions.

This thesis offers information and recommendations to asphalt producers, infrastructure construction companies, and decision-makers in Estonia who wish to take steps towards sustainable construction practices, including promoting the reuse of asphalt. The findings of this work can contribute to the adoption of more resource-efficient and environmentally friendly construction practices, thereby supporting the overall development of Estonia's infrastructure construction sector.

The study compared the existing normative documents and guidelines in Estonia with those of other Western countries and concluded that Estonia lags significantly behind in the use of RAP compared to other countries. Furthermore, it was found that considering the practical experience of other countries, it is necessary to review and adapt the restrictions associated with RAP usage as soon as possible. Furthermore, significant recommendations were provided regarding key considerations when utilizing reclaimed asphalt as a constituent in the production of new asphalt mixtures.

Laboratory test results demonstrated that when using homogeneous RAP, it is possible to incorporate it into surface layer asphalt mixtures up to 50% without significant compromise in the quality characteristics of the mixture. The tested mixtures also met the requirements of the AKÖL 3000-5999 (heavy traffic load category >10%) specified in the EVS 901-3:2021 standard, making the mixtures suitable for use in the construction of the 2+2 road section Pärnu-Uulu, km 133.4-143, on State Road No. 4 Tallinn–Pärnu–Ikla. In terms of environmental impact comparison, the addition of 50% RAP in new asphalt mixtures led to a reduction in CO_2 equivalent emissions of up to 27.9%. In the economic comparison, it was found that by adding an average of 30% RAP in the mixtures, which is the average RAP content used in new asphalt mixtures in countries such as Denmark and Germany, potential savings of over 20 million euros per year could have been achieved based on the production of all asphalt mixtures in Estonia in 2020.

The following are some topics that the author suggests for future research:

- incorporating RAP into new asphalt mixtures throughout the asphalt plant production process and subsequent construction and observation of test sections;
- using RAP with lower rheological properties in new asphalt mixtures;
- assessing the environmental footprint of asphalt throughout its lifecycle;
- investigating the multiple recycling of RAP in the production of new asphalt mixtures;
- exploring the high percentage incorporation of RAP (up to 100%) in new asphalt mixtures.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] „EVS-EN 13108-8:2016 Asfaltsegud. Materjali spetsifikatsioon. Osa 8: Ringlussevõetud asfalt".

[2] „EVS 901-3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud".

[3] Transpordiamet, „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhis," Transpordiamet, Tallinn, 2021.

[4] Transpordiamet, „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend," 2017.

[5] Keskkonnaministeerium, „envir.ee," [Võrgumaterjal]. Available: https://envir.ee/pariisi-kokkulepe. [Kasutatud 03 05 2023].

[6] „consilium.europa.eu," Euroopa Ülemkogu, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.consilium.europa.eu/et/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/. [Kasutatud 17 05 2023].

[7] EAPA, „The circular economy of asphalt," 2022.

[8] C. EAPA, „Summary of the EAPA-CEDR Internal Webinar," EAPA, Brussels, 2022.

[9] R. Toom, „Ülevaade CO2 emissioonidest asfaltsegude tootmisel Eestis ning meetodid emissioonide vähendamiseks sooja asfaltsegu tehnoloogiatega," Taltech, Tallinn, 2022.

[10] K. K. Marek Truu, „Riigiteede teehoiu rahavajaduse strateegiline analüüs - Lõpparuanne," Transpordiamet, Tallinn, 2019.

[11] M.-. j. Kommunikatsiooniministeerium, „Riigiteede teehoiukava 2023-2026," Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Tallinn, 2022.

[12] K. S. K.Kontson, „Mida teha kui kõik kallineb? Lahendusi materjali hinnatõusu leevendamiseks," Teejuht, Tallinn, 2022.

[13] „Asfalttinormit 2017," Päällystealana Neuvottelukunta Pank ry.

[14] „Asfalttinormien 2017 päivitys Asfalttinormiksi 2023," 2023.

[15] M. M. S. S. Pirjo Kuula, „Asfalttirouheen laatuvaatimusten kehittäminen," Helsinki, 2021.

[16] A.-K. N. K. M. S. V. J. R. J. P. J. H. j. T. M. Saila Pahkakangas, „Hämeentien CO2 -päästölaskenta ja ilmastoviisaat tarkastelut," Helsinki, 2020.

[17] K. F. A. (KFA), „RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) IN NORWAY," KFA, 2017.

[18] K. F. A. (KFA), „Årsraport 2021," KFA, 2022.

[19] K. F. A. (KFA), „Regler for gjenbruk av returasfalt KFA," KFA, 2020.

[20] „N200:2022 N200 Vegbygging," 2022.

[21] K. F. A. (KFA), „Veileder i gjenbruk av asfalt," KFA, 2023.

[22] O. G. Andersson, A. Christiansen, U. Helk, L. Josephsen, H. F. Larsen ja E. Nielsen, „Cirkulær Asfaltproduktion i Danmark," Miljøstyrelsen, 2018.

[23] EAPA, „Asphalt in figures 2021," EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, Brussels, 2023.

[24] Vejdirektoratet, „Varmblandet asfalt 2020 - Materialekrav," Vejdirektoratet, 2020.

[25] NAPA, „High RAP Asphalt Pavements Japan Practice — Lessons Learned," National Asphalt Pavement Association, 2015.

[26] D. A. (DBV), „Asphaltproduktion in Deutschland (Stand Januar 2023)," 2023.

[27] D. A. (DAV), „Wiederverwenden von Asphalt," DAV, Bonn, 2014.

[28] „The world of wirtgen cold milling machines," Wirtgen Group.

[29] [Võrgumaterjal]. Available: https://www.wirtgen-group.com/en-us/products/wirtgen/technologies/cutting-technology/milling-and-cutting-drums/milling-drums/. [Kasutatud 01 05 2023].

