



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Hooned ja rajatised

**ÜLEVAADE CO₂ EMISSIOONIDEST
ASFALTSEGUDE TOOTMISEL EESTIS NING
MEETODID EMISSIOONIDE VÄHENDAMISEKS
SOOJA ASFALTSEGU TEHNOLOOGIATEGA**

**OVERVIEW OF CO₂ EMISSIONS FROM ASPHALT
PRODUCTION IN ESTONIA AND METHODS TO REDUCE
EMISSIONS BY THE USE OF WARM MIX ASPHALT
TECHNOLOGIES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Roven Toom

Üliõpilaskood 211537EAXM

Juhendaja: Kristjan Lill, doktorant

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." 2022

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2022

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2022

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Roven Toom (17.03.1992)

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

„Ülevaade CO₂ emissioonidest asfaltsegude tootmisel Eestis ning meetodid emissioonide vähendamiseks sooja asfaltsegu tehnoloogiatega“, mille juhendaja on Kristjan Lill,

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.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Roven Toom, 211537EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/18 – Hooned ja rajatised
Juhendaja(d): Kristjan Lill, doktorant, tel 53022437

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ülevaade CO₂ emissioonidest asfaltsegude tootmisel Eestis ning meetodid emissioonide vähendamiseks sooja asfaltsegu tehnoloogiatega.

(inglise keeles) Overview of CO₂ emissions from asphalt production in Estonia and methods to reduce emissions by the use of warm mix asphalt technologies.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata aastal 2020 Eestis toodetud asfaltsegu tootmisprotsessist tekkinud CO₂ heiteid.
2. Kirjeldada meetmeid CO₂ emissioonide vähendamiseks asfaldi tootmises keskendudes sooja asfaltsegu tehnoloogiatele.
3. Luua ülevaade välisriikide kogemustest sooja asfaltsegu tehnoloogiatega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö teema püstitus ja sisuliste eesmärkide seadmine	Jaanuar 2022
2.	CO ₂ emissioonide arvutusmetoodikatega tutvumine ning kohandamine arvutamaks välja heited Eesti asfaldi tootmises	Aprill 2022
3.	CO ₂ emissioonide vähendamise meetmete uurimine ning teoreetiliste materjalide analüüs soojade asfaltsegude tehnoloogiade kohta	Mai 2022
4.	Lõputöö vormistamine	23.05.2022

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ""2022 a

Üliõpilane: Roven Toom ".....".....2022 a
/allkiri/

Juhendaja: Kristjan Lill ".....".....2022 a
/allkiri/

Programmijuht: Simo Ilomets ".....".....2022 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
1 CO ₂ EMISSIOONIDE VÄHENDAMISE EESMÄRGID MAAILMAS JA SELLE TÄHTSUS ...	10
1.1 Rahvusvahelised kliimakokkulepped	10
1.1.1 Kyoto protokoll	10
1.1.2 Pariisi kliimakokkulepe	11
1.1.3 Eesmärk 55	11
2 CO ₂ EMISSIOONID EESTIS JA EESTI ASFALDI TOOTMISES	12
2.1 Eesti CO ₂ emissioonid	12
2.2 CO ₂ emissioonid Eesti asfaldi tootmises	13
2.2.1 CO ₂ heite arvutus asfalditehase tootmisprotsessist	17
2.2.2 CO ₂ heited riigisisest lubjakivikillustiku tootmisest ja transpordist asfalditehaseni	23
2.2.3 CO ₂ heited tardkivikillustiku tootmisest ja transpordist Põhjamaadest Eestisse ning sadamast asfalditehasesse	25
2.2.4 CO ₂ heited riigisisest liiva tootmisest ja transpordist asfalditehaseni	26
2.2.5 CO ₂ heited bituumeni tootmisest ja transpordist asfalditehaseni	28
2.2.6 Kokkuvõtte aastal 2020 Eestis toodetud asfaltsegu tootmisprotsessiga kaasnevatest kasvuhoonegaaside emissioonidest	30
3 CO ₂ EMISSIOONIDE VÄHENDAMISE MEETMED	32
3.1 Warm mix asfalt ehk soe asfalt	34
3.1.1 Madalama tootmis- ja laotamistemperatuuri eelised	37
3.1.2 Madalama tootmistemperatuuri probleemid erinevate meetmete puhul	39
3.1.3 Sooja asfaldi tootmine orgaaniliste lisandite abil	39
3.1.4 Sooja asfaldi tootmine keemiliste lisandite abil	40
3.1.5 Sooja asfaldi tootmine vahustatud bituumeni abil	41
3.1.6 Sooja asfaltsegu tootmiseks kasutatavate lisandite CO ₂ heide	42
3.2 Niiskuse ja välitemperatuuri mõju energiakulule asfaldi tootmisel	44
3.3 Kogemused WMA tehnoloogiatega välisriikides	47
3.3.1 Kogemused Suurbritannias	47
3.3.2 Katselõigud Saksamaal	49
3.3.3 Kogemused Norras	52
3.3.4 WMA kasutus Ameerika Ühendriikides	52

3.4 Madalamal temperatuuril toodetud asfaltsegu ning bituumeni laboratoorsed- ja välikatsetused välisriikides	55
3.4.1 Katsetused WMA tehnoloogiatega Rumeenias.....	55
3.4.2 Vahustamistehnoloogiaga WMA katsetulemused ja katendi pikaajaline vastupidavus	59
3.4.3 WMA lisandite katsetused USA-s, Texas.....	60
3.4.4 Katsetused Lätis WMA tehnoloogial valmistatud SMA seguga	61
KOKKUVÕTE	63
SUMMARY	64

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli doktorant Kristjan Lill. Kuna lõputöö autor on põgusalt ka varem soojade asfaltsegude tehnoloogiaid uurinud ning keskkonna säästmine on igati aktuaalne, siis tekkis autoril teemaga kohene side. Samuti on innovatiivsed lahendused tähtsad teedehitussektori arenguks.

Magistritöö eesmärgiks on leida CO₂ emissioonid asfaldi tootmises alates toorainete tootmisest ja transpordist asfalditehaseni kuni asfaltsegu valmimise hetkeni. Lõputöös tutvustatakse emissioone vähendavaid meetodikaid ja kirjeldatakse nendega kaasnevaid plusse ja miinuseid. Põhjalikumalt kirjeldatakse soojade asfaltsegude tehnoloogiaid ja kogemusi nende tehnoloogiatega välisriikides.

Autor soovib siiralt tänada oma juhendajat Kristjan Lille, kellega koos analüüsi põhjalikult erinevaid meetodikaid kasvuhoonegaaside emissioonide leidmiseks ning leiti sobilikud meetmed lõputöös rakendamiseks. Samuti suunas juhendaja õigete materjalide ja instantside juurde, et lõputöö teoreetiline sisu oleks võimalikult kvaliteetne ja sisukohane. Samuti tänab autor oma kolleegi Kaarel Soolot, kelle teadmised ja nõu aitasid pidevalt lõputööga edasi liikuda. Lisaks tänab autor anonüümset inervjueritavat Suurbritanniast, kelle kogemused ja teadmised võiksid abiks tulla igale asfaldi tootmisega tegelevale ettevõttele.

Võtmesõnad: Asfaldi tootmine, kasvuhoonegaasid, CO₂ emissioonid, emissioonide vähendamine asfaldi tootmises, soojad asfaltsegud, warm mix asphalt, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

HMA – Hot mix asphalt (ingl k), kuum asfaltsegu

WMA – Warm mix asphalt (ingl k), soe asfaltsegu

RA – Ringlussevõetud asfalt

AC Surf – Surface asphalt concrete (ingl k), kulumiskihi asfaltsegu

SMA – Stone mix asphalt (ingl k) ehk killustikmastiksfalt

KHG – Kasvuhoonegaasid

GWP – Global warming potential (ingl k) ehk globaalse soojenemise potentsiaal

IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change (ingl k), valitsustevaheline kliimamuutuste paneel

COP – Conference of the Parties (ingl k), kliimamuutuste konventsiooni kõrgeim otsustusorgan

EAPA – European Asphalt Pavement Association (ingl k) ehk Euroopa Asfaldiliit

NAPA – National Asphalt Pavement Association (ingl k) ehk Ameerika Ühendriikide Riiklik Asfaldiliit

FHWA – Federal Highway Administration (ingl k) ehk Ameerika Ühendriikide Föderaalne Maanteeamet

SISSEJUHATUS

Maailmas pööratakse aina enam tähelepanu kliimamuutustele ja nende põhjustele. Üheks suurimaks kliimamuutuste põhjustajaks peetakse kasvuhoonegaase. Peamine inimtegevuse tagajärjel tekkiv kasvuhoonegaas on CO₂ ehk süsinikdioksiid. Fossiilsete kütuste põlemisel tekivad lisaks ka CH₄ ehk metaan ja N₂O ehk naerugaas. Kliimasoojenemisel on katastroofilised tagajärjed keskkonnale ja kliimamuutused seavad ohtu inimkonna eksistentsi. Üha suurem kliimateadlikkus on muutnud ka inimeste mõtlemis- ja käitumisviise ning aina rohkem otsitakse võimalusi kasvuhoonegaaside tekke vähendamiseks.

Maailmas on toimunud palju kliimakonverentse ning sõlmitud palju varasemaid kokkuleppeid, mille eesmärgiks on vähendada kasvuhoonegaaside emissioone. Praegu on arutlusel rohepöörde kava „Eesmärk 55“ või „Fit for 55“ (ingl k), mille eesmärgiks on saavutada kliimanetraalsus aastaks 2050. Selleks, et eesmärk saavutada peab iga inimene, iga ettevõtte, iga sektor panustama ja oma kasvuhoonegaaside heidet vähendama.

Töötades teedehituse sektoris on autor võtnud eesmärgiks hinnata Eestis asfaldi tootmisel tekitatavate kasvuhoonegaaside hulka alates toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimiseni asfalditehases ning pakkuda välja lahendusi nende vähendamiseks.

Magistritöö esimeses osas kirjeldab autor kliimamuutuste tagajärgi, kasvuhoonegaaside vähendamise tähtsust ning rahvusvahelisi kliimaeesmärke.

Töö teises osas leiab autor Eesti asfaldi tootmises tekkivate kasvuhoonegaaside hulga aastal 2020, alates toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimiseni. Tulemusteni jõutakse arvutuste teel ja uurimistöodele põhinedes.

Töö viimases osas analüüsib autor erinevaid lahendusi CO₂ emissioonide vähendamiseks asfaldi tootmises. Peamiselt analüüsitakse sooja asfaltsegu ehk warm mix asphalt (ingl k), lühendatult WMA tehnoloogiaid. Kirjeldatakse põhjalikult teiste riikide kogemusi WMA tehnoloogiatega ning tuuakse välja erinevate tehnoloogiate puudusi ning eeliseid.

1 CO₂ EMISSIOONIDE VÄHENDAMISE EESMÄRGID MAAILMAS JA SELLE TÄHTSUS

Kliima soojenemist alates 20. sajandi keskpaigast on seostatud inimtegevusega. Peamiselt on kliimamuutuste põhjustajateks fossiilsete kütuste nagu söe, nafta ja gaasi põletamine, mille käigus paisatakse õhku kasvuhoonegaase (KHG). Selle tulemusel on maailma keskmine õhutemperatuur tõusuteel. Maa on praegusel hetkel umbes 1,1 °C soojem, kui 1800. aastatel. Prognooside põhjal tõuseb temperatuur 2100. aastaks veel 2 – 6,3 °C. Selle takistamiseks on vajalik abinõusid inimtekkeliste kliimamuutuste vastu.

Kliimamuutuste tagajärgedeks võivad olla intensiivsed põuaperioodid, veepuudus, ulatuslikud tulekahjud, merevee taseme tõusmine, üleujutused, polaarjää sulamine, katastroofilised tormid, bioloogilise mitmekesisuse vähenemine jne. Juba praegu on merevee taseme tõusu tõttu maailmas väikesaari, mis on uppumisohus. Samuti mõjutavad keskkonnamuutused toidu kasvatamise võimalusi. Keskkonnamuutused hävitavad elukõlblikke territooriume, mis sunnib inimesi ümber asuma. Tekkimas on kliimapagulased. Kliimamuutuste ignoreerimine on ohuks inimkonna eksistentsile. [1] [2] Sellest tulenevalt peaks eesmärgiks olema kliimanetraalsuse saavutamine.

Kliimanetraalsus on seisund, kus üks piirkond ei paiska õhku vähem ega rohkem kasvuhoonegaase kui ökosüsteem parasjagu siduda jõuab. Seega kliimanetraalsuse korral tuleb kokku kasvuhoonegaaside summaks null, sest ökosüsteem jõuab kõik ära siduda. [3]

1.1 Rahvusvahelised kliimakokkulepped

Paljude varasemate teadustööde ning teadlaste teavitustöö tulemusel on riigid aru saanud kliimamuutuste tõsidusest ja muutuste vajadustest. Vältimaks katastroofilisi tagajärgi on hakatud tegelema kliimamuutuste vähendamisega. Seetõttu on sõlmitud erinevaid kliimakokkuleppeid, et saavutada ja täita ühiseid eesmärke terves maailmas kliimamuutuste vähendamiseks ning kliimanetraalsuse saavutamiseks.

1.1.1 Kyoto protokoll

ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni raames peetud COP3 – Conference of the Parties (ingl k) toimus 11. detsembril 1997 Jaapanis Kyotos. Selle raames võeti vastu

Kyoto protokoll. Kyoto protokoll peamiseks eesmärgiks on kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamine võrreldes 1990. aastaga. Kyoto protokoll probleemiks oli see, et selles kokkulepitu on vaid soovituslik. Kyoto protokolliga on reguleeritud kuus peamist kasvuhoonegaasi [4]:

- CO₂ – süsinikdioksiid;
- CH₄ – metaan;
- N₂O – diämmastikoksiid ehk naerugaas;
- HFC-d – fluorosüsivesinikud;
- PFC-d – perfluorosüsivesinikud;
- SF₆ – väävelheksafluoriid. [4]

Fossiilsete kütuste põlemisest tekib peamiselt esimest kolme ühendit CO₂, CH₄ ja N₂O. Kõige levinum neist on süsinikdioksiid. Ülejäänud kolm ühendit (HFC-d, PFC-d ja SF₆) on fluoritud kasvuhoonegaasid, mis on inimese poolt leiutatud kemikaalid, mida kasutatakse paljudes majandusvaldkondades ja rakendustes. [5]

1.1.2 Pariisi kliimakokkulepe

Detsembris 2015 toimunud Pariisi kliimakonverentsil COP21 võtsid 195 riiki vastu globaalse, õiguslikult siduva kokkuleppe kliima soojenemise pidurdamiseks. Kokkuleppe 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. [6]

Valitsused leppisid kokku:

- pikaajalises eesmärgis hoida globaalne keskmine temperatuuri tõus tunduvalt alla 2°C (isegi 1.5°C) võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga;
- vajaduses peatada ülemaailmne heitkoguste kasv võimalikult kiiresti, tunnistades, et see võtab kauem aega arengumaadel;
- vajaduses heitkoguste haripunktini jõudmise järel vähendada järsult heitkoguseid tuginedes parimale olemasolevale teadusinfole. [6]

1.1.3 Eesmärk 55

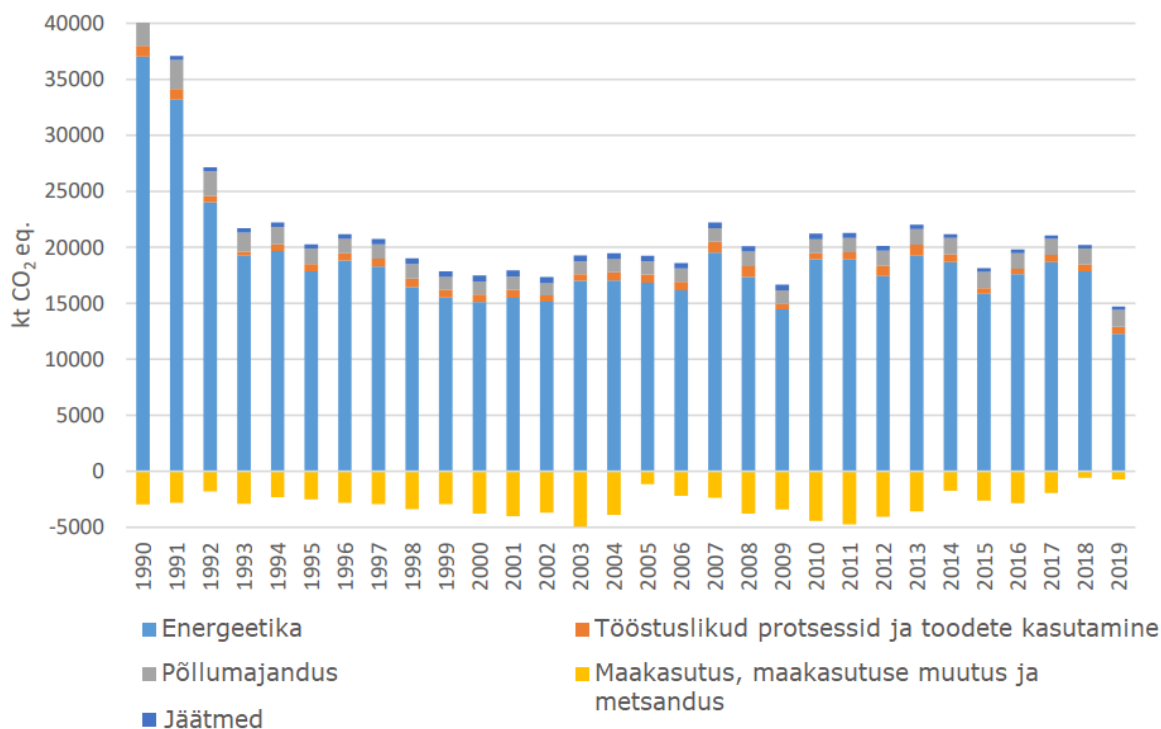
Aastal 2021 välja pakutud ja praegu arutlusel oleva kokkuleppe „Eesmärk 55“ ehk „Fit for 55“ (ingl k) raames on Euroopa Liit seadnud endale Euroopa kliimamääruses siduva eesmärgi saavutada kliimaneutraalsus 2050. aastaks. Selleks on vaja kasvuhoonegaaside heitkoguste praeguse taseme olulist vähenemist järgmistel kümnenditel. Vaheammuna kliimaneutraalsuse suunas suurendas EL oma 2030. aasta kliimaeesmärki, kohustudes vähendama heitkoguseid 2030. aastaks vähemalt 55%. [7]