[30] E. V. d. Kerkhof, „Warm waste asphalt recycling in Belgium - 30 years of experience and full confidence in the future," %1 *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Istanbul, 2012.

[31] D. L. S. M. F. S. L. P. Martins Zaumanis, „Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement," *Construction and Building Materials,* 2021.

[32] J. O. V. H. Martins Zaumanis, „How to reduce reclaimed asphalt variability: A full-scale study," *Construction and Building Materials ,* November 2018.

[33] B. K. H. M. P. B. S. M. M. Z. L. P. Lukas Boesiger, „Three indexes to characterise crushing and screening of reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering,* 03 2021.

[34] „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded," MKM, 2015.

[35] DAV, „Recycling of asphalt," Deutscher Asphaltverband, Bonn, 2009.

[36] J. C. &. M. Badra, „Recycled Asphalt Pavement (RAP) Scoping Study," NZWC, Ontario, 2018.

[37] J. G. H. Simmons, „Stockpiles. Technical paper T-129," ASTEC.

[38] M. Miljković, „Influence of Bitumen Emulsion and Reclaimed Asphalt on Mechanical and Pavement Design-related Performance of Asphalt Mixtures," Bochum, 2014.

[39] J. L. R. J. Don Brock, „Milling and recycling," Astec Industries, Chattanoga, 2006.

[40] P. T. C. S. Giulia Tarsi, „The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review," Bologna, 2020.

[41] A. Asphaltbauweisen, „Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt," FGSV, 2009.

[42] EAPA, „The use of Warm Mix Asphalt," Brussels, 2014.

[43] H. B. Taher Baghaee Moghaddam, „The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review," *Construction and Building Materials,* 2016.

[44] T. Teedeinstituut, „Uued viisid bituumensideainete kvaliteediomaduste määramiseks ja võimalused nende rakendamiseks, pidades silmas konkreetsele objektile vastavaid kriteeriume sideaine eeldatavast elueast ja kasutuskohast lähtuvalt," Tallinna Tehnikaülikooli teedeinstituut, Tallinn, 2015.

[45] I. Kuldmaa, „RTFOT Bituumeni vanandamise meetodi uurimine ning katsetulemuste võrdlemine reaalse vananemise olukorraga," Taltech, Tallinn, 2022.

[46] E. H. A. A. A. Molenaar, „Effects of Aging on the Mechanical Characteristics of Bituminous Binders in PAC," *Journal of Materials in Civil Engineering ,* August 2010.

[47] M. Z. Rajib B. Mallick, „Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art," *International Journal of Pavement Engineering ,* 03 2014.

[48] R. B. M. R. F. Martins Zaumanis, „Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications," Construction and building materials, 2014.

[49] EAPA, „Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production," Brussels, 2018.

[50] F. K. E. A.-M. A. B. L. G. C. F. Y. A. C. J. E. C. G. E. Y. H. N. M. J. S. D. M. O. R. R.-R. C. O. G. K. Amy Epps Martin, „Evaluating the Effects of Recycling Agents

on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios," Transportation Research Board, 2020.

[51] I. U. Karlsson Robert, „Material-related aspects of asphalt recycling - State-of-the-art," Journal of Materials in Civil Engineering, 2006.

[52] B. H. X. S. M. E. W. Sheng Zhao, „Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures," Materials & Design, 2016.

[53] B. F. Bowers, „Investigation of Asphalt Pavement Mixture Blending Utilizing Analytical Chemistry Techniques (Doctoral thesis)," The University of Tennessee, Knoxville, 2013.

[54] M. C. C. M. Z. Lily D. Poulikakos, „Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder," International Journal of Pavement Engineering, 2018.

[55] M. a. V. M.Rathore, „Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Riga, 2019.

[56] „EVS-EN 12697-42:2021 Bituminous mixtures - Test methods - Part 42: Amount of foreign matter in reclaimed asphalt".

[57] „EVS-EN 1097-6:2022 Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määramine".

[58] „EVS-EN 1097-2:2020 Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid".

[59] „EVS-EN 1097-9 Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 9: Kulumiskindluse määramine abrasiivsele hõõrdkulumisele naastrehvide toimel. Põhjamaade katse".

[60] „EVS-EN 933-3:2012 Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 3: Tera kuju määramine. Plaatsustegur".

[61] „www.formtest.de," [Võrgumaterjal]. Available: https://www.formtest.de/de-wAssets/img/Produkte/Pruef-und-Laborgeraete/Siebe/stabsiebe.jpg?17062. [Kasutatud 14 05 2023].

[62] D. P. L. C. J. Gayathri, „Effect of flakiness and elongation aggregates on the bituminous mixes," International Journal For Technological Research In Engineering, 2017.

[63] „EVS-EN 12697-1:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus".

[64] EVS, „EVS-EN 12697-3:2013+A1:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator," EVS, 2013.

[65] „EVS-EN 1426:2015 Bituumen ja bituumensideained. Nõelpenetratsiooni määramine".

[66] „EVS-EN 1427:2015 Bituumen ja bituumensideained. Pehmenemistäpi määramine. Kuuli-rõnga meetod".

[67] „Asfalttinormit 2023," Päällystealana Neuvottelukunta Pank ry, 2023.

[68] „EVS-EN 12697-35:2016 Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing.".

[69] „EVS-EN 12697-30:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga".

[70] „EVS-EN 12697-5:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine".

[71] „EVS-EN 12697-6:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine".

[72] „EVS-EN 12697-8:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine".

[73] A. S. a. J. R. R. N. Hunter, „The Shell Bitumen Handbook, 6th edition," Shell International Petroleum Company Ltd, 2015.

[74] „EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine".

[75] EVS, „EVS 901-2:2016 Tee-ehitus. Osa 2: Bituumensideained," EVS, 2016.

[76] „EVS-EN 12697-12:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine".

[77] R. L. K. &. A. R. Laaksonen, „Päällysteen laadun testaus- ja mittausmenetelmien tarkkuus," Tiehallinto, 2008.