2 CO₂ EMISSIOONID EESTIS JA EESTI ASFALDI TOOTMISES

2.1 Eesti CO₂ emissioonid

Eesti osakaal kasvuhoonegaaside tekkes on maailma mastaabis väga väike, kuid riigi suuruse kohta suur. Aastal 2018 oli Eesti Euroopas CO₂ emissioonide tekitamises inimese kohta teisel kohal. [8] Euroopa Liidu liikmesriikide kasvuhoonegaaside heitkogusest moodustab Eesti osa umbes 0,4 protsenti. [9] Võrreldes 1990. aastaga on Eesti kasvuhoonegaaside koguheidet vähenenud 64%, mis tuleneb Nõukogude Liidu lagunemise järel vähenenud tööstusest. [9]

Peamiseks CO₂ heite tootjaks Eestis on energeetika sektor (Joonis 1). Põhjus seisneb põlevkivitööstuses. Elektrit toodetakse Eestis peamiselt põlevkivist. Põlevkivisektori õhusaaste moodustab üle 70% Eesti õhuheitmetest ning põlevkivitööstuse jäägid 80% jäätmetest. Kuigi asfaldi tootmine kuulub tööstuslike protsesside hulka, mille osakaal CO₂ heidetes on marginaalne, on asfaldi tootmisega vahetult seotud ka transport, mis on liigitatud energeetika alla. Samuti kasutab suur osa Eesti asfalditehaseid primaarkütusena põlevkiviõli. [10]



Joonis 1. Eesti kasvuhoonegaaside heitekogused sektorite kaupa aastatel 1990–2019 (kt CO₂-ekvivalenti) [9]

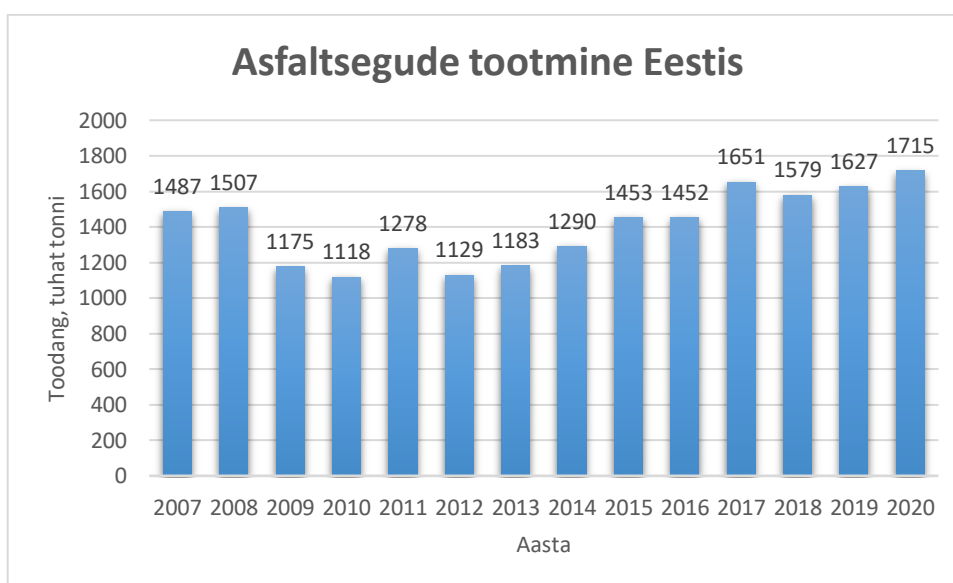
2.2 CO₂ emissioonid Eesti asfaldi tootmises

Vastavalt Atmosfääriõhu kaitse seadusele on kasvuhoonegaasid süsinikdioksiid (CO₂), metaan (CH₄), diämmastikoksiid (N₂O), fluorosüsivesinikud (HFC-d), perfluorosüsivesinikud (PFC-d) ja väävelheksafluoriid ning muud looduslikud ja inimtekkelised atmosfääri gaasilised koostisosad, mis neelavad ja kiirgavad infrapunakiirgust. Kõige levinum kasvuhoonegaas on süsinikdioksiid (CO₂), mille heitekoguste leidmisele autor lõputöös keskendub. Samas on võimalik ka teiste kasvuhoonegaaside mõju võrrelda süsinikdioksiidi ekvivalentina kasutades selleks globaalse soojendamise potentsiaali. Globaalse soojenemise potentsiaal ehk GWP näitab, mitu korda on üks kasvuhoonegaasi molekul soojuse tagasipeegeldamise võimelt efektiivsem kui süsinikdioksiidi molekul. [11] GWP hinnatakse ajaperioodi kohta, kuna erinevad gaasid püsivad atmosfääris erineva aja ning nad neelavad energiat erinevalt. Levinuimaks ajaperioodiks GWP puhul on 100 aastat. CO₂ loetakse referentsgaasiks, millega teisi gaase võrreldakse ning tema GWP iga ajaperioodi puhul on 1. CH₄ GWP 100 aastase perioodi puhul on 28 – 36 ja N₂O puhul on 265 – 298. [12] IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change (ingl k) 2014 viies hindamisraport annab CH₄ GWP väärtuseks 100 aastase perioodi puhul 28 (GWP_{CH_4}) ja

N₂O väärtuseks 265 (GWP_{N_2O}). [13] Neid väärtusi kasutab lõputöö autor CH₄ ja N₂O heidete teisendamisel CO₂ ekvivalentideks.

Lõputöös leitakse hällist-väravani põhimõttel CO₂ heited alates toormaterjalide kaevandamisest ja nende transpordist kuni asfaltsegu valmimiseni asfalditehases. Põhinetakse erinevatele uuringutest leitud infole ning arvutusmeetmetele. Piisava info olemasolul arvutatakse välja ka CH₄ ning N₂O heide ning leitakse kokkuvõtvalt kõigi kasvuhoonegaaside heide CO₂ ekvivalentidena. Kõik tulemused on leitud väga mitmete intuitsiooniliste, kogemuslike või loogiliste eelduslike tingimuste põhjal, seega saab tulemusi tõesena võtta ainult loodud eelduste baasil. Arvutused teostatakse informatsiooni olemasolu tõttu aasta 2020 asfaldi toodangu põhjal.

Eestis tegutses aastal 2020 kokku 22 asfalditehast (> 50 t/h tootmisvõimsusega). Kokku toodeti 1 715 151 t kuumi asfaltsegusid ehk hot mix asphalt (ingl k), lühendatult HMA. Peale viimast majanduslangust on asfaldi tootmine kogustelt valdavalt kasvutrendis (Joonis 2). [14]



Joonis 2. Asfaltsegude tootmise ja paigaldamise kogused tuhandetes tonnides perioodil 2007 kuni 2020 [14]

Hindamiseks asfaldi tootmisel kasutatud tooraineid on vajalik täpsemalt teada, milliseid tüüpi ja mis kogustes asfaltsegusid toodeti. 2020 aastal toodetud segude kogused asfaltsegude liikide järgi on nähtavad tabelis (Tabel 1).

Tabel 1. Toodetud asfaltsegude kogused liigiti [14]

Toodetud asfaltsegud aastal 2020	
Segu liik	kogus, t
AC Surf	1 053 069
AC Base	468 142
AC Bin	97 275
SMA	92 087
Dreenasfalt	4 548
Valuasfalt	30
Kokku	1 715 151

Toodetud segutüüpide põhjal teeb lõputöö autor kogemuslikud ja normatiividele vastavad eeldused tooraine sisalduste protsentide kohta (Tabel 2), et arvutada välja toorainete transpordist ja tootmisest tekkiv CO₂ heide.

Tabel 2. Aastal 2020 toodetud asfaltsegude võimalikud toormaterjalide sisaldused protsentuaalselt ja tonnides põhinedes autori hinnangule

Asfaltsegu liik	kogutoodang, t	bituumeni sisaldus, %	tardkivi-killustik, %	pae-killustik, %	liiv, %	bituumen, t	tardkivi-killustik, t	pae-killustik, t	liiv, t
AC Surf	1 053 069	5,5	70	20,5	4	57 918,8	737 148,3	215 879,1	42 122,8
AC Base	468 142	3,7	2,3	90	4	17 321,3	10 767,3	421 327,8	18 725,7
AC Bin	97 275	5,5	80	10,5	4	5 350,1	77 820,0	10 213,9	3 891,0
SMA	92 087	6	94	-	-	5 525,2	86 561,8	-	-
Dreenasfalt	4 548	3,5	87,5	5	4	159,2	3 979,5	227,4	181,9
Valuasfalt	30	8	92	-	-	2,4	27,6	-	-
Kokku	1 715 151					86 277,0	916 304,4	647 648,2	64 921,4

2.2.1 CO₂ heite arvutus asfalditehase tootmisprotsessist

Eesti asfalditehased kasutavad autorile teadaolevalt primaarse kütusena kas maagaasi või põlevkiviõli. Asfalditehastes kasutatakse energiat täitematerjalide kuivatamiseks ja kuumutamiseks, bituumeni kuumutamiseks ning erinevate liikuvate komponentide töös hoidmiseks. Liikuvad komponendid ning tehase juhtimisseadmed vajavad töötamiseks üldjuhul elektrit.

Selleks, et täpselt hinnata asfalditehaste CO₂ heiteid oleks vaja kogu infot tehastes kasutatavate seadmete kohta. Samuti tehastes kasutatavate kütuste kohta ning kütusekulude kohta. Informatsiooni saamiseks pöördus lõputöö autor lõputöö juhendaja abil tootjate poole. Kuna tegu on delikaatsete andmetega, siis kõikidelt tootjatelt vastust saada ei õnnestunud. Saadud info on näidatud tabelis (Tabel 3), sealjuures avaldamata informatsiooni allikat. Kokkuvõtte põhineb aasta 2020 tootmisandmetel.

Tabel 3. Eesti tootjatele saadetud päringu põhjal saadud info primaarkütuse kulu kohta ühe toodetud asfaldi tonni pealt aastal 2020

Tehas	Primaarkütuse liik	Keskmine kütusekulu tehase kohta	Keskmine kütusekulu kütuseliigi kohta	Ühik
Tehas 1	Maagaas	8,64	8,35	m ³ /t
Tehas 2	Maagaas	7,22		
Tehas 3	Maagaas	10,04		
Tehas 4	Maagaas	7,49		
Tehas 5	Põlevkiviõli	7,72	7,47	kg/t
Tehas 6	Põlevkiviõli	6,70		
Tehas 7	Põlevkiviõli	7,67		
Tehas 8	Põlevkiviõli	7,98		
Tehas 9	Põlevkiviõli	7,66		
Tehas 10	Põlevkiviõli	8,88		
Tehas 11	Põlevkiviõli	6,90		
Tehas 12	Põlevkiviõli	7,64		
Tehas 13	Põlevkiviõli	8,06		
Tehas 14	Põlevkiviõli	6,32		
Tehas 15	Põlevkiviõli	6,68		

Saadud informatsioon küll täpsustab üldpilti ja võimaldab teha täpsemaid eeldusi, aga sellegipoolest tuleb CO₂ heidete arvutustes põhineda paljudel eeldustel ning intuitsioonil.

Maagaasi primaarkütusena kasutatavate tehaste puhul tehakse arvutuste teostamiseks järgnevad eeldused:

- Täitematerjalide kuivatamiseks ja kuumutamiseks ning bituumeni kuumutamiseks kasutatakse maagaasi;
- Tehases kasutatav elektrienergia tuleb võrgust ning elektri tootmisel tekkivaid CO₂ heited lõputöös ei arvestata;
- Täitematerjale asfalditehases liigutab diiselmootoriga frontaallaadur.

Põlevkiviõli primaarkütusena kasutatavate tehaste puhul tehakse arvutuste teostamiseks järgnevad eeldused:

- Täitematerjalide kuivatamiseks ja kuumutamiseks kasutatakse põlevkiviõlil töötavaid seadmeid;
- Bituumeni kuumutamiseks kasutatakse diiselmootoriga töötavat seadet;
- Eeldatakse, et tehastel puudub ligipääs elektrivõrgule, seega toodetakse tehasele vajalik elektrienergia diiselmootoriga;
- Täitematerjale asfalditehases liigutab diiselmootoriga frontaallaadur.

Diisliga töötavate seadmete kütusekulu hinnang põhineb läbiviidud küsitlusel. Diislikulu puhul esitatakse keskmiste asemel maksimaalmäärasid (Tabel 4). Seega on võimalik, et reaalne CO₂ heide on potentsiaalselt väiksem, kui nende andmetega arvutuste puhul leitud tulemused. Kindlasti on võimalik, et tehased kasutavad veel erinevaid kütuseliikide variatsioone, kuid informatsiooni puudulikkuse tõttu teostatakse arvutused loetletud eelduste põhjal.

Tabel 4. Eesti tootjatele saadetud päringu põhjal saadud info sekundaarkütuste kulu kohta ühe toodetud asfaldi tonni pealt

Tarbija	Kütuse liik	Kütusekulu	Ühik
Bituumeni katel	diiselmootor	0,6	liitrit/tonn
Generaator	diiselmootor	1,2	liitrit/tonn
Frontaallaadur	diiselmootor	0,2	liitrit/tonn

Eestis on Keskkonnaminister väljastanud määruse „Välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid“. [15] Selle määrusega sätestatakse energeetika- ja tööstusallikatest välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid. Arvutuskäik põhineb küttekulul ja kütteväärtusel. Samuti on määravaks iga kütuseliigi eriheide, mis on välisõhku väljutatava saasteaine heitkogus tooraine või toodangu ühiku kohta. [11] Kõik lõputöös teostatud süsinikdioksiidi heite arvutused põhinevad eelmainitud Keskkonnaministri määrusel. [15]

Leidmaks asfaldi tootmise aastast süsinikdioksiidi heidet, tuleb teostada järgnevad arvutused [15]:

Kütusekulu ümberarvutamine teradžaulidesse teostatakse valemiga (2.1) [15]:

$$B^1 = B \times Q_i^r \times n \quad (2.1)$$

kus B^1 – ümberarvutatud kütusekulu, TJ;

B – kütusekulu, kg või m^3 või l;

Q_i^r – kütuse kütteväärtus, MJ/kg või MJ/ m^3 või MJ/l;

n – suhtarv.

Seejärel võetakse kütuse eriheide q_c „Välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid“ määruse lisast 2. [16]

Leitakse kütuse süsiniku sisaldus valemiga (2.2) [15]:

$$C_t^r = B^1 \times q_c, \quad (2.2)$$

kus C_t^r – kütuse süsinikusisaldus, tC;

B^1 – ümberarvutatud kütusekulu, TJ;

q_c – kütuse eriheide, tC/TJ.

Lõpuks leitakse tegelik CO₂ heide valemiga (2.3) [15]:

$$M_{CO_2} = C_t^r \times K_c \times 3,664, \quad (2.3)$$

kus M_{CO_2} – tegelik CO₂ heide, tCO₂;

C_t^r – kütuse süsinikusisaldus, GgC;

K_c – kütuse oksüdatsioonitegur – 1.

Lisaks CO₂ heitele leitakse teiste fossiilsete kütuste põlemisel tekkivate kasvuhoonegaaside N₂O ehk naerugaasi ja CH₄ ehk metaani heide. Statsionaarsete seadmete puhul võetakse aluseks Eesti kasvuhoonegaaside inventuuris 1990 – 2019 kasutusel olnud ja IPCC 2006 protokollil põhinev arvutusmeetod. [17]

Statsionaarsete seadmete N₂O heide leitakse valemiga (2.4) [17]:

$$M_{N_2O} = B^1 \times EF \times 10^{-3}, \quad (2.4)$$

kus M_{N_2O} – tegelik N₂O heide, tCO₂;

B^1 – ümberarvutatud kütusekulu, TJ;

EF – kütuse emissioonifaktor, kg/TJ.

Statsionaarsete seadmete CH_4 heide leitakse valemiga (2.5) [17]:

$$M_{CH_4} = B^1 \times EF \times 10^{-3}, \quad (2.5)$$

kus M_{CH_4} – tegelik CH_4 heide, tCO₂;

B^1 – ümberarvutatud kütusekulu, TJ;

EF – kütuse emissioonifaktor, kg/TJ.

Liikuva ehitustehnika ja maismaatranspordi puhul võetakse N₂O ja CH₄ heite leidmiseks aluseks Ameerika Kliimakaitse Agentuuri arvutusmeetmed. [18]

Ehitustehnika N₂O heide leitakse valemiga (2.6) [18]:

$$M_{N_2O} = F \times EF \times 10^{-6}, \quad (2.6)$$

kus M_{N_2O} – tegelik N₂O heide, tCO₂;

F – kütusekulu, l;

EF – kütuse emissioonifaktor, g/l.

Ehitustehnika CH₄ heide leitakse valemiga (2.7) [18]:

$$M_{CH_4} = F \times EF \times 10^{-6}, \quad (2.7)$$

kus M_{CH_4} – tegelik CH₄ heide, tCO₂;

F – kütusekulu, l;

EF – kütuse emissioonifaktor, g/l.

Maismaatranspordi N₂O heide leitakse valemiga (2.8) [18]:

$$M_{N_2O} = m \times EF \times 10^{-6}, \quad (2.8)$$

kus M_{N_2O} – tegelik N₂O heide, tCO₂;

m – läbitud vahemaa, km;

EF – kütuse emissioonifaktor, g/km.

Maismaatranspordi CH₄ heide leitakse valemiga (2.9) [18]:

$$M_{CH_4} = m \times EF \times 10^{-6}, \quad (2.9)$$

kus M_{CH_4} – tegelik CH₄ heide, tCO₂;

m – läbitud vahemaa, km;

EF – kütuse emissioonifaktor, g/km.

Kolme tekkiva kasvuhoonegaasi heited summeeritakse kokku CO₂ ekvivalendiks valemiga (2.10):

$$M_{CO_2eq} = M_{CO_2} + M_{N_2O} \times GWP_{N_2O} + M_{CH_4} \times GWP_{CH_4}, \quad (2.10)$$

kus M_{CO_2eq} – 100 aastase perioodi summaarne heide CO₂ ekvivalendina, tCO_{2eq};
 M_{CO_2} – tegelik CO₂ heide, tCO₂;
 M_{N_2O} – tegelik N₂O heide, tCO₂;
 GWP_{N_2O} – N₂O globaalse soojenemise potentsiaal 100 aastase perioodi kohta;
 M_{CH_4} – tegelik CH₄ heide, tCO₂;
 GWP_{CH_4} – CH₄ globaalse soojenemise potentsiaal 100 aastase perioodi kohta.

Eesti asfalditehaste poolt saadud info kohaselt võetakse arvutustes kütusekuluks maagaasi kasutuse korral 8,35 m³/t ja põlevkiviõli kasutuse korral 7,47 kg/t (Tabel 3). Arvutustes võetakse maagaasi kütteväärtuseks 9,3 kWh/m³, mis võrdub 33,48 MJ/m³. [19] Põlevkiviõli kütteväärtuseks arvestatakse 10,8 kWh/kg, mis võrdub 38,88 MJ/kg. [19] Diiselmootori kütteväärtuseks arvestatakse arvutustes 9,7 kWh/l, mis võrdub 34,92 MJ/l. [19]

Asfaldi tootjatele esitatud küsitluse põhjal toodeti neljas maagaasil töötavas asfalditehases aastal 2020 kokku 551 970 t asfaltsegusid. Autor eeldab, et kõik ülejäänud aasta 2020 kogutoodangust toodeti põlevkiviõlil töötavates tehastes. Seega eeldatakse, et aastal 2020 toodeti põlevkiviõlil töötavates tehastes kokku 1 163 181 t asfaltsegu.

Maagaasil töötavate seadmete CH₄ ja N₂O heite hindamiseks võetakse aluseks Eesti kasvuhoonegaaside inventuur 1990 – 2019, kus on toodud maagaasi CH₄ ja N₂O emissioonifaktoriteks tootva tööstuse puhul vastavalt 1 kg/TJ ja 0,1 kg/TJ kütusekulu suhtes [17].

Eesti kasvuhoonegaaside inventuuri põhjal on põlevkiviõli emissioonifaktoriteks CH₄ puhul 3 kg/TJ ja N₂O puhul 0,6 kg/TJ. [17]

Kuna igas asfalditehases töötab eelduste kohaselt diiselkütusel frontaallaadur, mille kütusekulu on küsitluse põhjal 0,2 l toodetud tonni kohta (Tabel 4), siis kütusekulu kokku 1 715 151 t toodetud asfaldi kohta on 343 030,2 l.

Ehitustehnika CH₄ ja N₂O leidmiseks põhinetakse Ameerika Kliimakaitse Agentuuri materjalidele. [18] Emissioonifaktor diiselkütusel töötavatel ehitusmasinatel on CH₄ puhul 0,053 g/l (0,2 g/gal) kütusekulu kohta ja N₂O puhul 0,124 g/l (0,47 g/gal) kütusekulu kohta. [18]

Tehtud eelduste kohaselt saab iga põlevkiviõli primaarkütusena kasutatav tehase elektri diiselgeneraatorist ning samuti töötab bituumenikatel diiselkütusel. Mõlema seadme kütusekulu kokku on küsitluse põhjal 1,8 l tonni toodetud asfaldi kohta (Tabel 4). Seega abiseadmed kulutavad kokku 1 163 181 t asfaltsegu tootmiseks 2 093 725,8 l kütust. Eesti kasvuhoonegaaside inventuuri põhjal on diiselkütuse emissioonifaktoriteks CH₄ puhul 3 kg/TJ ja N₂O puhul 0,6 kg/TJ. [17]

Kõigi kütuseliikide puhul leitakse CO₂ heited valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). Statsionaarsete seadmete ehk maagaasil või põlevkiviõlil töötavate tehaste seadmete ning diiselkütusel töötava generaatori CH₄ ja N₂O heited leitakse valemitega (2.4) ja (2.5). Frontaallaadurite CH₄ ja N₂O heited leitakse valemitega (2.6) ja (2.7). Kogu asfalditehases tekkivate KHG-de summa CO₂ ekvivalendina leitakse valemiga (2.10). Asfalditehases tootmisprotsessist tekkivate KHG-de arvutustulemused koondati tabelisse (Tabel 5).

Tabel 5. Kokkuvõtte aastal 2020 asfaldi tootmisest tekkivast KHG heidetest

Seade	toodetud asfaldi kogus, t	CO ₂ , t	CH ₄ , t	N ₂ O, t	CO ₂ eq, t	kütus
Asfalditehas	551 970	8 650,36	0,15	0,02	8 658,77	maagaas
Asfalditehas	1 163 181	26 117,53	1,01	0,20	26 199,62	põlevkiviõli
Frontaallaadur		886,57	0,02	0,04	898,36	diisel
Abiseadmed		5 411,29	0,22	0,04	5 429,06	diisel
Kokku	1 715 151	41 065,75	1,41	0,30	41 185,81	

Loomaks paremat ettekujutlust maagaasil töötava tehase ja põlevkiviõlil töötava tehase emissioonide võrdlusest tegi autor võrdleva arvutuse 100 000 t asfaltsegu tootmise kohta. Maagaasil töötava tehase puhul on arvestatud et kütteseadmed töötavad maagaasil ning täitematerjale liigutab frontaallaadur. Elektri toodangut maagaasil töötava tehase puhul arvesse ei võeta. Põlevkiviõlil töötava tehase puhul töötab tehase

täitematerjalide kuivati põlevkiviõlil ning bituumenikatel, elektrigeneraator ja frontaallaadur diiselkütusel. Võrdluse tulemused on nähtavad tabelis (Tabel 6).

Tabel 6. Emissioonide võrdlustabel 100 000 t asfaldi tootmise puhul põlevkiviõli primaarkütusena kasutava ja maagaasi primaarkütusena kasutava asfalditehase vahel

Tehas	toodetud asfaldi kogus, t	Tehase CO ₂ eq, t	Abiseadmete CO ₂ eq, t	Kokku CO ₂ eq, t
Maagaasil töötav tehas	100 000	1 568,70	52,38	1 621,08
Põlevkiviõlil ja diisil töötav tehas	100 000	2 252,41	519,12	2 771,53

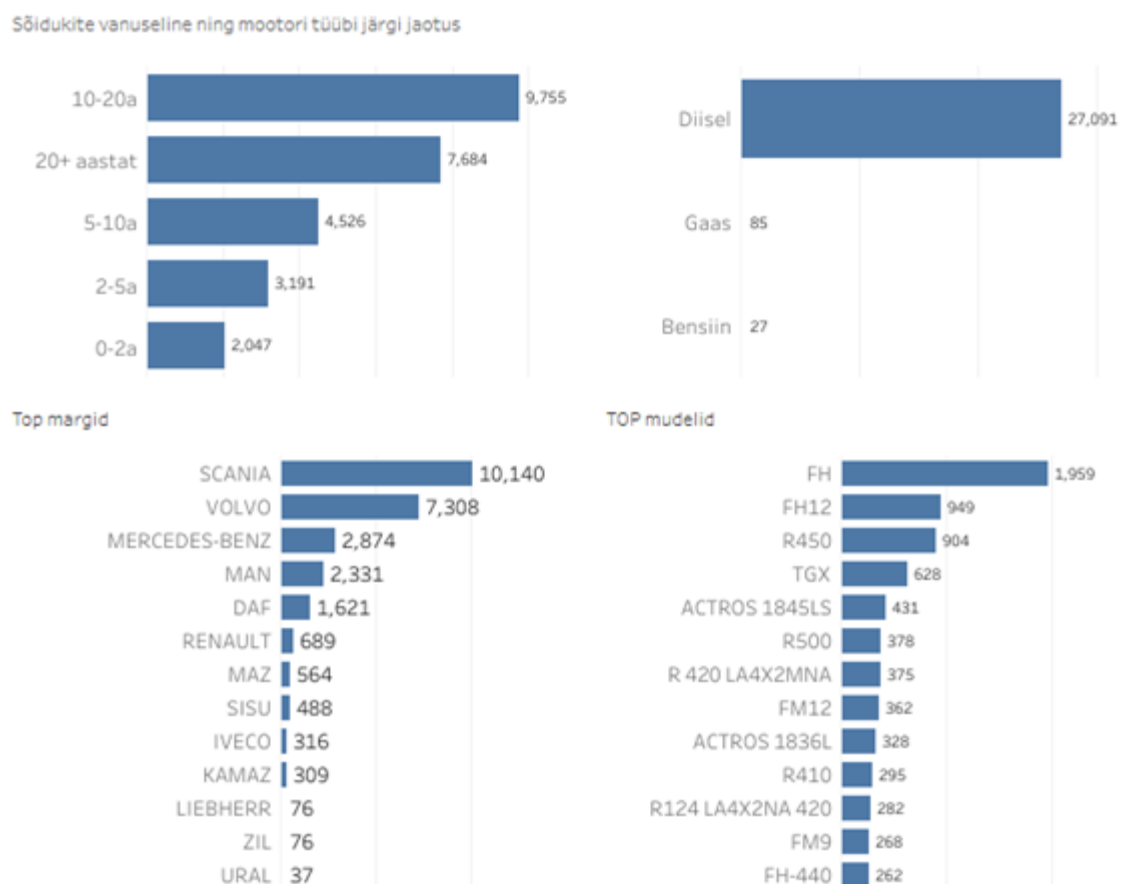
2.2.2 CO₂ heited riigisisest lubjakivikillustiku tootmisest ja transpordist asfalditehaseni

Leidmaks CO₂ emissioone lubjakivikarjäärade tootmisprotsessis tutvus autor Eesti lubjakivikarjäärade keskkonnalubadega. Paekivitoodete tehase OÜ poolt Väo lubjakivimaardlale võetud keskkonnavalas on välja toodud, et aastas tekib 140 000 m³ paekivi tootes 826,134 t/CO₂ heidet. [20] Arvestades paekivi tiheduseks 2,66 t/m³ [21] teeb see ühe tonni toodetud killustiku CO₂ heiteks 2,22 kg/CO₂ (võimalike materjalikadudega tootmisprotsessis ei arvestata). Võrdluseks Inglismaal Aggregate Industries poolt majandatava Torr Works lubjakivikarjääri keskkonnadeklaratsioonis on leitud, et karjäärisiseses tootmisprotsessis tekib 5,77 kg/CO₂eq ühe toodetud tonni killustiku kohta. [22]

Seega võttes aluseks Väo lubjakivimaardla keskkonnavalas heiteinfo ning 2020 aasta paekillustiku tarbimise asfaldi tootmises, mis oli 647 648,2 t (Tabel 2), saame aastaseks CO₂ heiteks $M_{CO_2} = 1436,75 tCO_2$.

Leidmaks CO₂ emissioone lubjakivikillustiku transpordist karjäärist asfalditehasesse tehakse järgmised eeldused:

Mudelibõhiselt on Eestis enimlevinud sadulveokiteks Volvo FH seeria veokid (Joonis 3). 64% veokitest on vanemad kui 10 aastat. Olles optimistlikud autopargi uuendamise suhtes võetakse arvutuste aluseks EURO 5 heitenormidega Volvo sadulveok. Tootjapoolsete kütusekulu andmete põhjal tehakse järeldus, et täislaadungiga (26 t) minnes ning tühjalt sama distantssi läbides tagasi tulle on keskmiseks kütusekuluks 27,75 l/100km ehk 0,2775 l/km. [23] Arvutustes ümardatakse kütusekulu 0,3 l/km peale. Antud veokit kasutatakse baasveokina kõigis maismaatranspordiga seotud arvutustes.



Joonis 3. N3 kategooria sõidukite statistika Eestis [24]

Arvutustes luuakse eeldus, et paekillustiku karjäär asub asfalditehasest keskmiselt 10 km kaugusel. See teeb ühe reisi pikkuseks 20 km. Veetava koorma suuruseks arvestatakse 29 t ja kütusekuluks 0,3 l/km. Sellise veose suuruse juures tuleb kokku teha 22 333 reisi pikkusega 20 km. Kütusekulu kokku nendele reisidele on 133 998 l. Transpordist tekkiv CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). CH₄ ja N₂O heited maismaatranspordist leitakse valemitega (2.8) ja (2.9). Emissioonifaktor diiselkütusega sõitvatel raskeveokitel on CH₄ puhul 0,006 g/km (0,0095 g/miil) läbisõidu kohta ja N₂O puhul 0,027 g/km (0,0431 g/miil) läbisõidu kohta. [18] Summeeritud heited CO₂ ekvivalendina leitakse valemiga (2.10). Arvutuste tulemused ja kokkuvõtte lubjakivikillustiku tootmisest ja transpordist tekkivatest KHG heidetest on nähtav tabelis (Tabel 7).

Tabel 7. Kokkuvõtte aastal 2020 toodetud asfaldi tootmiseks vajaliku killustiku tootmise ja transpordi KHG heidetest

Protsess	CO ₂ , t	CH ₄ , t	N ₂ O, t	CO ₂ eq, t	kütus
Killustiku tootmine				1 436,75	varieerub
Killustiku transport	346,32	0,003	0,012	349,57	diisel
Kokku	346,32	0,003	0,012	1 786,31	

2.2.3 CO₂ heited tardsivikillustiku tootmisest ja transpordist Põhjamaadest Eestisse ning sadamast asfalditehastesse

Tardsivikillustiku tootmisel tekkiva CO₂ heite leidmise allikaks võtab autor Norsk Stein AS Tau karjääri keskkonnadeklaratsiooni. Enimlevinud fraktsioonide CO₂ heide tonni toodetud killustiku kohta on 2,64 kg/CO₂eq. [25] Antud tulemust kasutab lõputöö autor kogu asfaldi tootmises kasutatava tardsivikillustiku tootmise CO₂ heite arvutuse puhul. Selle põhjal on aastal 2020 asfaldi tootmises kasutatud 916 304,4 t (Tabel 2) tardsivikillustiku tootmise CO₂ heide $M_{CO_2}=2419,04$ t/CO₂eq.

Hindamaks tardsivikillustiku transpordist tekkivat CO₂ heidet tehakse järgnevad eeldused:

Tardsivikillustikku transporditakse Eestisse Norrast, Soomest ja Rootsist. Kõigist kolmest riigist tuuakse võrdselt 1/3 kogu aastal 2020 asfaldi tootmiseks kasutatavast tardsivikillustikust. Igas riigis transporditakse killustik keskmiselt 50 km kauguselt karjäärist sadamasse poolhaagisega sadulveokitega. Eeldatakse, et Norrast tuuakse killustik Eestisse Stavangeri sadamast, mis teeb meretranspordi distantiks 1721 km. [26] Eeldatakse, et Soomest tuuakse killustik Eestisse Helsingi sadamast, mis teeb meretranspordi distantiks 90 km. Eeldatakse, et Rootsist tuuakse killustik Eestisse Stockholmi sadamast, mis teeb meretranspordi distantiks 442 km [26]. Sihtkohaks Eestis on Tallinna ja selle lähiümbruse kaubasadamad (Bekkeri, Muuga, Paldiski). Kuna asfalditehased asuvad üle Eesti erinevates paikades, siis võetakse arvutustes distantiks sadamast kuni asfalditehaseni 100 km. Meretransport teostatakse puistlastilaevadega. Uuringu põhjal tekitavad väiksemad puistlastilaevad täieliku kandevõimega vahemikus 5000 – 15 000 t keskmiselt 15 g/CO₂ heidet tonn–kilomeetri kohta ning järgneva suurusklassi laevad kandevõimega 15 000 – 35 000 t keskmiselt 8,9 g/CO₂ heidet tonn–kilomeetri kohta. [27] Arvutustes võetakse heiteks kahe väärtuse keskmine 11,95 g/CO₂ heidet tonn–kilomeetri kohta.

Jaotades kokku tarnitud 916 304,4 t tardsivikillustikku kolme päritolumaa vahel ära, siis tarnitakse igast riigist 305 434,8 t killustikku.

Meretranspordist tekkiv CO₂ heide arvutatakse valemiga(2.11):

$$M_{CO_2} = Mg_{CO_2} \times s \times m \times 10^{-6}, \quad (2.11)$$

kus M_{CO_2} – summaarne meretranspordist tekkiv CO₂ heide, tCO₂;

Mg_{CO_2} – CO₂ heide tonn–kilomeetri kohta, g/CO₂/t–km;

s – veomaa, km;

m – veose mass, t.