[78] G. D. A. &. Y.-K. Choi, „State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials," Road Materials and Pavement Design, 2002.

[79] Trafikverket, „KRAV Bitumenbundna lager TDOK 2013:0529 Version 4.0," Trafikverket, 2020.

[80] „EVS-EN 12697-22:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 22: Rattaroopa katse".

[81] T. Sammaljoki, „Asfalttirouheen ominaisuudet ja käyttö asfalttipäälysteissä," Tampereen Yliopisto, Tampere, 2021.

[82] „EVS-EN 12697-16:2016 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 16: Vastupidavus naastrehvide toimele".

[83] EVS, „EVS-EN 12697-44:2019 Bituminous mixtures - Test methods - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test," EVS, 2019.

[84] „EVS-EN 12697-31:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 31: Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega".

[85] R. B. M. R. F. Martins Zaumanis, „100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis," Resources, Conservation and Recycling, 2014.

[86] J. V. M. B. Pavla Vacková, „What information can be provided by the asphalt crack propagation test done on semicylindric specimens?," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 960, Prague, 2020.

[87] Eurobitume, „2021 update tp The Eurobitume Life-Cycle inventory for bitumen Version 3.1," Eurobitume, Brussels, 2021.

[88] ESTEL, „Asfalt arvudes 2022," Eesti Taristuehituse Liit, 2023.

[89] Transpordiamet, „Riigiteede teehoiukava 2021–2030," 2020.

LISAD

Lisa 1 – AC 20 Surf 70/100 referentssegu seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Lisa 2 - AC 20 Surf 70/100 10% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Lisa 3 - AC 20 Surf 70/100 30% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Lisa 4 - AC 20 Surf 70/100 50% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Lisa 5 - AC 20 Surf 100/150 50% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Lisa 6 - Asfaltsegude CO_2 ekvivalendi arvutuskäik

Lisa 7 – Asfaltsegude tootmise maksumuse arvutuskäik

Lisa 8 – Lähtematerjalide kogused asfaltsegude laboratoorsel segamisel

Lisa 9 – Praktiline näide Saksamaal kasutusel oleva nomogrammi kasutuse kohta

Lisa 1 - AC 20 Surf 70/100 referentssegu seguretsept vastavalt EVS901-3:2021

Tootja: **AC 20 surf 70/100 referentssegu** Vastavalt standardile:

Tehas: Seguretsept nr: 1 EVS 901-3:2021

T-4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 133,4 – 143 Pärnu - Uulu

Täitematerjalid

Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Ter tih Mg/m^3	*LA*	A_N	*FI*	*C*	*f*	MB_F	*F*	F_{NaCl}
Inkoo	0/4	230702	2,70	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4
Inkoo	4/8	230722	2,68	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	8/16	230792	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	16/22	230772	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD
Kaalutud keskmine osakeste näivtihedus ρ_a			2,700	Korrigeerimistegur α			0,982	Korrigeeritud B_{min}, %			4,7

Sideaine

Deklaratsiooni nr	03-70/100-CPR-2022	Nake, rullpudel 24h	≥ 50%
Tootja	Orlen Lietuva	Elastne taastuvus	NR
Mark	70/100		

Muud tooted	Täitematerjali lisand	Sideaine lisand	Looduslik asfalt	
Deklaratsiooni nr		Nouryon		
Toode		Wetfix BE		
Osakaal %		0,4		

Projekteeritud segu koostis

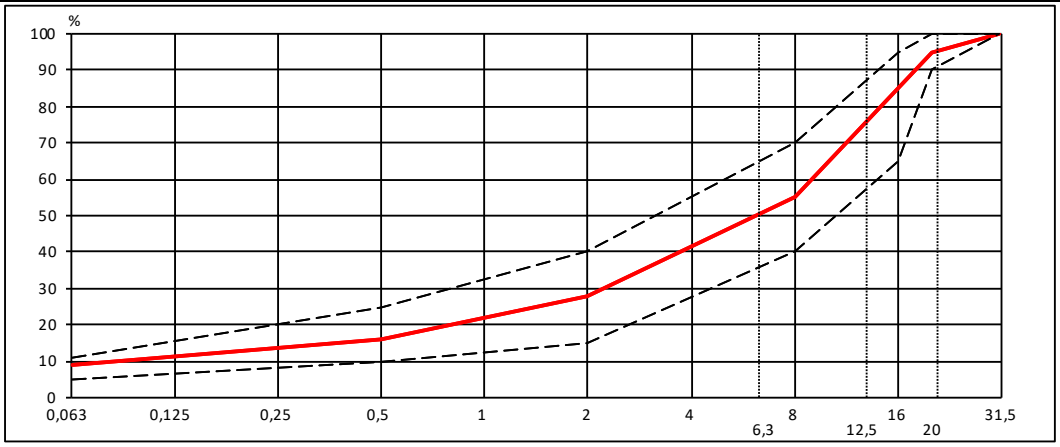
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal % Täitematerjal	Segu
Inkoo	0/4	35	33,2
Inkoo	4/8	10	9,5
Inkoo	8/16	35	33,2
Inkoo	16/22	15	14,2
0	0	0	0,0
0	0	0	0,0
Rakke	filler	5	4,7
Doseeritav sideaine sisaldus			5,1
Lahustuv sideaine sisaldus			5,0
SUMMA		100	100,0

Segu terastikuline koostis

Sõela ava mm		0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
Norm	min	5,0	10	15	40	65	90	100
	max	11,0	25	40	70	95	100	100
Normkoostis		9,0	16	28	55	85	95	100

Projekteeritud segu omadused

Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3	Poorsus V_m, %	Veepüsivus *ITSR*, %	Def. kindlus WTS_{AIR}, mm	Def. kindlus PRD_{AIR}, %	Kulumiskindlus Abr_A, ml	Sideaine väljanõrgumine *D*, %	Kaudne tõmbetugevus *ITS*, kPa
2,462	2,490	1,1	106		7,7	31	NPD	NPD
		1,5-5,0	≥ 90	DV	16	DV	NR	NR