Selleks, et transportida kogu killustik karjäärist sadamasse poolhaagisega sadulveokitega koorma suurusega 29 t tuleb kokku teha 31 597 reisi. Sarnaselt tuleb sama arv reise teha hiljem transpordil Eesti sadamast asfalditehaseni. Sadulveokiks kasutatakse arvutustes sama Volvo FH seeria veokit nagu eelnevates arvutustes kütusekuluga 0,3 l/km. Maismaatranspordi CO₂ heited, mis tekivad killustiku transpordist karjäärist sadamasse ning hiljem sadamast asfalditehastesse leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). CH₄ ja N₂O heited maismaatranspordist leitakse valemitega (2.8) ja (2.9). Emissioonifaktor diiselkütusega sõitvatel raskeveokitel on CH₄ puhul 0,006 g/km (0,0095 g/miil) läbisõidu kohta ja N₂O puhul 0,027 g/km (0,0431 g/miil). [18] Summeeritud heited CO₂ ekvivalendina leitakse valemiga (2.10). Arvutuste tulemused ja kokkuvõtte tarkivikillustiku tootmisest ja transpordist on nähtav tabelis (Tabel 8).

Tabel 8. Aastal 2020 asfaldi tootmises kasutatud 916 304,4 t tarkivikillustiku tootmise ja transpordi KHG heited

Protsess	Päritolumaa	CO ₂ , t	CH ₄ , t	N ₂ O, t	CO ₂ eq, t	kütus
Killustiku tootmine	Kõik				2 419,04	diisel
Maismaatransport sadamasse	Kõik	2 449,90	0,02	0,08	2 472,85	diisel
Meretransport	Norra	6 281,56			6 281,56	diisel
Meretransport	Rootsi	1 613,28			1 613,28	diisel
Meretransport	Soome	328,50			328,50	diisel
Maismaatransport tehasesse	Kõik	4 899,80	0,04	0,17	4 945,69	diisel
Kokku		15 573,02	0,06	0,25	18 060,91	

2.2.4 CO₂ heited riigisisest liiva tootmisest ja transpordist asfalditehaseni

Eestis kasutatakse teedeehituses kohalikku liiva. Peamiselt toimub liiva kaevandamine ekskavaatoriga. Suuremad liivakarjäärid kasutavad abiks ka buldoosereid. Samuti toimub allveekaevandamine pumpade abil.

Aastal 2020 toodetud asfaltsegudes võidi autori hinnangul liiva kasutada 64 921,4 t (Tabel 2). Leidmaks selle koguse kaevandatud liiva CO₂ heidet asfalditehasesse jõudes luuakse eeldus, et toodetud liivast 50% kaevandati maa pealt tehnikakomplektiga ekskavaator ja buldooser. Ülejäänud 50% liivast kaevandati vee alt kasutades selleks diiselmootoriga pumpa ja abimasinateks ekskavaatorit ja buldooseri.

Pinnasepump, mida liiva kaevandamiseks kasutatakse on tootlikkusega 48 000 t kuivaks nõrgunud liiva kuus. Pump tarbib sellise tootlikkuse juures 7500 l diiselkütust. [28] Kuna luuakse eeldus, et 50% liivast kaevandatakse pumbates, siis kokku pumbatakse 32 460,7 t liiva. Pinnasepumba kütuse tarbimine selle toodangu juures on 5072 l. Sellest tekkiv CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). Lisaks pumbale töötab karjääris abiks veel ekskavaator ja buldooser. IPCC 2006 raportis on suurte üle 600 hobujõuga mootorite puhul CH₄ emissioonifaktor 4 kg/TJ ja N₂O puhul andmed puuduvad. Autor kohandab siinjuures N₂O emissioonifaktoriks teiste diiselseadmete puhul kasutatud 0,6 kg/TJ. [29]

Arvutustes võetakse aluseks Caterpillari 320D2 ekskavaator töökaaluga > 21 t. Antud ekskavaatori kütusekulu on kõrge töökoormuse all 18,6 – 26,5 l/h. [30] Arvutustes võetakse ekskavaatori kütusekuluks 20 l/h. Kuna ekskavaator abistab nii pumpamise, kui veokite laadimise juures, siis arvestatakse, et 32 460,7 t liiva kaevandamise juures töötab ekskavaator 160 tundi. Selle töö jooksul kulub ekskavaatoril 3200 l diiselkütust. Ekskavaatori poolt tekitatud CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). Ekskavaatori poolt tekitatavad CH₄ ja N₂O heited leitakse valemitega (2.6) ja (2.7). Emissioonifaktor diiselkütusel töötavatel ehitusmasinatel on CH₄ puhul 0,053 g/l (0,2 g/gal) kütusekulu kohta ja N₂O puhul 0,124 g/l (0,47 g/gal) kütusekulu kohta. [18]

Buldooser töötab 32 460,7 t liiva pumpamise juures abiks 40 tundi. Aluseks võetakse Caterpillari D6N buldooser töökaaluga > 17 t. Antud buldooser tarbib kõrge töökoormuse all 20 – 26,4 l kütust tunnis. [30] Arvutustes võetakse buldooseri kütusekuluks 22 l/h. 40 töötunni juures tarbib buldooser 880 l kütust. Buldooseri poolt tekitatud CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). Buldooseri poolt tekitatavad CH₄ ja N₂O heited leitakse valemitega (2.6) ja (2.7).

Karjääri puhul kus toimub maapealne kaevandamine komplektiga ekskavaator ja buldooser eeldatakse mõlema masina puhul, et tööd tehakse kuus 200 tundi. Ekskavaator jõuab selle aja sees ka klientide veokitele liiva laadida. Eeldatakse, et kogus 32 460,7 t liiva kaevandatakse täpselt kuu pikkuse perioodi jooksul. Masinad, millel arvutused põhinevad võetakse samad, mis teist tüüpi karjääri puhul. Ekskavaator kulutab 200 töötunni juures 4000 l kütust. Buldooser kulutab 200 töötunni juures 4400 l kütust. Mõlema masina poolt tekitatud CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). Mõlema masina poolt tekitatavad CH₄ ja N₂O heited leitakse valemitega (2.6) ja (2.7).

Keskmiseks vahemaaks liivakarjäärast asfalditehaseni võtab autor 50 km. Volvo FH seeria sadulveoki keskmine kütusekulu on 0,3 l/km. Koorma suurus 29 t.

CO₂ heide liiva transpordist leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). CH₄ ja N₂O heited maismaatranspordist leitakse valemitega (2.8) ja (2.9). Emissioonifaktor diiselkütusega sõitvatel raskeveokitel on CH₄ puhul 0,006 g/km (0,0095 g/miil) läbisõidu kohta ja N₂O puhul 0,027 g/km (0,0431 g/miil) läbisõidu kohta. [18] Summeeritud heited CO₂ ekvivalendina leitakse valemiga (2.10). Arvutuste tulemused ja kokkuvõtte liiva tootmisest ja transpordist on nähtav tabelis (Tabel 9).

Tabel 9. Aastal 2020 asfaldi tootmises kasutatava liiva kaevandamisest ja transpordist tekkinud KHG heide kokku

Protsess	CO ₂ , t	CH ₄ , t	N ₂ O, t	CO ₂ eq, t	kütus
Veealune kaevandamine	23,65	0,0009	0,0006	23,84	diisel
Maapealne kaevandamine	21,71	0,0004	0,0010	22,00	diisel
Maismaatransport tehasesse	173,60	0,0013	0,0060	175,23	diisel
Kokku	218,97	0,0027	0,0077	221,07	

2.2.5 CO₂ heited bituumeni tootmisest ja transpordist asfalditehaseni

Euroopa bituumenitootjate liit Eurobitume on bituumenitootjaid ühendav organisatsioon aastast 1969. Liit väärtustab ökonoomset ja turvalist ning jätkusuutlikku tootmist. Seetõttu on nad juba aastast 1999 hinnanud bituumeni elutsükli ja selle poolt tekitatavaid keskkonnamõjusid. Aastal 2020 valmis bituumeni elutsükli hinnangu versioon 3.1. Seal sisalduv info põhineb keskmistel väärtustel ja on pärit allikatest, mis on Eurobitume hinnangul kõige usaldusväärsemad ja need esindavad bituumeni tootmist ükskõik millises Euroopa rafineerimistehases. [31]

Eestisse tarnitakse peamiselt Orlen ja Nynase bituumenit. Orleni rafineerimistehas asub Leedus Mažeikiais. Nynast transporditakse Eestisse Rootsi Nynäshamni rafineerimistehasest. Arvutustes eeldatakse, et 50% bituumenist Eestisse pärineb Rootsist Nynäshamnist ja 50% Leedust Mažeikiaist.

Võttes aluseks Eurobitume aruande, siis arvesse võttes erinevaid toornafta päritoluriike on keskmine CO₂ heide 208 kg/CO₂eq tonni bituumeni kohta. Aruande kohaselt võib seda arvu esitleda, kui ükskõik millise Euroopa rafineerimistehase väravas valminud bituumeni CO₂eq heide kogust. Antud number võtab arvesse ka nafta puurimisega seotud infrastruktuurrajatiste rajamist ja kütuste tarbimist. [31] Tasub ära märkida, et Eurobitume leitud CO₂ heide väärtus on märkimisväärselt madalam, kui näiteks ühes

2018 teostatud uuringus, kus jõuti numbrini 720 kg/CO₂eq tonni bituumeni kohta. [32] Erinevusitulemustes mõjutab toornafta kaevandamisel tekkivate heidete arvestus ning rafineeritud naftasaadustele heidete jaotamise meetoodika. [31]

Lõputöö arvutustes kasutatakse Eurobitume aruande tulemust 208 kg/CO₂eq tonni bituumeni kohta. Seega 86 277 t (Tabel 2) bituumeni tootmisest kuni rafineerimistehasest väljumiseni aastal 2020 tekkis CO₂ heidet $M_{CO_2}=17\,945,6$ tCO₂eq.

Transport Leedust toimub ainult tsisternhaagisega sadulveokitega. Tsisterni maksimaalseks mahutavuseks võib eeldada 30 m³. Arvestades, et temperatuurist sõltuvalt muutub bituumeni maht, siis mahukasvuga arvestades loetakse arvutustes maksimaalseks veose kaaluks 28 t. Sadulveokiks võetakse eelnevates arvutustes kasutusel olev Volvo FH seeria kütusekuluga 0,3 l/km. Mažeikiaist transporditav bituumeni kogus kokku on 43 138,5 t, seega kokku on vaja teha 1541 reisi. Veomaaks võetakse arvutustes distants Paide linnast Orleni Mažeikiai rafineerimistehaseni, mis on kokku 456 km. Maismaatranspordist tekkiv CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). CH₄ ja N₂O heited maismaatranspordist leitakse valemitega (2.8) ja (2.9). Emissioonifaktor diiselkütusega sõitvatel raskeveokitel on CH₄ puhul 0,006 g/km (0,0095 g/miil) läbisõidu kohta ja N₂O puhul 0,027 g/km (0,0431 g/miil) läbisõidu kohta. [18]

Nynäshamni juures asuvast Stockholmi sadamast toimub bituumeni vedu mööda merd. Mereteekonna pikkus Tallinna sadamasse on 464 km [26]. Eeldatakse, et vedu teostatakse väikeste tankeritega kandevõimega kuni 10 000 t, mille CO₂ heide keskmiselt on 29,1 g/CO₂ tonn-kilomeetri kohta või suuremate tankeritega, kandevõimega vahemikus 10 000 – 60 000 t, mille CO₂ heide keskmiselt on 10,4 g/CO₂ tonn-kilomeetri kohta. [27] Arvutustes kasutatakse kahe näitaja keskmist tulemust 19,75 g/CO₂ tonn-kilomeetri kohta. Nynäshamnist transporditav bituumeni kogus kokku on 43 138,5 t. Meretranspordist tekkiv CO₂ heide arvutatakse valemiga (2.11).

Edasi sadamast tuleb bituumen mööda maismaad asfalditehastesse transportida. Keskmiseks veomaaks arvestatakse arvutustes 100 km ja eeldatakse, et bituumeniveok naaseb tagasi tühjalt Tallinnasse. Sadulveokiks võetakse eelnevates arvutustes kasutusel olev Volvo FH seeria kütusekuluga 0,3 l/km. Transporditav bituumeni kogus kokku on 43 138,5 t, seega kokku on vaja teha 1541 reisi. Maismaatranspordist tekkiv CO₂ heide leitakse valemitega (2.1), (2.2) ja (2.3). CH₄ ja N₂O heited maismaatranspordist leitakse valemitega (2.8) ja (2.9). Summeeritud heited CO₂ ekvivalendina leitakse valemiga (2.10).

Aastal 2020 asfaldi tootmises kasutatud bituumeni tootmisest ja transpordist tekkivad heited on nähtavad tabelis (Tabel 10).

Tabel 10. Aastal 2020 asfaldi tootmises kasutatud bituumeni tootmisest ja transpordist tekkinud KHG heited

Protsess	CO ₂ , t	CH ₄ , t	N ₂ O, t	CO ₂ eq, t	kütus
Bituumeni tootmine				17 945,62	varieerub
Maismaatransport Mažeikiaist	1 089,68	0,008	0,038	1 099,89	diisel
Meretransport Nynäshamnist				395,32	diisel
Maismaatransport tehasesse	238,97	0,002	0,008	241,20	diisel
Kokku	1 328,65	0,010	0,046	19 682,03	

2.2.6 Kokkuvõtte aastal 2020 Eestis toodetud asfaltsegu tootmisprotsessiga kaasnevatest kasvuhoonegaaside emissioonidest

Aastal 2020 toodeti Eestis 1 715 151 t asfaltsegu. Enamus Eesti asfalditehaseid kasutas primaarkütusena põlevkiviõli. Ülejäänud tehased kasutasid primaarkütusena maagaasi. Lõputöös teostatud arvutuste põhjal tekitab maagaas põlemisel vähem kasvuhoonegaaside heiteid, kui põlevkiviõli. Lõputöös teostati arvutused CO₂ ekvivalentsetele heidetele alates asfaldis kasutatavate toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimishetkeni asfalditehases. Kokku tekkis selles protsessis aastal 2020 hinnanguliselt 80 936,1 t/CO₂eq heidet. Asfalditehastes kohapeal tekkis sellest 41 185,8 tonni CO₂eq heidet. Kui keskmine sõiduauto, mis läbib aastas umbes 18 500 km, toodab umbes 4,6 tCO₂ [33], siis asfalditehastes kohapeal tekkiv CO₂ heide on võrdne 8 953 sõiduauto poolt aastas tekitatava heitega. Seega 10% suurune vähenemine asfalditehaste CO₂ heidetes oleks võrdväärne umbes 900 sõiduauto liiklusest eemaldamisega. Kokkuvõtvad andmed aastal 2020 asfaldi tootmisega kaasnevatest CO₂eq heidetest alates toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimiseni tehases on nähtavad tabelis (Tabel 11).

Tabel 11. Koondtabel aastal 2020 asfaldi tootmisega kaasnevatest kasvuhoonegaaside emissioonidest

Protsess		kogus, t	CO ₂ eq, t	kütus
Asfalditehas	Asfaltsegu tootmine tehases	551 970	8 658,8	maagaas
	Asfaltsegu tootmine tehases	1 163 181	26 199,6	põlevkiviõli
	Täitematerjalide liigutamine tehases frontaallaaduriga	1 715 151	898,4	diisel
	Abiseadmed põlevkiviõlil töötavas tehases (bituumeni katel, generaator)	1 163 181	5 429,1	diisel
Lubjakivikillustik	Killustiku tootmine	647 648,2	1 436,7	varieerub
	Killustiku transport tehasesse		349,6	diisel
Tardkivikillustik	Killustiku tootmine	916 304,4	2 419,0	varieerub
	Maismaatransport sadamasse		2 456,8	diisel
	Meretransport (Norrast, Rootsist, Soomest)		8 223,3	diisel
	Maismaatransport tehasesse		4 913,6	diisel
Liiv	Veealune kaevandamine	64 921,4	23,8	diisel
	Maapealne kaevandamine		22,0	diisel
	Maismaatransport tehasesse		175,2	diisel
Bituumen	Bituumeni tootmine	86 277	17 945,6	varieerub
	Maismaatransport Mažeikiaist		1 099,9	diisel
	Meretransport Nynäshamnist		395,3	diisel
	Maismaatransport sadamast		241,2	diisel
Aastal 2020 Eestis toodetud asfaltsegu CO₂ ekvivalentssed emissioonid kokku (tooraine tootmisest segu valmimiseni)		1 715 151	80 936,1	varieerub
CO₂ ekvivalentssed emissioonid ainult asfalditehase tootmisprotsessist ühe toodetud tonni kohta			0,024	varieerub
CO₂ ekvivalentssed emissioonid koos toorainete tootmise ja transpordiga ühe toodetud tonni kohta			0,047	varieerub

3 CO₂ EMISSIOONIDE VÄHENDAMISE MEETMED

Kuum asfaltsegu ehk HMA toodetakse tehastes kõrgetel temperatuuridel. Enim kasutatava bituumeni penetratsiooniga 70/100 puhul peab segamistemperatuur olema vahemikus 140 – 180°C. [34] Objektile jõudes ei tohi tavalise teebituumeniga segu olla laoturi punkris üle 10°C madalam minimaalsest segamistemperatuurist ehk 70/100 bituumeni puhul minimaalselt 130°C [35]. Seetõttu segatakse kuum segu pigem kõrgema lubatud temperatuuri juures, et vältida liigset jahtumist paigalduse hetkeks. Seejuures ei tohi segu olla üle kuumutatud, mis muudaks selle füüsikalisi omadusi halvemaks. Saavutamaks õigeid segamistemperatuure on vajalik kuivatada ja kuumutada täitematerjal ning samuti kuumutatakse bituumen vajaliku temperatuurini. Tootmisprotsessis kuumutatakse ja kuivatatakse täitematerjalid üldjuhul trummelpõletis. Bituumenimahutit köetakse näiteks gaasi- või vedelkütuse katlaga või elektriga. Kütmiseks kasutatavate kütuste põletamisel tekivad CO₂ emissioonid. Asfalditehase tootmisprotsessis CO₂ emissioonide vähendamiseks on vajalik küttevajaduse vähendamine. Üheks levinud meetmeks energiatarbimise vähendamiseks ja tootmistemperatuuride alla toomiseks on WMA tehnoloogiad. Neid tehnoloogiaid uuritakse lõputöös lähemalt.

Asfalditehase energiakulu vähendamise juures tasub ära märkida ka asfalditehase korrektne hooldamine ning vananenud komponentide õigeaegne väljavahetamine. On selge, et eksploatatsiooni käigus kuluvad põletid ja väheneb nende efektiivsus. Samuti ummistuvad erinevad pihustid ja torustikud ning punkrid. Samuti vananevad bituumeni mahuti küttekehad ja bituumenimahutite soojusisolatsioon võib olla puudulik. Kõik need tegurid suurendavad asfalditehase energiatarbimist. Seetõttu on vajalik pidev seadmete hooldamine ja uuendamine ning bituumenimahutite korralik soojusisolatsioon. Kõik see toob energiatarbimist alla.

Lisaks energiatarbimise vähendamisele asfalditehases on CO₂ heite vähendamiseks võimalik üle vaadata ka asfaldi tootmiseks kasutatavad toorained ja kütused. Kui vaadata kogu tootmisprotsessi alates toorainete tootmisest kuni asfalditehases segu valmissegamiseni, siis üheks suureks saasteallikaks on bituumen. Selle kasutamise vähendamine vähendaks ka asfaldi tootmise CO₂ jalajälge. Bituumenile asendust veel leitud pole, kuid selle koostise muutmist on uuritud. Üheks keskkonda säästvaks meetmeks võiks olla plastjätmete osaline kasutus bituumenis. Teine uudne lahendus on bituumeni hulka taimse päritoluga ligniini lisamine. Mõlema variandi kohta on

teostatud edukaid katsetusi ja uuringuid, kuid vajaksid täiendavaid uurimistöid Eestis rakendamiseks.

Asfaldist katendikihtide ehitamise juhises on välja toodud, et kliimaneutraalsuse ja CO₂ jalajälje vähendamiseks tuleb kasutusele võtta taaskasutatavaid materjale, kui need ei põhjusta lõpptoote eluea lühenemist. Taaskasutatavate lähtematerjalide all mõeldakse taaskasutatavaid täitematerjale ja sideaineid, mida on tõenäoliselt võimalik kasutada asfaltsegude tootmisel tavapärase täitematerjali või sideaine osalise asendusena. [36]

Kindlasti on üheks keskkonda säästvaks meetodiks taaskasutus. Eestis on võimalik asfaltsegude koostises kasutada ringlussevõetud asfaldi (RA) ehk ülesfreesitud asfaldi. Asfaldist katendikihtide ehitamise juhises lubab asfaldi osakaalust maksimaalselt 30% ulatuses RA kasutamist. RA kasutamine on keelatud kulumiskihtide asfaltsegudes (SMA, AC Surf tüüpi segud). [36] Autori hinnangul tehakse seda praegusel hetkel asfaltsegudes minimaalselt. Pigem kasutatakse RA stabiliseeritud katendikihtides. Igasugune vana asfaldi taaskasutus vähendab uute täitematerjalide kasutamist, mille läbi väheneb ka CO₂ heide. RA kasutamine on võimalik ka WMA tehnoloogiate puhul.

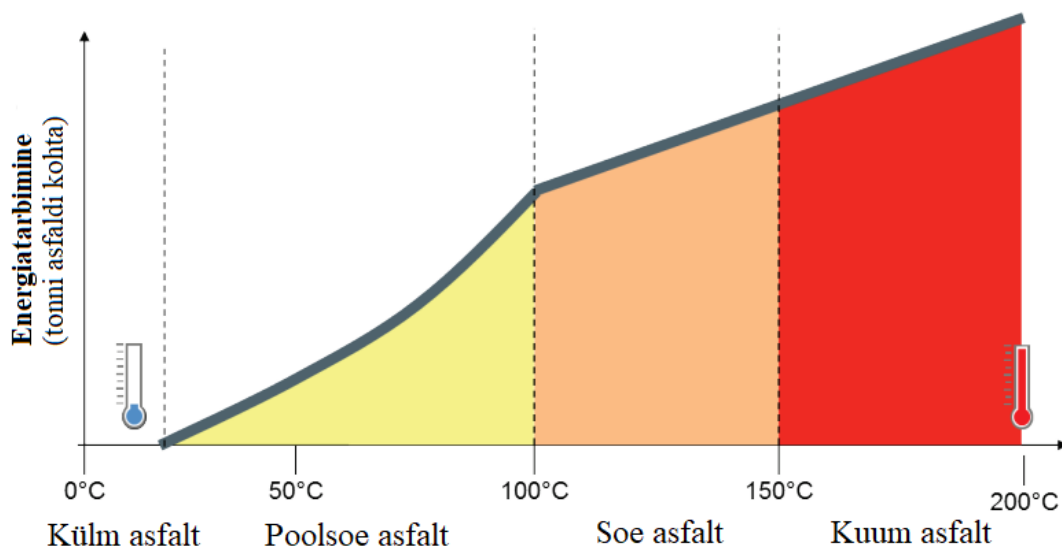
Eestis asfalditehaste käitamiseks kasutatavate fossiilsete kütuste hulgast on väikseima CO₂ jalajäljega maagaas. Elektrit toodab Eesti peamiselt põlevkivist, seega elektri kasutamisel asfalditehase käitamiseks toimuks CO₂ teke lihtsalt elektrijaamas, mitte asfalditehases. Samas on võimalik asfalditehase kütusena edukalt kasutada biokütuseid. Kuna taimse päritoluga biomass on oma elutsükli jooksul süsinikdioksiidi sidunud, mitte tootnud, siis võib biokütus olla kliimaneutraalne. Keskkonnaministri poolt välja antud määruse „Välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid“ lisa 3 juures on öeldud, et biokütuste põlemisel tekkiv CO₂ loetakse nulliks. [15] Seega on biokütuste kasutamine kindlasti CO₂ heidet vähendav meede. Skandinaavias juba eksisteerib biokütustel töötavaid asfalditehaseid. Eestis võiks üheks potentsiaalseks kasutatavaks biokütuseks olla puitpelletid, mida siin laialdaselt toodetakse. Samuti väheneb kohaliku kütuse kasutamisel selle kohale transportimiseks vajalik veomaa ning seeläbi väheneb transpordist tekkiv CO₂ heide.

Bituumeni ja täitematerjalide asendusmeetmeid ning biokütuste kasutamist asfalditehastes antud lõputöös süvitsi ei analüüsita.

3.1 Warm mix asfalt ehk soe asfalt

Eestis toodetakse praegusel hetkel peamiselt ainult kuuma asfalti, mis segatakse enimkasutatava sideaine margi 70/100 puhul temperatuurivahemikes 140 – 180°C (EVS 901–3:2021). Üheks alternatiiviks on warm mix asfaldi (WMA) ehk sooja asfaldi tootmine, mille segamistemperatuurid on madalamad. Madalamad segamistemperatuurid võimaldavad kulutada vähem energiat kuumutamisele ja seeläbi eritatakse keskkonda ka vähem CO₂ emissioone. Sooja asfaldi segamistemperatuuriks võib jämedalt lugeda vahemikke 100 – 150°C. Madalamate segamistemperatuuride saavutamiseks kasutatakse erinevaid lisandeid või meetmeid bituumeni omaduste muutmiseks. Sealjuures peavad asfaltsegu omadused vastama kõigile kehtestatud nõuetele. Samas ei saa ära unustada, et bituumen vajab voolavuse säilitamiseks kõrgeid temperatuure ning samuti täitematerjali kiireks kuivatamiseks on vaja üle 100°C temperatuuri. Tasub ära märkida, et hetkel kehtiv määrus „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ lubab ka praegu lisandite kasutamisel madalamatel temperatuuridel asfaldi tootmist Eestis. [37]

Euroopa asfaldiliit klassifitseerib sooja asfaldi tootmistemperatuuride vahemikeks 100 – 150°C. Alla selle on tegu poolsoojade- ning külmade asfaltsegedega ning kõrgemate temperatuuride juures kuumade asfaltsegedega (Joonis 4).



Joonis 4. Euroopa asfaldiliidu tootmistemperatuuride klassifikatsioon [38]

Külmad asfaltsegud on reeglina kasutatavad väiksemate paranduste või ajutiste lahenduste jaoks ning ei oma kuumale asfaldile sarnaseid tugevusomadusi ning vastupidavust.

Poolsoojad asfaltsegud on vähemlevinud ning vähem uurimist leidnud. Samas on leitud, et õnnestumise korral võib poolsoe asfalt omada kuuma asfaldiga ligilähedasi omadusi. Poolsoe asfalt toodetakse üles soojendatud täitematerjalist (üle 100°C) ja see segatakse sooja ~80°C temperatuuriga bituumenemulsiooni või vahtbituumeniga. Samuti on võimalik keemiliste lisanditega bituumeni omaduste muutmise, et tuua tootmistemperatuur alla 100°C. [39] Esimene samm kuumast asfaldist keskkonna säästmise suunas on kasutusele võtta WMA. Poolsoojade asfaltsegude uurimine oleks järgmine samm peale WMA tehnoloogiate kasutuselevõttu.

Sooja asfaldi tootmine toimub üle 100°C temperatuuride juures, seega veesisaldus segus on minimaalne. Bituumeni viskoossuse vähendamiseks või nakkeomaduste parandamiseks ja täitematerjalide paremaks katmiseks madalamatel temperatuuridel kasutatakse erinevaid tehnoloogiaid. Enimlevinud tehnoloogiad on orgaaniliste- või keemiliste lisandite lisamine bituumenisse või segusse. Veel on levinud tehnoloogiaks bituumeni vahustamine vee abil, mis võimaldab samuti madalamal temperatuuril segamist ja täitematerjali bituumeniga katmist. [38]

Euroopa Asfaldiliidu poolt jagatavas aruandes „Asfalt numbrites“ on nähtav esimene info WMA kohta aastast 2013. Suures plaanis pole Euroopa WMA kogutoodang aastate jooksul kasvanud (Tabel 12). Kohati võib põhjuseks olla ka andmete puudumine. [40]

Tabel 12. Asfaldi kogutoodang ja sooja asfaldi kogutoodang Euroopas aastatel 2013 – 2020 [40]

Aasta	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Asfaldi kogutoodang (miljonit tonni)	277,3	263,7	280,9	282,5	296,7	297,9	279,7	276,9
Sooja asfaldi kogutoodang (miljonit tonni)	6,616	7,33	6,788	6,207	7,23	7,099	8,961	6,141
Sooja asfaldi osakaal kogutoodangust (%)	2,39	2,78	2,42	2,20	2,44	2,38	3,20	2,22

Samas võib välja tuua riigid nagu Prantsusmaa, Norra ja Hispaania, kelle sooja asfaldi tootmise maht on enamjaolt kasvutrendis. Suurimaks Euroopa WMA tehnoloogiate kasutajaks ongi Prantsusmaa, kes näiteks aastal 2020 tootis 4 058 000 t sooja asfaltsegu. [40] Suurimaks sooja asfaldi tootjaks maailmas on USA (Tabel 13). Nende sooja asfaldi tootmine on alates 2009 aastast pidevas kasvutrendis. Aastal 2020 toodeti 169 miljonit tonni sooja asfaltsegu. USA asfaldi kogutoodang aastal 2020 oli 370 miljonit tonni. See tähendab, et aastal 2020 oli USA kogu asfaldi toodangust 45,7% soe asfalt. [40]

Tabel 13. Asfaldi kogutoodangud ja sooja asfaldi kogutoodangud aastate lõikes Ameerika Ühendriikides [40]

Aasta	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Asfaldi kogutoodang (miljonit tonni)	325	326	332	326,9	318,1	319	331	340	344	353	382	370
Sooja asfaldi toodang (miljonit tonni)	15,2	37,3	62,3	77,1	69	103	109	106	133	143	150	169
Sooja asfaldi osakaal kogutoodangust (%)	4,7	11,4	18,8	23,6	21,7	32,3	32,9	31,2	38,7	40,5	39,3	45,7

Erinevate WMA tehnoloogiate kasutuselevõtt võib tähendada ka investeeringuid uutesse seadmetesse. Võimalikud investeeringute suurused on nähtavad tabelis (Tabel 14).

Tabel 14. Hinnang võimalike investeeringute suurusele ja asfaltsegu tonni maksumuse kasvule erinevate WMA tehnoloogiate puhul [41]

Tehnoloogia	Vahtbituumen (vesi)	Vahtbituumen (tseoliit)	Orgaaniline lisand	Keemiline lisand
Ümberehitus	24000 – 56000 €	0 – 32000 €	0 – 32000 €	Väga väikesed
Litsentsitasu	Jah	Ei	Ei	Ei
Hinnatõus	0,24 €/t	2,88 €/t	1,04 – 2,08 €/t	2,8 – 3,2 €/t

3.1.1 Madalama tootmis- ja laotamistemperatuuri eelised

WMA tehnoloogiate esimeseks suureks eeliseks on tootmise käigus eralduvate kasvuhoonegaaside ja õhusaaste vähenemine. Euroopas teostatud uuringute põhjal on WMA tehnoloogiate kasutamisel võimalik teatud emissioone vähendada kuni 70% (Tabel 15).

Tabel 15. Eeldatav emissioonide vähenemine sooja asfaldi tootmise korral [42]

Õhku saastav gaas	Vähene mine võrreldes kuuma asfaldi tootmisega
CO ₂	15 – 40%
SO ₂	18 – 35%
NO _x	18 – 70%
CO	10 – 30%
tolm	25 – 55%

Tasub välja tuua, et lisaks kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamisele on tootmis- ning eriti laotamistemperatuuride vähendamisel ka positiivne mõju kahjulike asfaldiaurude ning lõhnade eritamise vähenemisele. See on eriti tähtis asfaldibrigaadi töölistele. On leitud, et asfaldiaurud sisaldavad kantserogeenseid, mutageenseid ja teratogeenseid ühendeid. Aurude vähenemine madalamate paigaldustemperatuuride juures on silmnähtav (Joonis 5). [42]



Joonis 5. Asfaldi paigaldusel eralduvad aurud WMA korral (vasak) ning HMA korral (parem) [43] Eriti ohtlikud on aurud asfalteerides suletud ruumides (hooned, tunnelid). Varasemate uuringute käigus on leitud reeglipära, et asfaldiaurude hulk väheneb 50% võrra iga 12°C suuruse temperatuuri languse korral. [38] See vähendab keskkonnareostust veelgi ning parandab asfalteerimistöötajate elukvaliteeti ja tervist. Tootmisprotsessis eraldub fossiilsete kütuse põletamisel lisaks kasvuhoonegaasidele ka erinevaid õhusaaste ühendeid, mis mõjuvad negatiivselt õhukvaliteedile. Näiteks vingugaas (CO), vääveldioksiid (SO₂) ja lämmastikuühendid (NO_x). Kütuse kasutuse vähendamine vähendab kõiki neid õhusaaste heiteid ja seeläbi parandab õhukvaliteeti. Vähenenud asfaldiaurud võivad muuta asfalteerimistööd elanikele linna keskkonnas vastuvõetavamaks. Võimalik on inimeste suhtumise paranemine asfalteerimistöösse. Samuti võimaldab vähenenud õhusaaste rajada asfalditehaseid asustatud paikadele lähemale. [44]

Energiakulu vähenemise tõttu on võimalik ka majanduslik võit. Eriti aktuaalne on kütusevajaduse vähendamine tänapäeva hinnataseme ebakindluse juures. Teoreetiline majanduslik võit võib tuleneda ka vähenenud katte tihendamisevajadusest ning katte eluea pikenedamisest. Samuti on tänu madalama energiakasutuse ja seeläbi seadmete väiksema koormamise võimalik vähesem asfalditehase kulumine. [44]

Samuti on sooja asfaldi võimalik toota kasutades selle sees RA-i, mis tõstab keskkonnasäästlikkust veelgi ja võib odavdada ka segu hinda. Kuna WMA tehnoloogiad valdavalt vähendavad bituumeni viskoossust segamise hetkel, siis peaks võimalik olema suuremas koguses RA kasutamine, kui kuuma asfaltsegu tootmise korral. [44] Tänu madalamal temperatuuril segu töödeldavusele ja tihendatavusele võib laotamine ja tihendamine brigadile lihtsam ning vähem aeganõudev olla.