Koostanud: Magnus Martinson

Lisa 2 - AC 20 Surf 70/100 10% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Tootja: **AC 20 surf 70/100 RA10%** Vastavalt standardile:

Tehas: Seguretsept nr: 2 EVS 901-3:2021

T-4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 133,4 – 143 Pärnu - Uulu

Täitematerjalid

Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Ter tih Mg/m^3	*LA*	A_N	*FI*	*C*	*f*	MB_F	*F*	F_{NaCl}
Inkoo	0/4	230702	2,70	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4
Inkoo	4/8	230722	2,68	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	8/16	230792	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	16/22	230772	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
RA	0/12	NPD	2,70	25	7	8	100/0	10	NPD	NPD	4
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD
Kaalutud keskmine osakeste näivtihedus ρ_a			2,700	Korrigeerimistegur α			0,982	Korrigeeritud B_{min}, %			4,7

Sideaine

Deklaratsiooni nr	03-70/100-CPR-2022	Nake, rullpudel 24h	≥ 50%
Tootja	Orlen Lietuva	Elastne taastuvus	NR
Mark	70/100		

Muud tooted	**Täitematerjali lisand**	**Sideaine lisand**	**Looduslik asfalt**	
Deklaratsiooni nr		Nouryon		
Toode		Wetfix BE		
Osakaal %		0,4		

Projekteeritud segu koostis

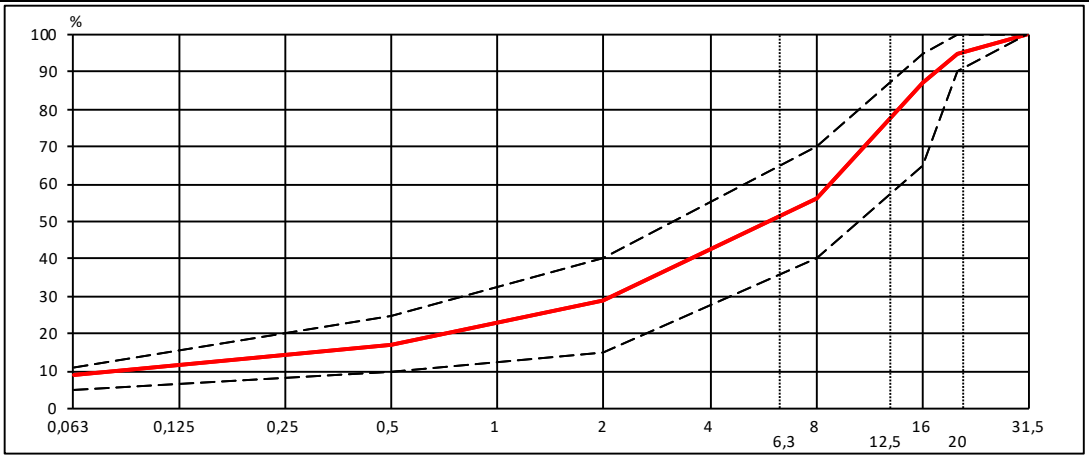
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal % Täitematerjal	Segu
Inkoo	0/4	29	27,7
Inkoo	4/8	8	7,6
Inkoo	8/16	34	32,5
Inkoo	16/22	15	14,3
RA	0/12	10	9,6
0	0	0	0,0
Rakke	filler	4	3,8
Doseeritav sideaine sisaldus			4,4
Lahustuv sideaine sisaldus			5,0
SUMMA		100	100,0

Segu terastikuline koostis

Sõela ava mm		0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
Norm	min	5,0	10	15	40	65	90	100
	max	11,0	25	40	70	95	100	100
Normkoostis		9,0	17	29	56	87	95	100

Projekteeritud segu omadused

Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3	Poorsus V_m, %	Veepüsivus *ITSR*, %	Def. kindlus WTS_{AIR}, mm	Def. kindlus PRD_{AIR}, %	Kulumiskindlus Abr_A, ml	Sideaine väljanõrgumine *D*, %	Kaudne tõmbetugevus *ITS*, kPa
2,465	2,489	1,0	104		7,9	31	NPD	NPD
Nõue		1,5-5,0	≥ 90	DV	16	DV	NR	NR



Koostanud: Magnus Martinson

Lisa 3 - AC 20 Surf 70/100 30% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Tootja: **AC 20 surf 70/100 RA30%** Vastavalt standardile:

Tehas: Seguretsept nr: 3 EVS 901-3:2021

T-4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 133,4 – 143 Pärnu - Uulu

Täitematerjalid

Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Ter tih Mg/m^3	*LA*	A_N	*FI*	*C*	*f*	MB_F	*F*	F_{NaCl}
Inkoo	0/4	230702	2,70	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4
Inkoo	4/8	230722	2,68	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	8/16	230792	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	16/22	230772	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
RA	0/12	NPD	2,70	25	7	8	100/0	10	NPD	NPD	4
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD
Kaalutud keskmine osakeste näivtihedus ρ_a			2,700	Korrigeerimistegur α			0,982	Korrigeeritud B_{min}, %			4,7

Sideaine

Deklaratsiooni nr	03-70/100-CPR-2022	Nake, rullpudel 24h	≥ 50%
Tootja	Orlen Lietuva	Elastne taastuvus	NR
Mark	70/100		

Muud tooted	**Täitematerjali lisand**	**Sideaine lisand**	**Looduslik asfalt**	
Deklaratsiooni nr		Nouryon		
Toode		Wetfix BE		
Osakaal %		0,4		