Alternatiivina võib sooja asfaldi tehnoloogiaid kasutada ka kõrgematel kuuma asfaldi segamistemperatuuridel ning seeläbi pikendada segu transpordi- ja tihendamisaega. Lisaks võimaldab WMA paigaldusi külmematel perioodidel või öistel aegadel. See võib pikendada paigaldushooaja pikkust. [44] Talviste asfalteerimistööde puhul on keemiliste WMA lisandite kasutamine juba tavapraktika Eesti ehitusturul. Madalama paigaldustemperatuuri tõttu on segul vaja peale laotamist vähem jahtuda, et saavutada ümbritseva keskkonnaga sama temperatuur. See võib tähendada, et asfaltkatte saab kiiremini liiklusele kasutamiseks avada. Samas ei tohi unustada, et lisandite tõttu võib kividemine vajada veel madalamaid temperatuure, kui kuuma asfaldi puhul. [38] [42] Madalam tootmistemperatuur tähendab vähenenud kütusekulu tootmisel, sest kulub vähem energiat kuumutamisele. See vähendab ka rahalist kulu kütusele. Teoreetiliselt võib väheneva kuumutamisevajaduse tõttu tootmine kiireneeda. [43]

3.1.2 Madalama tootmistemperatuuri probleemid erinevate meetmete puhul

Uute tootmistehnoloogiatega kaasnevad ka uued probleemid, mis vajavad tähelepanu ja lahendamist. Temperatuuri alandamine tekitab ohu jääkniiskusele täitematerjalis, mis võib muuta segu omadusi. Kui vesi täielikult segust ei aurustu võivad hiljem tekkida katte roopakindluse ja nakkuvusega probleemid. Eriti suur on oht vahustamistehnoloogiate puhul. Probleemi aitab vähendada keemiliste lisandite kasutamine. [44] Kui tootmistemperatuur on liiga madal võib segu töödeldavus ja töödeldavusaeg väheneda. Samuti vajab RA lisamine piisavat temperatuuri, et vana bituumen saaks üles sulada. [43]

Madalamad tootmistemperatuurid võivad tekitada tehastes uusi probleeme. Näiteks võivad vahtbituumeni tootmiseks vajalikud veepihustid ummistuda. Lisaks võib tekkida probleeme põletitega, mis ei pruugi madalama võimsuse juures korrektselt töötada ja võivad modifitseerimist vajada. [43] Madalamatel tootmistemperatuuridel segu tootmiseks on vaja teha lisainvesteeringuid tootja poolt. Samuti tähendab uue tehnoloogia kasutuselevõtt kulutusi proovisegude valmistamiseks, et seguretsept ning materjalide doseerimine paika saada. Madalamad temperatuurid võivad tekitada niiskust tehase filtrites ning seeläbi neid kahjustada. [43]

3.1.3 Sooja asfaldi tootmine orgaaniliste lisandite abil

Üheks sooja asfaldi tootmise meetodiks on asfaltsegule või bituumenile orgaaniliste lisandite lisamine. Tavaliselt on tegu vahade või rasvhappe amiididega. Orgaaniliste lisandite puhul on tähtis, et lisandi sulamistemperatuur oleks kõrgem, kui segu maksimaalne eksploatatsioonitemperatuur. Sellega välditakse deformatsioonide teket

kasutusajal. Üheks levinult kasutatavaks lisandiks on näiteks spetsiaalne parafiinvaha, mida toodetakse maagaasist. Orgaanilised lisandid tavaliselt toovad tootmis- ja segamistemperatuure alla 20 – 40°C võrra. Üheks levinud orgaaniliseks lisandiks on Sasobit vaha (Joonis 6). [38]



Joonis 6. Sasobit Fischer-Tropsch tüüpi vaha [45]

Asfaldi tootmisprotsessis, kui orgaanilised lisandid on kõrgemal temperatuuril, kui nende sulamistemperatuur, toimivad nad bituumeni viskoossust vähendavana. Peale laotamist, kui segu temperatuur langeb alla orgaanilise lisandi sulamistemperatuuri, lisand kristalliseerub ja loob võrestruktuuri mikroskoopiliste osakestena, mis võivad suurendada bituumeni jäikust ja seeläbi parandada asfaldi deformatsioonikindlust. [42]

3.1.4 Sooja asfaldi tootmine keemiliste lisandite abil

Üheks mugavamaks sooja asfaldi tootmise meetodiks Eestis võiks olla sooja asfaldi tootmine keemiliste lisandite abil. Seda seetõttu, et Eestis juba praegu kasutatakse külmal perioodil naket ja töödeldavust parandavaid lisandeid. Näiteks kasutatakse Eestis talveperioodil lisandit Rediset LQ-1200 (Joonis 7), mis on tootja poolt kirjeldatud WMA lisandina. Kuna selliste keemiliste lisandite kasutamise valmidus on eelduslikult Eesti asfalditehastel olemas, siis on tehastel sel meetodil sooja asfaldi tootmiseks valmidus koheselt olemas.



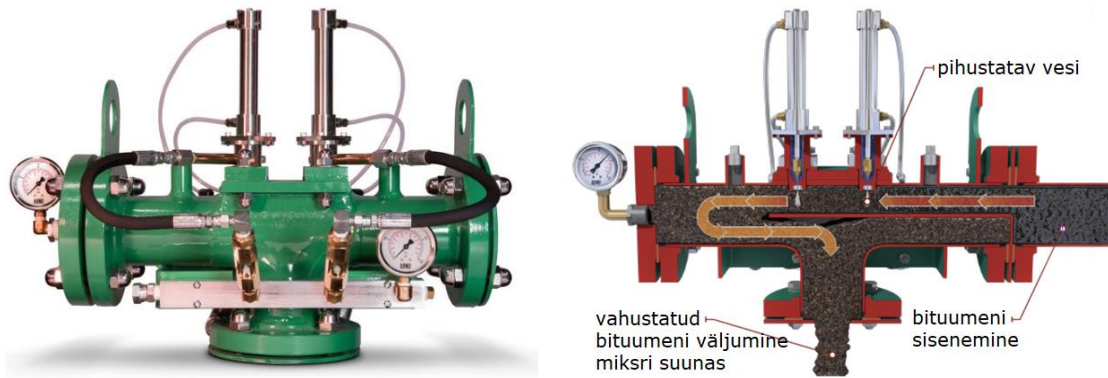
Joonis 7. Rediset LQ keemiline WMA lisand [45]

Keemilised lisandid ei muuda bituumeni viskoossust. Keemilised lisandid toimivad pindaktiivsete ainetena, mis töötavad täitematerjali ja bituumeni mikropinnal, vähendades hõõrdejõude madalamate temperatuuride juures. Sedasi luuakse täitematerjali parem kattuvus bituumeniga. [38] Samuti parandavad keemilised lisandid segu töödeldavust ja tihendatavust ning parandavad naket. Keemilised lisandid segatakse bituumenisse enne kui see doseeritakse tehase mikserisse. [42]

3.1.5 Sooja asfaldi tootmine vahustatud bituumeni abil

Üheks sooja asfaldi tootmismeetodiks on vahustatud bituumeni meetod. Meetodika idee on bituumenisse vee juhtimine, mis kokkupuutel bituumeniga aurustub ja suurendab bituumeni mahtu ning vähendab lühiajaliselt viskoossust. See lubab paremat täitematerjali kattuvust madalamal segamistemperatuuril. Jääkniiskus parandab segu tihenemisomadusi objektil. [38]

Üks peamine vahustamistehnika on asfalditehases pihustitega vee bituumenisse süstimine vahetult enne täitematerjaliga segamist või segamiskambris (Joonis 8).



Joonis 8. Asteci 3. generatsiooni pihustussüsteem vahustustehnoloogial WMA tootmiseks [46] [47]

Teine levinud tehnika on mineraalide kasutamine. Levinuimaks on peeneks pulbriks jahvatatud sünteetiline tseoliit, mis on hüdrotermiliselt kristalliseeritud. Tseoliit sisaldab 20% kristalliseeritud vett, mis vabaneb üle 85°C temperatuuride juures. Kui lisand lisatakse kuumale bituumenile, siis peen aur tekitab 6 – 7 tunnise paranenud töödeldavuse. Tseoliite lisatakse tavaliselt 0,25 – 0,3 % segu massist. Üheks sünteetilise tseoliidi WMA lisandi tooteks on Advera (Joonis 9).



Joonis 9. Advera nimeline sünteetiline tseoliit WMA tootmiseks [48]

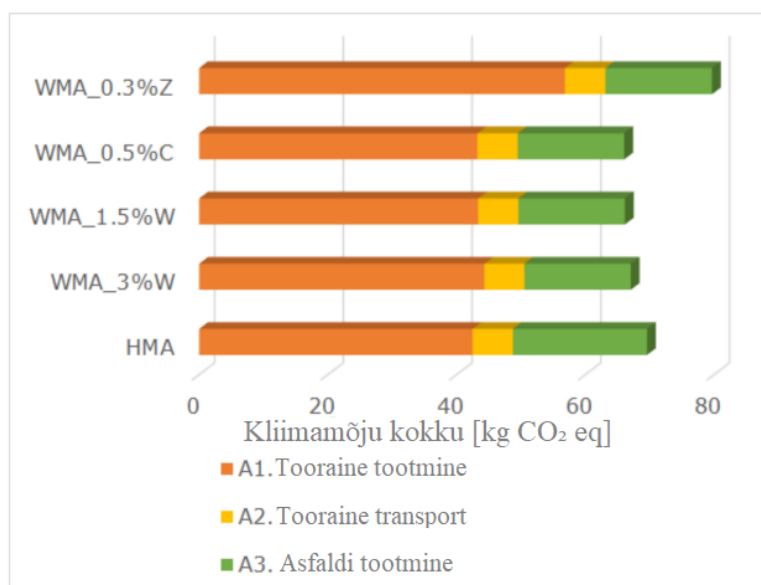
3.1.6 Sooja asfaltsegu tootmiseks kasutatavate lisandite CO₂ heide

Soojade asfaltsegu tootmise üheks eesmärgiks on vähendada CO₂ jalajälge. Lisandite kasutamise puhul on tähtis, et lisandi enda tootmisest tekkiv süsiniku jalajälg ei nulliks ära tootmistemperatuuri alandamisest tekkivat võitu. Rumeenias on teostatud aastal 2021 uuring, kus hinnati erinevate lisandite keskkonnamõjusid alates toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimiseni. Uurimise all oli neli erinevat lisandiga toodetavat WMA varianti (Tabel 16) ning neid võrreldi kuuma asfaldiga. [49]

Tabel 16. Keskkonnamõjude uuringus vaatluse all olnud asfaltsegu variatsioonid [49]

Asfaltsegu tähis	Lisandi tüüp	Lisandi kogus
HMA (kuum asfalt)	-	-
WMA_3%W	orgaaniline vaha	3% bituumeni kaalust
WMA_1,5%W	orgaaniline vaha	1,5% bituumeni kaalust
WMA_0,5%C	keemiline lisand	0,5% bituumeni kaalust
WMA_0,3%Z	sünteetiline tseoliit	0,3% asfaltsegu kaalust

Uuringu tulemusel jõuti toorainete tootmise, transpordi ja asfaldi tootmisel tekkiva CO₂ ekvivalentheidete tulemusteni (Joonis 10).



Joonis 10. CO₂ ekvivalentheidete toorainete tootmisest kuni asfaltsegu valmimiseni toodetud asfaltsegu tonni kohta [49]

Tulemustest on näha, et kõik lisandid peale tseoliitide vähendavad CO₂ heidet. Sünteetilised tseoliidid tekitavad oma tootmisprotsessis märkimisväärse koguse CO₂ heidet, mille tulemusel on kogu süsiniku jalajälg asfaldi valmimise hetkel suurem, kui klassikalise kuumas asfaldi puhul. Seega tasuks keskkonna säästmise vaatevinklist välistada sünteetilistel tseoliitidel põhinev sooja asfaldi tootmine. Tulemustest on näha ka, et asfaldi tootmise juures on suurim CO₂ heite osakaal toorainete toomise juures. See näitab, et alternatiivide leidmisel tooraine valikul või koostises ning RA kasutamisel on potentsiaal märkimisväärselt vähendada keskkonnamõjusid. [49]

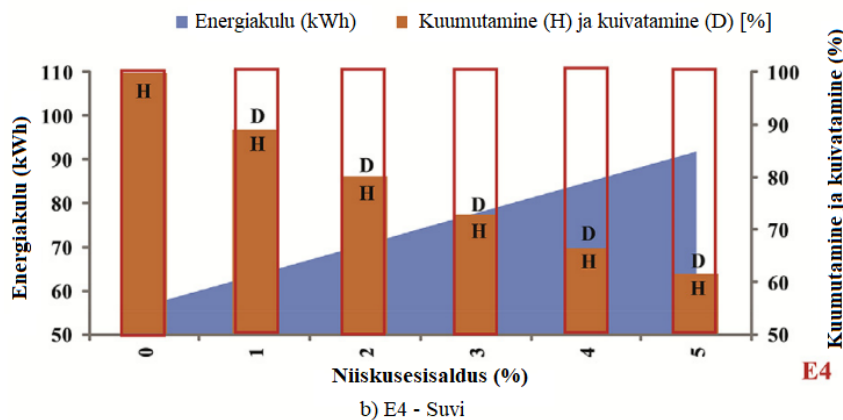
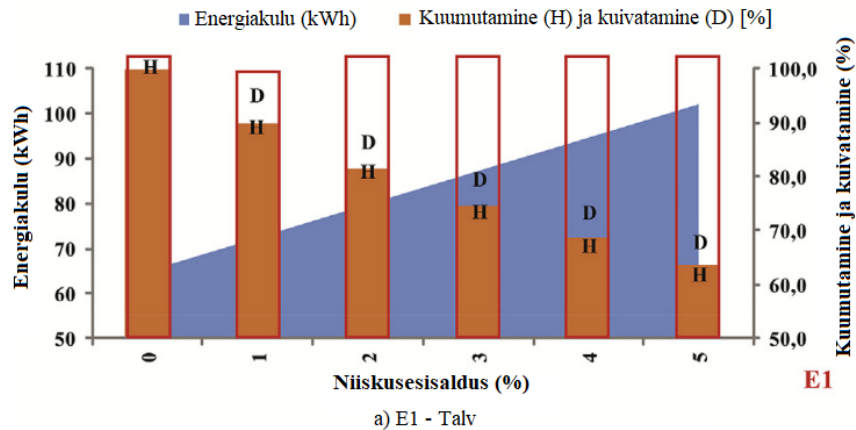
3.2 Niiskuse ja välitemperatuuri mõju energiakulule asfaldi tootmisel

Suheldes erinevate asfalditehaste tootmisjuhtidega tuleb koheselt välja, et tavalise tootmisprotsessi juures on suurimaks energiakulu mõjutajaks asfaldi tootmisel täitematerjalide niiskusesisaldus. Eriti problemaatiline on niiskus peentäitematerjalide puhul suure veeimavuse tõttu. Samuti ei tasu unustada RA kasutuse korral selle niiskusesisalduse jälgimist. Seetõttu on täitematerjali niiskusesisalduse vähendamise teel võimalik vähendada tootmisel kasutatavat energiakulu ning seeläbi vähendada ka emissioonide hulka. Teiseks mõjutavaks faktoriks on ka õhutemperatuur, aga seda vähemal määral, kui niiskus.

Aastal 2012 viidi Horvaatias, Nemetini asfalditehases läbi teadusuuring, mille käigus uuriti täitematerjali niiskusesisalduse ning õhutemperatuuri ja ilmastikutingimuste mõju asfaldi tootmisel kuluva energiale. Peaesmärk oli välja uurida mõju väliste faktorite poolt energiakulule kuuma asfaldi tootmisel. Selleks jälgiti kuue kuu pikkuse tootmishooaja jooksul asfalditehase tööd. Tehas töötas maagaasil. Igapäevaselt katsetati laboratoorselt täitematerjale, et leida nende niiskusesisaldus. Samuti jälgiti pidevalt kütusekulu ning õhutemperatuure. [50]

Katsetuste lähteandmed grupeeriti niiskusesisalduse ja temperatuuride põhjal ning leiti energiakulu täitematerjali niiskuse eemaldamiseks ja üles kuumutamiseks. Leiti, et 1% niiskuse eemaldamiseks kulub vahemikus 7,1–7,4 kWh energiat tonni asfaldi tootmise kohta. Talveperioodil kulus täitematerjali soojendamiseks keskmiselt 65,1 kWh energiat tonni asfaldi tootmise kohta. Suveperioodil kulus soojendamiseks 56,5 kWh energiat tonni asfaldi tootmise kohta. Siit võib teha järelduse, et kuigi kütteenergiat kulub täitematerjali soojendamisele sama temperatuurini talvel rohkem 8,6 kWh jagu, siis materjali niiskusesisaldus on veel suurema mõjuga. Kuumutades suvel 4% niiskusega täitematerjali kulus energiat 84,9 kWh. Samas kui kuumutada talvel 1% niiskusega täitematerjali kulus 72,5 kWh energiat. [50]

Loomaks paremat ülevaadet niiskusesisalduse mõjust energiakulule on graafiliselt välja toodud energiakulu ja niiskusesisalduse seosed tootes segu talveperioodil ja suveperioodil (Joonis 11).



Joonis 11. Seos niiskusesisalduse (%) ja energiakulu (kWh) vahel talvisel tootmisperioodil ja suvisel tootmisperioodil [50]

Uurimistöö põhjal tehti järgnevad järeldused:

- Energiatarbimine asfaldi tootmisel on mõjutatud aastaajast, mil tööd teostatakse;
 - Täitematerjalide hoiustamise tingimused tootmisalal mängivad suurt rolli. Mõelda tuleks materjalide ilmastikuolude eest katmisele;
 - Energiatarbimine on suuresti mõjutatud täitematerjalide niiskusesisaldusest;
 - Energiatarbimist mõjutavad tootmisveisakud, mitmete erinevate segutüüpide tootmine samal tootmispäeval, materjalikadu tolmuemaldusel;
 - Tegelik tehase energiakulu on suurem arvutuslikust kulust. Seda erinevate faktorite tõttu nagu näiteks seadmete kulumine ja eelpool välja toodud tegurid.
- [50]

Selleks, et vähendada täitematerjalide ja RA niiskusesisaldust tuleb mõelda nende hoiustamistingimuste peale. On tavaline, et asfalditehase materjalid hoiustatakse platsil, mille pind on ebatasane ja ette valmistamata. Kuna pind pole kõvakattega, siis muutub materjalide alune tasapind vastavalt frontaallaaduri töövõtetele. Kuna puudub drenaaž ning kalded ja frontaallaadur võib olla tekitanud lohke, kuhu vesi seisma saab

jääda, siis on veel raske materjalikuhjast välja nõrguda. Samuti saab materjal seguneda pinnasega ja tekib materjalikadu või jõuab asfaltsegusse pinnasega segunenud materjal. Nende probleemide vältimiseks ja ladustatud materjali seest vee välja juhtimiseks tuleks laoplatsile paigaldada kalde all kõvakate. Seeläbi saab vesi mööda kõvakatet tänu kaldele ära voolata ning laaduri operaator saab kõvakatte pinnalt kogu materjali kätte. Võrdluses ilma kõvakatteta ja tasase pinnaga laoplatsi ja asfalteeritud ja kaldega laoplatsi vahel on leitud, et kõvakattega platsil hoiustatud materjal oli keskmiselt 2,26% kuivem. [51] Lisaks on mõistlik laoplatsil materjalid omavahel kõrgete vaheseinadega eraldada, et vähendada materjalide poolt hõivatavat pinda ning vähendada niiskuseimavust vihma korral. [52]

Veel tähtsam täitematerjalide ja RA niiskusesisalduse vähendamiseks on nende katmine ilmastikuolude eest. Selleks on võimalik rajada laoplatsile telk- või angaar tüüpi rajatis, mis kataks materjalid. Seejuures on tähtis, et säiliks õhu liikumine või rajatakse ventilatsioon, et õhuniiskusest ei saaks tekkida liigset niiskust materjalis.

3.3 Kogemused WMA tehnoloogiatega välisriikides

Eestil on suurepärane võimalus õppida WMA tehnoloogiate kasutuselevõttu teiste riikide aastatepikkustest kogemustest. Autori eesmärgiks oli uurida kogemustest Põhjamaades, kus on meile sarnased külmad talved. Kindlasti tuleb õppida suurima WMA tehnoloogiate kasutaja Ameerika Ühendriikide kogemustest. Ühe Euroopa suurriigi kogemustest õnnestus läbi viia intervjuu Suurbritannia suurettevõtte asfaldi tootmise kõrgema astme juhiga. Lisaks toob autor välja kogemused Saksamaa kiirteedel rajatud katselõikudest WMA tehnoloogiatega.

3.3.1 Kogemused Suurbritannias

Suurbritannia kogemustest õnnestus autoril suhelda ühe Suurbritannia suurettevõtte asfaldi tootmise kõrgema astme juhiga. Ettevõttel on Ühendkuningriigi peale kokku kordades rohkem asfalditehaseid, kui terves Eesti riigis. Isik soovis jääda vastuste juures anonüümseks.

Milliseid WMA tehnoloogiaid Teie ettevõttes kasutatakse ja mille põhjal on valikud tehtud?

„Ettevõtte kasutab peaaegu eranditult keemilisi lisandeid temperatuuride alandamiseks. Levinuim nendest on Evotherm, mis meile meeldib, sest sellel on ka teisi segu parandavaid omadusi. Lisandid lisatakse bituumenisse asfalditehases. Selleks on enamustele tehastele eraldi lisandimahutid paigaldatud.“

„Me oleme uurinud ka tseoliitidel põhinevat vahtbituumeni tehnoloogiat, aga need lisandid olid kallid ja nende tootmise süsiniku jalajälg on väga suur, mis nullib ära tootmisenergia säästmiselt saavutatud võidu.“

„Keemilised lisandid annavad paindlikkuse kasutada neid ka kõrgematel temperatuuridel ilma kahju tekitamata. See annab pikendatud töödeldavuse akna ebasoodsates tingimustes, mis on kasulik mitmetel põhjustel.“

„Orgaanilisi Fischer–Tropsch meetodil toodetud vahasid me ei kasutata. Nende süsiniku jälg pole kõige parem. Lisaks nende olek muutub üsna järsult temperatuuri langedes, seega kui ehitusplatsil tekib viivitusi võib tekkida kattesse klompe või segu kõlbmatuks muutuda. Me kasutame küll Sasobit sünteetilist vaha, aga seda kütusekindla asfaldi tootmise jaoks ning kulumiskihtide segude tugevdamiseks. Seega neil on kasutuskoht, aga mitte sooja asfaldi tootmiseks.“

„Meil on mõni tehas, millele on paigaldatud bituumeni vahustamiseks vajalikud pihustid ja nad on teoorias võimelised vahtribuumeni tehnoloogial sooja asfaldi tootma. Aga batch mixer (ingl k) ehk tsüklilise tootmisega tehaste puhul selle tehnoloogia rakendamine on meie arvates väljakutseid pakkuv.“

„Mul on palju kogemusi mobiilsete vahustamistehnoloogiaga tehastega, kus toodetakse külmast taaskasutatavast materjalist segu. Vahustamispihustid on mõeldud pidevalt töötama, batch mixer (ingl k) tüüpi tehase puhul töötaksid nad pulseerivana. Varasemal katsetamisel on peale mõnesaja tonni segu tootmist tootmine peatunud pikemaks perioodiks. Seejärel uuesti vahustamistehnoloogial tootmist alustades tekkisid probleemid pihustite ja bituumentorustikuga. Võimalik, et pideva tootmise juures võiksid nad töökindlamalt toimida.“

Miks on WMA tehnoloogiate kasutuselevõtt ja areng aeglane Suurbritannias?

„Iga uus tehnoloogia ja meetod tabab mõningat vastupanu osapooltelt. Oodatakse pigem kuni teised on tehnoloogiad ära proovinud. Siiski on nüüd hakatud püstitama tõsisemaid CO₂ emissioonide vähendamise eesmärgi riigimaanteede ameti poolt, mis sunnib WMA tehnoloogiaid peale. Samuti on tehnoloogiate kasutuselevõtt olnud aeglane tänu varasemale riiklike spetsifikatsioonide, nõuete ja määruste puudulikkusele WMA tehnoloogiate kohta. Asi on muutumas ja kohalik riigimaanteede amet on nüüdseks öelnud, et WMA peaks olema vaikumisi valik kõigis nende lepingutes, kus see on teostatav. Nad on valmis kirjutanud ka mõned baasnõuded WMA segudele.“ [53]

„Siiani on mõned kehtivad normatiivid, mis räägivad ainult kuumast asfaltsegust. Seega kui tootja otsustaks kliendile toota WMA segu ilma kliendi teadmata ja omal initsiatiivil siis võib seda lugeda nõuete rikkumiseks. Seepärast on tähtis et tellijad ja projekteerijad hakkaksid küsima WMA tehnoloogiaid. Arengu kiirendamiseks on vajalik ka, et kohalikud omavalitsused hakkaksid WMA tehnoloogiat eelistama. Tähtis nii tootjate kui ka keskkonna vaatenurgast oleks pidev samal tehnoloogial segu tootmine. Pendeldamine kuumas ja sooja asfaldi tootmise vahel ei ole efektiivne, sest see tekitab rohkem jäätmeid ning vähendab tootlust.“

Milliseid probleeme on Teil tekkinud kasutades WMA tehnoloogiaid?

„Probleemid puuduvad, sest me kasutame väga lihtsat lähenemist kasutades keemilisi lisandeid. Keemiliste lisandite puhul pole eriti võimalust millegi valesti minemiseks. Siiski pole kõik perfektne. Me teostame palju asfalteerimisi öösel ja nii külmal

tingimustel kui vähegi võimalik. Veomaad tihti pikenevad öösiti. Kulumiskihi segudele, milles kasutatakse polümeermodifitseeritud bituumenit võib tekkida transpordi ajal koorik peale või sisse klombid. Seetõttu segatakse segusid vahel ka kuuma asfaldi temperatuuridel, mida keemilised lisandid võimaldavad. Seega pikendatakse kõrgema segamistemperatuuri abil vajadusel tihendatavuse akent. Töötame välja ka tarkvara, mis hindaks ilmaennustuse ja laotatava asfaltsegu parameetrite põhjal segu jahtumisaega, et selle põhjal määrata lisandite vajadus ja segamistemperatuur.“

Kuidas hoiustate täitematerjale tehases? Kas Teil on nõuandeid energiakulude vähendamiseks asfalditehases?

„Enamus uued tehased, mis me ehitame on saanud ilmastikuolude eest kaetud ladustamisala täitematerjalide jaoks. See on enamtõenäolisem nende tehaste puhul, kuhu täitematerjalid tuuakse rongiga. Paljude vanemate tehaste juures on täitematerjalid ladustatud lahtiselt.“

„Üks tähtis asi mida unustatakse on ringlussevõetud asfaldi ladustamistingimused peale töötlemist. Ringlussevõetud asfalt võib sisse imada üllatavalt palju niiskust. Soovitan hoida täitematerjalid ja RA kuivana ning kasutada trummelpõleti kütusena gaasi, kui soovite väiksemaid CO₂ heiteid.“

„Ärge unustage, et kui veomaa kahekordistub ainult selleks, et kasutada WMA tehnoloogiat võib kogu CO₂ emissioonide võit kadunud olla.“

3.3.2 Katselõigud Saksamaal

Saksamaa Riiklik Maanteede Uurimisinstituut (BAST) on sätestanud kindlad protseduurid, kuidas uuritakse uusi ehitusmaterjale ja ehitusmeetmeid. Uute materjalide kasutuselevõtu korral algavad uurimised laboratoorsete katsetustega. Kui laboratoorsed katsetused õnnestuvad, järgnevad neile välikatsed erinevatel teedel ja erinevatel tingimustel. Katselõigud ehitatakse suure liiklussagedusega teedele ja katselõigu pikkus peab olema üle 500 m. Ehitajaga sõlmitakse erileping, mis maandab ehitaja riske. Katselõike vaadeldakse minimaalselt viis aastat. Jälgimise all on ristprofiil, kihi paksus ja katendi seisund. Katselõikudega ehitatakse alati paralleelsed kontrolllõigud. WMA puhul ehitatakse kontrolllõigud klassikalise kuuma asfaldi tehnoloogiaga. Aastatel 1998 kuni 2001 ehitati Saksamaa kiirteedesüsteemi (Autobahn) seitse katselõiku WMA tehnoloogiatega. Seitsmenda lõigu puhul paralleelset kontrolllõiku ei rajatud. Kasutusel oli neli WMA tehnoloogiat: Sasobit (Fischer–Tropsch tüüpi parafiinvaha), Asphaltan–B (tahke vaha segatud rasvhappe amiididega), Aspha–min

(sünteetiline tseoliit, vahustamistehnoloogia) ja Sübit (bituumen, mida on modifitseeritud rasvhappe amiididega). WMA katselõigu tulemuste võrdlus HMA kontrolllõiguga on nähtav tabelis (Tabel 17). Seitsmenda lõigu puhul kontrolllõik puudus. [54]

Tabel 17. Saksamaa kiirteedel ehitatud WMA tehnoloogiatega katselõikude uurimistulemuste võrdlus HMA tehnoloogiatel ehitatud kontrollõikudega [54]

Kasutatud lisand		SmB 35 B 209 (bituumenisse eelsegatud) Sasobit	50/70 Pen + 4% (tehases segatud) Sasobit	50/70 Pen + Asphaltan B	50/70 Pen + Asphaltan B	50/70 Pen + Aspha- min	Sübit VR 45	Sübit VR 35
Sektsioon		1	2	3	4	5	6	7
Objekttil mõõdetud	Rattaroopa teke	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Madal
	Järeltihenemise vajum rattajäljes	Võrdväärne	Parem	Võrdväärne	Parem	Parem	Võrdväärne	Puudub
	Pragunemine	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne	Andmed puuduvad
Laboratoorsed katsed	Termiline stabiilsus	Parem	Parem	Võrdväärne	Parem	Võrdväärne	Parem	Väga hea
	Külmakindlus	Võrdväärne	Võrdväärne või parem	Võrdväärne	Võrdväärne	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Hea
	Bituumeni vananemine	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Võrdväärne	Võrdväärne	Madal
	Nake	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Parem	Võrdväärne	Võrdväärne või parem	Võrdväärne või parem	Hea

Katselõikude tulemustest on näha, et WMA tehnoloogiatega rajatud lõigud on kvaliteedilt samaväärsed või isegi paremad HMA lõikudest. Kuna Saksamaal on Eestist erinev kliima, ei saa siit järeldada, et samad lisandid Eesti tingimustes sama hästi toimiksid. Siiski saab siit eeskujuks võtta Saksamaa riikliku maanteeude uurimisinstituudi töömetoodika uute tehnoloogiate kasutuselevõtuks. Selge on see, et Eestis on vaja analoogselt alustada WMA tehnoloogiate laboratoorsete katsetustega ning seejärel sobivamate tehnoloogiate puhul katselõikude rajamisega.

3.3.3 Kogemused Norras

Norras hakkas tõsisem madalamal temperatuuril asfaldi tootmine pihta aastal 2011, kui kohalik asfaldiliit algatas projekti LTA 2011 – Low temperature asphalt (ingl k). Peamiseks eesmärgiks oli asfalteerimistööde teostajate elukvaliteedi ja töökeskkonna parandamine. Nimelt oli kohalik vähiliit juhtinud tähelepanu, et asfaldiaurud on kantserogeensed ja töötajate kokkupuudet nendega tuleb vähendada. Samuti oli eesmärgiks uurida, kas töötajate töökoormus suureneb kui kasutada WMA tehnoloogiaid. Projekti käigus rajati 11 katselõiku ja katsetati kuute erinevat WMA tehnoloogiat. Toimus asfaldiaurude ning töökoormuse mõõtmine. Samuti katsetati asfaldi kvaliteeti. Tulemustena leiti, et asfaldiaurude hulk väheneb ligikaudu 50%. Tööliste töökoormus ei erine kuuma asfaltsegu kasutusega võrreldes. Asfaltkatte jäävpoorsus, tasetas ja roopakindlus on võrdväärsed kuuma asfaltseguga. [38]

Aastast 2012 hakati Norras WMA leviku kiirendamiseks tootjatele kohaliku maanteeameti poolt boonust maksma. Kui segu oli toodetud vähemalt 25°C madalamal temperatuuril, kui samaväärne HMA ja vastas kvaliteedinõuetele, siis maksti tonni eest boonust 30 NOK (3,1 €). [38] Norra WMA toodang on sellest ajast alates olnud kogustelt pidevas kasvutrendis. Aastal 2020 toodeti kokku 1,85 miljonit tonni WMA. [40] Norra maanteeameti poolt on WMA segude kasutamiseks ette nähtud minimaalsed paigaldustemperatuurid. Näiteks SMA segude puhul 70/100 penetratsiooniga bituumeniga on madalaimaks paigaldustemperatuuriks 115°C ja AC segude puhul 110°C. Polümeermodifitseeritud bituumeni korral on minimaalsed temperatuurid kõrgemad. Samuti on nõuetes välja toodud, et WMA ei ole eraldiseisev asfaldiliik vaid on tavaliste asfaldimasside tootmismeetod. Seetõttu kehtivad WMA segudele kõik samad nõuded, mis HMA segudele. [55]

3.3.4 WMA kasutus Ameerika Ühendriikides

Kõige suuremaks WMA segude tootjaks maailmas on Ameerika Ühendriigid. Aastal 2020 toodeti USA-s 169 miljonit tonni WMA segusid. See oli umbes 45% nende aastasest kogutoodangust. Aastal 2012 oli USA WMA toodangust 88,1% toodetud

vahustamistehnoloogiaga ning 9,6% keemiliste lisanditega ning 2,3% teistel meetoditel. [40] Aastal 2019 toodeti WMA segudest 51% vahustamistehnoloogiaga ning 48% keemiliste lisanditega ning 1% muudel tehnoloogiatel. Kuna WMA tehnoloogiad parandavad asfaltsegu omadusi ka HMA tootmistemperatuuride juures, siis tasub välja tuua, et aastal 2019 toodeti umbes 50% WMA tehnoloogial segudest HMA tootmistemperatuuride juures. [56]

WMA tehnoloogiad said alguse Euroopast. USA huvi WMA tehnoloogiate vastu hakkas tekkima aastal 2002 ning aastal 2003 kutsuti Euroopast ettevõtteid WMA tehnoloogiad esitlema. 2004 aastal telliti NAPA – National Asphalt Pavement Association (ingl k) ehk Riikliku Asfaldiliidu ja FHWA – Federal Highway Administration (ingl k) ehk Föderaalise Maanteeameti poolt esimene demonstratsiooniprojekt. Edasi moodustati töögrupp, kes tegeles tehnoloogia uurimise ja rakendamisega kohaliku keskkonda. Aastatel 2006 – 2007 hakati WMA tehnoloogiad üleriigiliselt praktiseerima NAPA ning FHWA eestvedamisel. Samuti hakkas alates 2006. aastast uurima ja arendama WMA tehnoloogiad AASHTO – The American Association of State Highway and Transportation Officials (ingl k). [57] Aastast 2010 on 47 osariiki ja kõik FLH – Federal Lands Highway (ingl k) divisionid lisanud spetsifikatsioonid või lepingutingimused, mis lubavad WMA kasutust USA-s. 2012 aastal hõlmas WMA 30% aasta kogutoodangust ning tänu sellele vähenesid õhuemissioonid 5% võrra, mille võib võrdsustada 160 000 sõiduki poolt tekitavate emissioonidega. [58]