Projekteeritud segu koostis

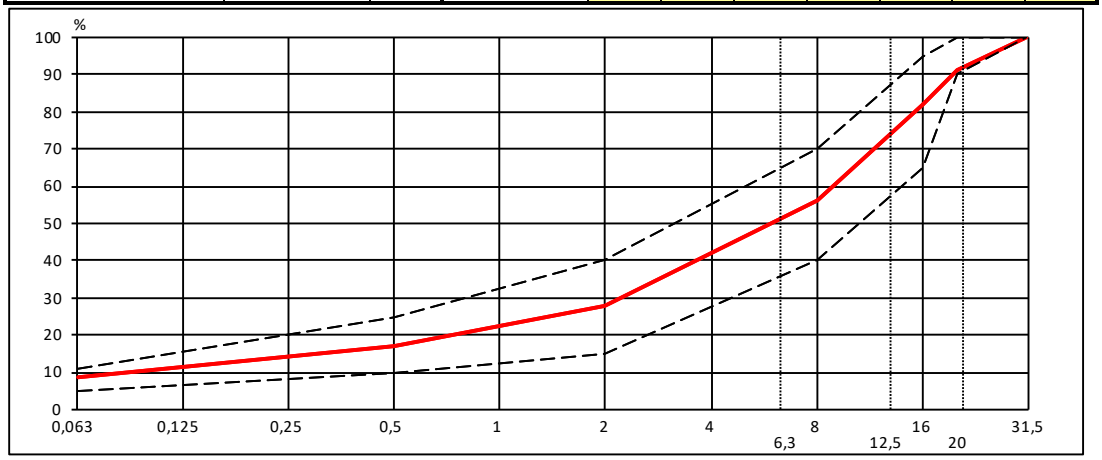
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal % Täitematerjal	Segu
Inkoo	0/4	18	17,4
Inkoo	4/8	5	4,8
Inkoo	8/16	28	27,1
Inkoo	16/22	17	16,5
RA	0/12	30	29,0
0	0	0	0,0
Rakke	filler	2	1,9
Doseeritav sideaine sisaldus			3,2
Lahustuv sideaine sisaldus			5,0
SUMMA		100	100,0

Segu terastikuline koostis

Sõela ava mm		0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
Norm	min	5,0	10	15	40	65	90	100
	max	11,0	25	40	70	95	100	100
Normkoostis		8,7	17	28	56	82	91	100

Projekteeritud segu omadused

Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3	Poorsus V_m, %	Veepüsivus *ITSR*, %	Def. kindlus WTS_{AIR}, mm	Def. kindlus PRD_{AIR}, %	Kulumiskindlus Abr_A, ml	Sideaine välja-nõrgumine *D*, %	Kaudne tõmbe-tugevus *ITS*, kPa
2,459	2,492	1,3	100		6,5	30	NPD	NPD
Nõue		1,5-5,0	≥ 90	DV	16	DV	NR	NR



Koostanud: Magnus Martinson

Lisa 4 - AC 20 Surf 70/100 50% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Tootja: **AC 20 surf 70/100 RA50%** Vastavalt standardile:

Tehas: Seguretsept nr: 4 EVS 901-3:2021

T-4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 133,4 – 143 Pärnu - Uulu

Täitematerjalid

Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Ter tih Mg/m^3	*LA*	A_N	*FI*	*C*	*f*	MB_F	*F*	F_{NaCl}
Inkoo	0/4	230702	2,70	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4
Inkoo	4/8	230722	2,68	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	8/16	230792	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	16/22	230772	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
RA	0/12	NPD	2,70	25	7	8	100/0	10	NPD	NPD	4
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD
Kaalutud keskmine osakeste näivtihedus ρ_a			2,700	Korrigeerimistegur α			0,981	Korrigeeritud B_{min}, %			4,7

Sideaine

Deklaratsiooni nr	03-70/100-CPR-2022	Nake, rullpudel 24h	≥ 50%
Tootja	Orlen Lietuva	Elastne taastuvus	NR
Mark	70/100		

Muud tooted	**Täitematerjali lisand**	**Sideaine lisand**	**Looduslik asfalt**	
Deklaratsiooni nr		Nouryon		
Toode		Wetfix BE		
Osakaal %		0,4		

Projekteeritud segu koostis

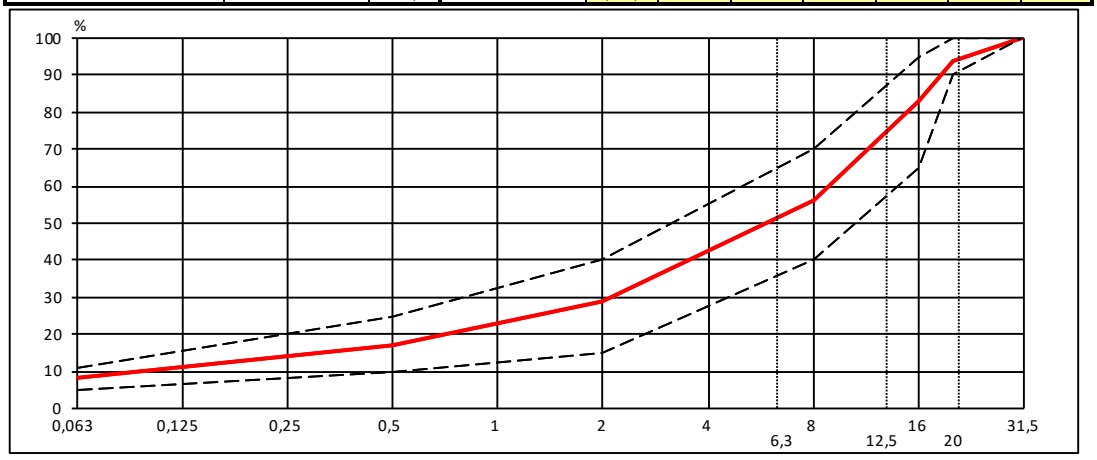
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal %	
		Täitematerjal	Segu
Inkoo	0/4	8	7,8
Inkoo	4/8		0,0
Inkoo	8/16	25	24,5
Inkoo	16/22	17	16,6
RA	0/12	50	49,0
0	0		0,0
Rakke	filler		0,0
Doseeritav sideaine sisaldus			2,1
Lahustuv sideaine sisaldus			5,0
SUMMA		100	100,0

Segu terastikuline koostis

Sõela ava mm		0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
Norm	min	5,0	10	15	40	65	90	100
	max	11,0	25	40	70	95	100	100
Normkoostis		**8,3**	**17**	**29**	**56**	**83**	**94**	**100**

Projekteeritud segu omadused

Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3	Poorsus V_m, %	Veepüsivus *ITSR*, %	Def. kindlus WTS_{AIR}, mm	Def. kindlus PRD_{AIR}, %	Kulumiskindlus Abr_A, ml	Sideaine väljanõrgumine *D*, %	Kaudne tõmbetugevus *ITS*, kPa
2,460	2,480	0,8	98		7,4	29	NPD	NPD
		1,5-5,0	≥ 90	DV	16	DV	NR	NR



Koostanud: Magnus Martinson

Lisa 5 - AC 20 Surf 100/150 50% RA seguretsept vastavalt EVS 901-3:2021

Tootja: **AC 20 surf 100/150 RA50%** Vastavalt standardile:

Tehas: Seguretsept nr: 5 EVS 901-3:2021

T-4 Tallinn-Pärnu-Ikla km 133,4 – 143 Pärnu - Uulu

Täitematerjalid

Täitematerjali nimetus	fr	Deklaratsiooni number	Ter tih Mg/m^3	*LA*	A_N	*FI*	*C*	*f*	MB_F	*F*	F_{NaCl}
Inkoo	0/4	230702	2,70	NPD	NPD	NPD	100/0	16	NPD	NPD	4
Inkoo	4/8	230722	2,68	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	8/16	230792	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
Inkoo	16/22	230772	2,70	25	14	25	100/0	2	NPD	NPD	4
RA	0/12	NPD	2,70	25	7	8	100/0	10	NPD	NPD	4
Rakke	filler	PR197-23 ROW(RAF)	2,73	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	10	NPD	NPD
Kaalutud keskmine osakeste näivtihedus ρ_a			2,700	Korrigeerimistegur α			0,981	Korrigeeritud B_{min}, %			4,7

Sideaine

Deklaratsiooni nr		Nake, rullpudel 24h	≥ 50%
Tootja	Orlen Lietuva	Elastne taastuvus	NR
Mark	100/150		

Muud tooted	Täitematerjali lisand	Sideaine lisand	Looduslik asfalt	
Deklaratsiooni nr		Nouryon		
Toode		Wetfix BE		
Osakaal %		0,4		

Projekteeritud segu koostis

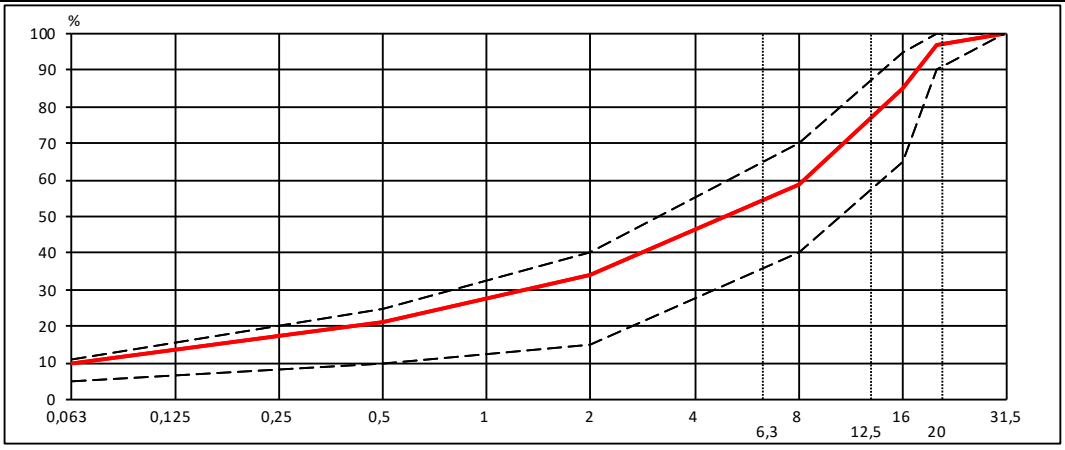
Täitematerjali nimetus	fr	Materjali osakaal % Täitematerjal	Segu
Inkoo	0/4	8	7,8
Inkoo	4/8		0,0
Inkoo	8/16	25	24,5
Inkoo	16/22	17	16,6
RA	0/12	50	49,0
0	0		0,0
Rakke	filler		0,0
Doseeritav sideaine sisaldus			2,1
Lahustuv sideaine sisaldus			5,0
SUMMA		100	100,0

Segu terastikuline koostis

Sõela ava mm		0,063	0,5	2	8	16	20	31,5
Norm	min	5,0	10	15	40	65	90	100
	max	11,0	25	40	70	95	100	100
Normkoostis		9,9	21	34	59	85	97	100

Projekteeritud segu omadused

Mahumass, Mg/m^3	Erimass, Mg/m^3	Poorsus V_m, %	Veepüsivus *ITSR*, %	Def. kindlus WTS_{AIR}, mm	Def. kindlus PRD_{AIR}, %	Kulumiskindlus Abr_A, ml	Sideaine väljanõrgumine *D*, %	Kaudne tõmbetugevus *ITS*, kPa
2,469	2,481	0,5	90		10,4	30	NPD	NPD
Nõue		1,5-5,0	≥ 90	DV	16	DV	NR	NR



Koostanud: Magnus Martinson

Lisa 6 - Asfaltsegude CO_2 ekvivalendi arvutuskäik

2020 aasta tootmisega kaasnevate kasvuhoonegaaside emissioonid tööliikide kaupa

Tööliik	kogus, t	CO2eq, t	CO2eq ühe tonni kohta, t
x	1 715 151,00	34 858,40	0,020
Täitematerjalide liigutamine tehases frontaallaaduriga	1 715 151,00	898,40	0,001
Abiseadmed põlevkiviõlil töötavas tehases (bituumeni katel, generaator)	1 163 181,00	5 429,10	0,005
Lubjakivikillustiku tootmine	647 648,20	1 436,70	0,002
Lubjakivikillustiku transport tehasesse	647 648,20	349,60	0,001
Tardkivikillustiku tootmine	916 304,40	2 419,00	0,003
Tardkivikillustiku maismaatransport sadamasse	916 304,40	2 456,80	0,003
Tardkivikillustiku meretransport (Norrast, Rootsist, Soomest)	916 304,40	8 223,30	0,009
Tardkivikillustiku maismaatransport tehasesse	916 304,40	4 913,60	0,005
Liiva veealune kaevandamine	64 921,40	23,80	0,000
Liiva maapealne kaevandamine	64 921,40	22,00	0,000
Liiva maismaatransport tehasesse	64 921,40	175,20	0,003
Bituumeni tootmine	86 277,00	17 945,60	0,208
Bituumeni maismaatransport Mažeikiaist	86 277,00	1 099,90	0,013
Bituumeni meretransport Nynäshamnist	86 277,00	395,30	0,005
Bituumeni maismaatransport sadamast	86 277,00	241,20	0,003
		80 887,90	

Koondtabel 2020 aasta tootmisega kaasnevate kasvuhoonegaaside emissioonid üldisemate tööliikide kaupa

Tööliik	kogus, t	CO2eq, t	CO2eq ühe tonni kohta, t
Asfaldi tootmine tehases	1715151	41 186	0,0240
Tardkivikillustik (sh transport)	916 304	18013	0,0197
Bituumen (sh transport)	86 277	19 682	0,2281
Lubjakivi (sh transport)	647 648	1 786	0,0028
Liiv (sh transport)	64 921	221	0,0034

*tabelis kasutatud andmeid R.Toom magistritööst "Ülevaade CO2 emissioonidest asfaltsegude tootmisel Eestis ning meetodid emissioonide vähendamiseks sooja asfaltsegu tehnoloogiatega"

AC20surf 70/100 REFERENTSSEGU ühe tonni asfaldi tootmise CO_2eq, kg 2020. aasta Eesti keskmise kohaselt

Segu komponent	kogus per tonn, t	CO2eq per tonn, t	CO2eq kokku, kg
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	0,0240	24,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,9025	0,0197	17,78
Bituumen (sh transport)	0,0500	0,2281	11,41
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0475	0,0028	0,13
RA	0,0000	0,0000	0,00
			53,32

AC20surf 70/100 RA10% ühe tonni asfaldi tootmise CO_2eq, kg 2020. aasta Eesti keskmise kohaselt

Segu komponent	kogus per tonn, t	CO2eq per tonn, t	CO2eq kokku, kg
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	0,0240	24,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,8222	0,0197	16,20
Bituumen (sh transport)	0,0440	0,2281	10,04
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0382	0,0028	0,11
RA	0,0956	0,0000	0,00
			50,35

AC20surf 70/100 RA30% ühe tonni asfaldi tootmise CO_2eq, kg 2020. aasta Eesti keskmise kohaselt

Segu komponent	kogus per tonn, t	CO2eq per tonn, t	CO2eq kokku, kg
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	0,0240	24,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,6582	0,0197	12,97
Bituumen (sh transport)	0,0320	0,2281	7,30
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0194	0,0028	0,05
RA	0,2904	0,0000	0,00
			44,32

AC20surf 70/100 RA50% ühe tonni asfaldi tootmise CO_2eq, kg 2020. aasta Eesti keskmise kohaselt

Segu komponent	kogus per tonn, t	CO2eq per tonn, t	CO2eq kokku, kg
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	0,0240	24,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,4895	0,0197	9,64
Bituumen (sh transport)	0,0210	0,2281	4,79
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0000	0,0028	0,00
RA	0,4895	0,0000	0,00
			38,43

Lisa 7 – Asfaltsegude tootmise maksumuse arvutuskäik

AC20surf 70/100 REFERENTSSEGU ühe tonni asfaldi tootmise maksumus

Segu komponent	kogus per tonn, t	maksumus, EUR	Kokku, EUR
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	15,00	15,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,9025	35,00	31,59
Bituumen (sh transport)	0,0500	554,00	27,70
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0475	40,00	1,90
RA	0,0000	0,00	0,00
		Hind kokku:	**76,19**

AC20surf 70/100 RA10% ühe tonni asfaldi tootmise maksumus

Segu komponent	kogus per tonn, t	maksumus, EUR	Kokku, EUR
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	15,00	15,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,8222	35,00	28,78
Bituumen (sh transport)	0,0440	554,00	24,38
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0382	40,00	1,53
RA	0,0956	0,00	0,00
		Hind kokku:	**69,68**
		Odavnemine:	**-8,5%**

AC20surf 70/100 RA30% ühe tonni asfaldi tootmise maksumus

Segu komponent	kogus per tonn, t	maksumus, EUR	Kokku, EUR
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	15,00	15,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,6582	35,00	23,04
Bituumen (sh transport)	0,0320	554,00	17,73
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0194	40,00	0,78
RA	0,2904	0,00	0,00
		Hind kokku:	**56,54**
		Odavnemine:	**-25,8%**

AC20surf 70/100 RA50% ühe tonni asfaldi tootmise maksumus

Segu komponent	kogus per tonn, t	maksumus, EUR	Kokku, EUR
Asfaldi tootmine tehases	1,0000	15,00	15,00
Tardkivikillustik (sh transport)	0,4895	35,00	17,13
Bituumen (sh transport)	0,0210	554,00	11,63
Lubjakivi sõelmed (sh transport)	0,0000	40,00	0,00
RA	0,4895	0,00	0,00
		Hind kokku:	**43,77**
		Odavnemine:	**-42,6%**

MÄRKUSED:

- Bituumeni hind on saadud Transpordiameti kodulehelt: https://transpordiamet.ee/media/15282/downloadHinna arvutamise aluseks on 2023 aprillikuu keskmine hind 554 euro/tonn, mis on nihutatud üks kuu, ehk oli keskmine ostuhind 2023 aasta märtsis;
- Tardkiikillustiku ja lubjakivi sõelmete hind on võetud autori teadmiste kohaselt;
- Asfaldi tootmine tehases hind on võetud autori parima teadmise kohaselt;
- RA hinnaks on arvestatud 0 eurot/tonn, kuna RA materjal saadakse vana asfaltkatte freesimisel ning selle tööga kaasneks töö ja transpordi kulu ka selliselt, kui antud materjal kasutataks mujal.

Lisa 8 – Lähtematerjalide kogused asfaltsegude laboratoorsel segamisel

AC 20 surf 70/100		
Komponent	Protsent	Kogu vajamine kogus, kg
0/4	36	23,94
4/8	9	5,99
8/16	35	23,28
16/22	15	9,98
Filler	5	3,33
Freesasfalt*	0	0,00
Bituumen 70/100**	5	3,50

AC 20 surf 70/100 RA10%		
Komponent	Protsent	Kogu vajamine kogus, kg
0/4	29	19,29
4/8	8	5,32
8/16	34	22,61
16/22	15	9,98
Filler	4	2,66
Freesasfalt*	10,6	7,06
Bituumen 70/100**	4,41	3,09

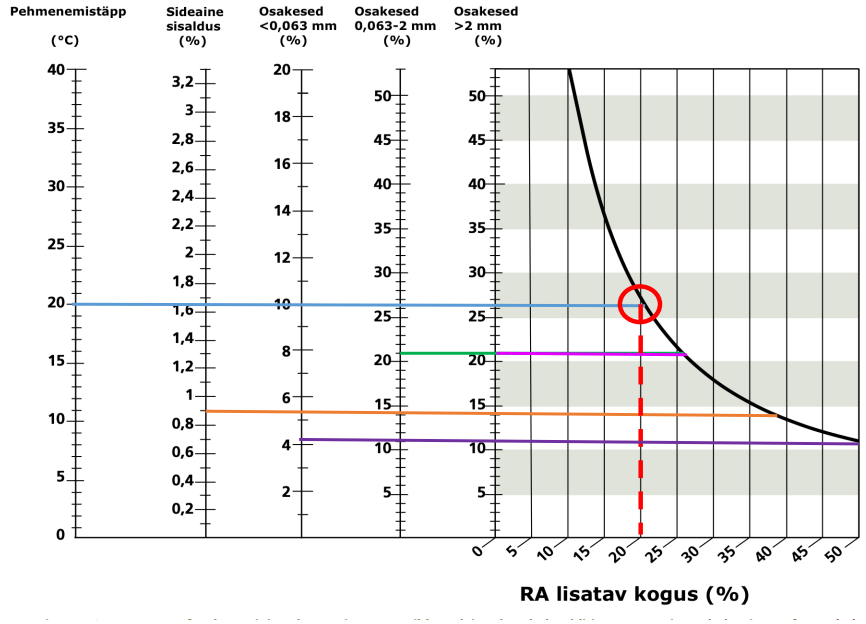
AC 20 surf 70/100 RA30%		
Komponent	Protsent	Kogu vajamine kogus, kg
0/4	18	11,97
4/8	5	3,33
8/16	28	18,62
16/22	17	11,31
Filler	2	1,33
Freesasfalt*	31,85	21,18
Bituumen 70/100**	3,24	2,27

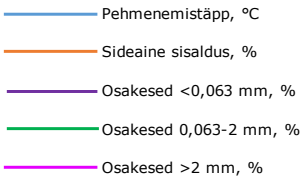
AC 20 surf 70/100 RA50%		
Komponent	Protsent	Kogu vajamine kogus, kg
0/4	8	5,32
4/8	0	0,00
8/16	25	16,63
16/22	17	11,31
Filler	0	0,00
Freesasfalt*	53,08	35,30
Bituumen 70/100**	2,08	1,46

AC 20 surf 100/150 RA50%		
Komponent	Protsent	Kogu vajamine kogus, kg
0/4	8	5,32
4/8	0	0,00
8/16	25	16,63
16/22	17	11,31
Filler	0	0,00
Freesasfalt*	53,08	35,30
Bituumen 100/150**	2,08	1,46

*RA kogused on arvutatud koos sideaine sisaldusega
**Bituumeni massi moodustab bituumen koos lisandiga (wetfix)

Lisa 9 – Praktiline näide Saksamaal kasutusel oleva nomogrammi kasutuse kohta AC surf ja AC bin segude näitel





RA proov	Pehmenemis-täpp, °C	Sideaine sisaldus, %	Osakesed <0,063 mm, %	Osakesed 0,063-2 mm, %	Osakesed >2 mm, %
RA1	62	5,8	13,4	44,0	56,0
RA2	55	5,3	12,5	62,0	38,0
RA3	50	5,4	13,6	50,0	50,0
RA4	70	5,1	9,9	42,0	58,0
RA5	64	5,0	11,0	49,0	51,0
RA6	60	4,9	14,0	41,0	59,0
Suurim erinevus:	**20**	**0,9**	**4,1**	**21**	**21**

Antud näite puhul määrab maksimaalse lubatava RA sisalduse (20%) pehmenemistäpi erinevus (20 °C), kõige väiksem mõju on peenosise sisaldusee erinevusel (4,1 %), mille kohaselt oleks lubatud RA sisaldus (50%)