Kuna USA-s on WMA kasutus nii laialdaselt levinud ning selle kasutus on kestnud juba üle kümne aasta, siis on nende kogemustest võimalik teistel riikidel eeskujuga võtta. NCHRP – National Cooperative Highway Research Program (ingl k) on aastal 2017 teinud analüüsi 28. kasutusel olevast WMA tehnoloogiaga rajatud objektist, mis ehitati aastatel 2005 – 2012. Iga käsitletud objekti puhul oli rajatud WMA lõiguga ka paralleelselt HMA lõik, mida saab omavahel võrrelda. Eesmärgiks oli hinnata pikaajalist erinevatel WMA tehnoloogiatel rajatud lõikude kestvust, võrreldes neid HMA-ga rajatud lõikudega. Peamiselt hinnati piki- ja põikpragusid ning roobaste teket. [59]

Mõõtmiste ja katsetuste tulemusel tehti järgnevad järeldused [59]:

- Põikpragusid leidub peamiselt katendites, mis on üle nelja aasta vanused. Enamjaolt on põikpraod alguse saanud pealmisest katendikihist, kuid on peegeldunud ka alumustesse kihtidesse;
- Enamus WMA ja HMA lõigud näitasid võrdväärset põikpragunemist;

- Keemiliste lisandite, orgaaniliste lisandite ja vahustamistehnoloogiaga WMA puhul on lühikesel perioodil põikpragunemine sarnane. Pikemaajaliselt on orgaaniliste lisanditega WMA põikpragunemisele vastuvõtlikum;
- Sõidujäljes asuvad pikipraadid hakkavad tekkima samuti peale neljandat aastat. Alguse saavad nad kulumiskihist koormuse all katte väsimisest;
- HMA ja WMA tehnoloogiate tulemused olid võrreldavad;
- Pikaajalise eksploatatsiooni korral on orgaaniliste lisanditega toodetud WMA vastuvõtlikum pikipragunemisele;
- Roopateke on WMA ja HMA lõikude vahel enamjaolt võrdväärne;
- Erinevate WMA tehnoloogiate puhul pole statistilist erinevust rattaroota tekete osas;
- Rattarootad võivad hakata tekkima juba peale kolmandat eksploatatsiooniaastat;
- Üle kuue aasta vanuse katendi puhul on rattarootaste sügavus erinevate lõikude vahel rohkem eristatav;
- Nii WMA kui HMA lõikude puhul ei leitud niiskussisaldusest tekkinud kahjustusi. Soovitatakse mõlemal juhul kasutada nakkeparandajaid. [59]

USA aastatepikkune praktika ning kogemuste pagas näitab, et enamuse WMA tehnoloogiaid on kvaliteediomadustelt HMA-ga võrdväärsed. Pidev kasvutrend WMA kasutuses näitab, et tulevikus võib WMA tehnoloogia HMA peaaegu täielikult asendada.

3.4 Madalamal temperatuuril toodetud asfaltsegu ning bituumeni laboratoorsed- ja välikatsetused välisriikides

Madalamal temperatuuridel asfaltsegu kasutuselevõtu eelduseks on see, et nad vastavad kehtivatele normidele ja nõuetele. See tähendab, et soojast asfaltsegust võetud proovid peaksid andma samaväärseid katsetulemusi võrreldes kuuma asfaltseguga. Ei saa välistada ka seda, et WMA tehnoloogiate omaduste korrektseks hindamiseks on vaja üle vaadata ka katsetametodid. Rahvusvaheliselt on WMA tehnoloogiaid kasutatud juba pikka aega. Seetõttu on erinevates riikides läbi viidud mitmeid laboratoorseid katsetusi erinevate WMA lisanditega, hindamaks ja võrdlemaks nende kvaliteediomadusi HMA-ga. Autor toob välja mõningad kokkuvõtted erinevate riikide WMA tehnoloogiate katsetustest.

3.4.1 Katsetused WMA tehnoloogiatega Rumeenias

Aastal 2021 teostati Rumeenias uurimistöö, mille käigus katsetati laboratoorselt erinevate lisanditega valmistatud WMA segusid ja võrreldi neid kuuma asfaldiga. Sealjuures segati ja tihendati proovisegusid erinevate temperatuuride juures.

Uuringu eesmärkideks olid:

- Leida väärtused lisandite mõjule soojas asfaldisegus;
- Hinnata füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi erinevate sooja asfaldi variantide vahel;
- Välja selgitada optimaalsed segamis- ja tihendamistemperatuurid, mis on sobilikud soojale asfaldile;
- Valida optimaalne sooja asfaldi segu, mis sobib Rumeenia kliima- ning liiklustingimustega. [60]

Selles uuringu käigus testiti erinevaid WMA tehnoloogiaid. Proovisegud segati kahte tüüpi orgaanilise lisandiga (vaha), keemilise lisandiga ning viimase proovisegu puhul kasutati vahustamistehnoloogiat, kus kasutati sünteetilist tseoliiti. [60]

Katsetati segude veepüsivust, jäikust ning deformatsioonikindlust. Samuti testiti eraldi kõigi segude bituumeni omadusi. Segusid segati ja tihendati erinevatel temperatuuridel, et leida optimaalne segamis- ja tihendamistemperatuur. [60]

Segude deformatsioonikindlust katsetati Marshalli stabiilsuse katsega (EVS-EN 12697-34). Marshalli stabiilsuse tulemused kõigi soojade asfaltsegu puhul olid lähedased, kuid madalamad kuuma asfaltsegu tulemusest. Siiski vastasid kõik tulemused Rumeenias kehtivale nõutud vahemikule 6,5 – 13 kN. Marshalli voolavuse näitajad olid

ligilähedased kõigi proovisegude puhul. Samuti vastasid nad Rumeenias kehtivatele nõutud vahemikule 1,5 – 4 mm. [60]

Eestis kehtiva uuenenud standardi EVS 901–3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud järgi enam Marshalli stabiilsust ja voolavust pigem ei katsetata. Deformatsioonikindluse nõudeid testitakse Eestis pigem rattarooma katsega. Varasem standard EVS 901–3:2009 andis soovituslikud väärtused Marshalli katsetele (Tabel 18).

Tabel 18. Varasemas asfaltsegude standardis kehtinud soovituslikud väärtused Marshalli stabiilsusele ja voolavusele. [61]

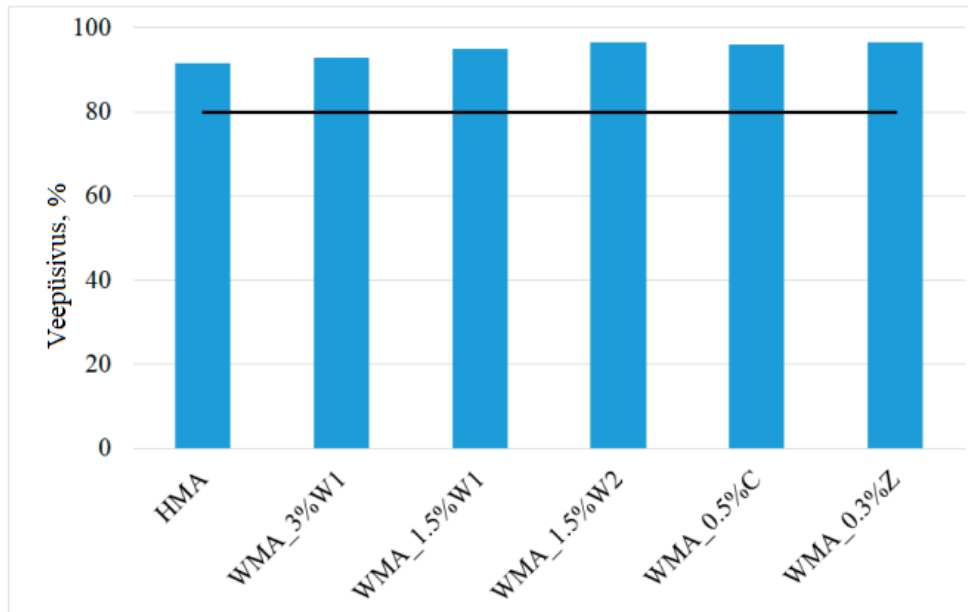
Segu liik, katendikiht	Minimaalne stabiilsus S_{min} , kN, liiklussagedusel enimkoormatud rajal				Voolavus F , mm
	< 500	500 - 1500	1501 - 3000	> 3000	
AC surf (kulumiskiht)	3,5	5,0	7,5	7,5	2 – 5
AC bin (siduvkiht)	-	5,0	7,5	7,5	1 – 4
AC base (aluskiht)	-	-	7,5	7,5	1 – 4
MÄRKUS 1	Soovitatav on valida Marshalli näitajad nii, et moodul (kN/mm) jääks piiridesse 1-4.				
MÄRKUS 2	Marshalli näitajate määramine ei asenda vajadust kontrollida segude vastavust deformatsioonikindluse nõuetele.				

Varasemaid soovituslikke nõudeid arvesse võttes võib järeldada, et praktiliselt kõik katsetatud sooja asfaltsegu variandid vastasid ka Eestis varasemalt kehtinud nõuetele. 100°C tihendamistemperatuuride juures jäi stabiilsus miinimumpiiri lähedusse. Seega optimaalseks segamis- ja tihendamistemperatuuriks oleks 120°C Marshalli katse põhjal.

Asfaltsegude jäikust testiti indirect tension to cylindrical specimens (IT-CY) (Ingl k) meetodil (EVS-EN 12697-26). Selle katsega hinnatakse asfaldi vastupidavust pragunemisele. Tulemustest järeldati, et vaha sisaldavad segud on teistest jäigemad ning ületavad kuuma asfaldi tulemust. Samuti järeldati, et segamis- ja tihendamistemperatuuri alanedes kõigil juhtudel jäikuse tulemus alaneb. Kõik tulemused ületasid Rumeenias kehtivat miinimumnõuet. [60]

Asfaltsegude vastuvõtlikkust jäävdeformatsioonile hinnati läbi kolmeteljelise tsüklilise survekatse ehk triaxial cyclic compression test (ingl k) abil (EVS-EN 12697-25). Enamus tulemusi kõigi segamis- ja tihendamistemperatuuride juures olid suurema deformatsiooniga kui kuum asfaltsegu. Nii deformatsiooni kui roomekiiruse tulemused olid alla soovituslike piiride Rumeenias. Suur deformatsioon ja roomekiirus võivad viidata segude halvemale vastupidavusele kõrgemate temperatuuride juures. Selle põhjustajaks võib olla madalam segamis- ja tihendamistemperatuur. [60]

Viimasena testiti asfaltsegude veepüsivust. Tulemused on nähtavad graafikul (Joonis 12).

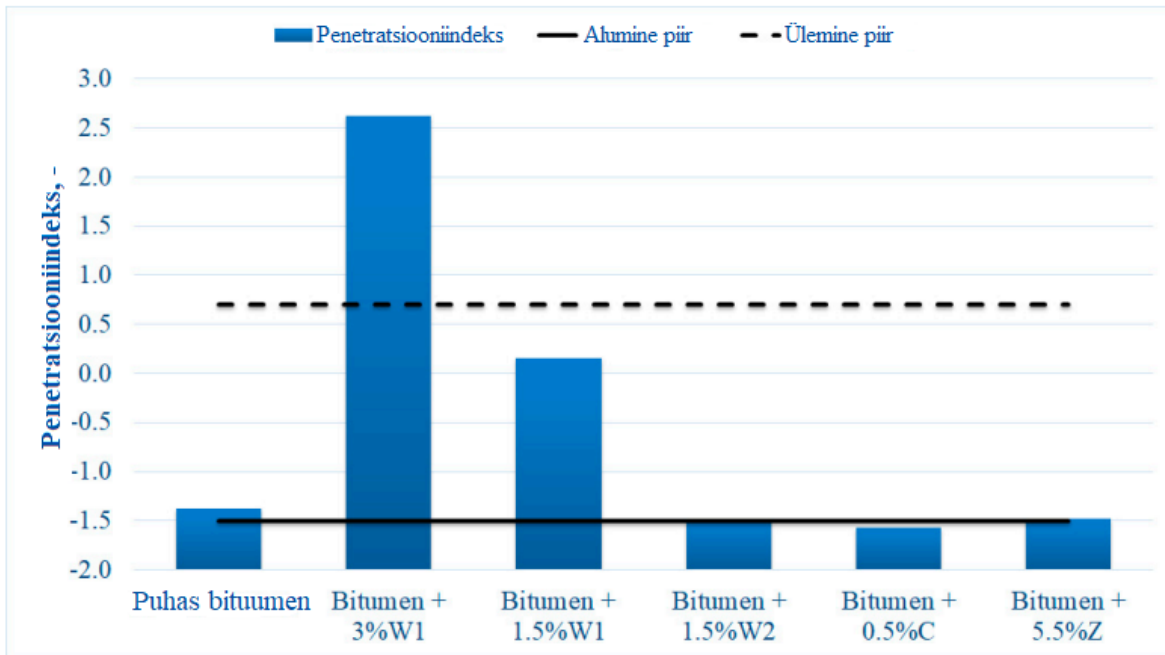


Joonis 12. Veepisivuse tulemused. Must horisontaaljoon on minimaalne aktsepteeritav tulemus Rumeenias [60]

Enamjaolt kõik katsetulemused olid sarnased. Võib eeldada, et kasutatud WMA lisandid suurendasid niiskuskindlust. Vastavalt Eestis kehtivale standardile on AC Surf segude puhul minimaalseks veepisivuse näitajaks 90%. Seega kõik segud vastavad ka Eestis kehtivatele nõuetele. [34]

Katsetuste tulemused näitavad, et sooja asfaltsegu omadused on võrreldavad kuuma asfaldi omadega. Soojad asfaltsegud on pigem jäigemad, kui kuum asfalt. Jääddeformatsiooni tulemused olid sooja asfaldi puhul natuke kehvemad, kui kuuma asfaldi puhul. Uurimistöõ autorid järeldasid, et kuni 40°C suurune segamis- ja tihendamistemperatuuri alandamine on võimalik, sest parimad tulemused saavutati 120°C segamis- ja tihendamistemperatuuride juures. [60]

Sama uuringu raames uuriti ka samade lisanditega segatud bituumeni omadusi. Bituumen hõlbustab täitematerjalide ja filleri vahelist naket asfaltsegus ning selle mehaanilised ja reoloogilised omadused mõjutavad märkimisväärselt asfaltsegude käitumist ja vastupidavust. Pehme bituumen on vastuvõtlikum kõrgetele temperatuuridele ja võib tekitada asfaltkihi suurt plastset deformatsiooni, samas jääk bituumen võib tekitada pragunemist. Katsetatud bituumenite penetratsiooniindeksid on nähtavad graafikul (Joonis 13). [60]



Joonis 13. Katsetatud bituumenite penetratsiooniindeksid [60]

Penetratsiooniindeks iseloomustab bituumeni temperatuuritundlikkust. Katsetuste tulemusel leiti, et lisandid mõjutavad bituumeni baaskarakteristikuid. Sünteetiline vaha muutis bituumeni vähem temperatuuritundlikuks, teised lisandid muutsid bituumeni rohkem temperatuuritundlikuks. Kõrge 3% vahasisaldus muutis bituumenit kõige rohkem. Teised lisandid väga penetratsiooniindeksit ei mõjutanud. Rumeenias peab 50/70 penetratsiooniga bituumen vastama penetratsiooniindeksile vahemikus -1,5...0,7. [60]

Kõigi kuue bituumeniga teostati ka dünaamilise nihkereomeetri katse (EVS-EN 14770). Selle katsega testitakse bituumeni omadusi kõrgetel temperatuuridel. Katsetulemustest täheldati, et bituumen segatult keemilise lisandiga või sünteetilise tseoliidiga käitub sarnaselt puhta bituumeniga. Sellegipoolest nihkemoodul mõningal määral suurenes tseoliidi lisandiga. Faasinurgad bituumenite puhul, mis segati keemilise lisandiga või sünteetilise tseoliidiga olid peaaegu identsed puhta bituumeniga. Sellest võib järeldada, et need lisandid ei mõjuta bituumeni reoloogilisi omadusi.

Orgaaniliste lisandite puhul pandi tähele, et pehmema sünteetilise vaha lisandiga bituumeni käitumine oli sarnane puhtale bituumenile. Samas teised jäigemate sünteetiliste vahadega segud erinesid puhtast bituumenist. Kõige rohkem muutis omadusi 3% bituumeni mahust jäigemast tüüpi vaha lisandit sisaldanud bituumen. Klassikaline vaha lisand muutis bituumenit jäigemaks ning muutis bituumeni vähem temperatuuritundlikuks. Kokkuvõtvalt leiti, et kõik lisandid on kasutuskõlblikud, kuid üle 1,5% bituumeni mahust vaha lisamine muudab bituumeni baaskarakteristikat. [60]

3.4.2 Vahustamistehnoloogiaga WMA katsetulemused ja katendi pikaajaline vastupidavus

Vahustamistehnoloogia, kus asfalditehases pihustatakse bituumenisse vett, et hetkeliselt muuta bituumeni viskoossust on levinuim Ameerika Ühendriikides. Sellise vahustamistehnoloogia puhul on asfaltsegu koostis sama, mis kuuma asfaltsegu korral. Kõik segamise ajal bituumenisse pihustatud vesi peaks teoreetiliselt segust välja aurustuma. Selleks, et hinnata vahustamistehnoloogial toodetud asfaldi sooritust võrreldes kuuma asfaldiga rajati USA-s, Californias aastal 2008 kaks testprojekti. Mõlema projekti juures rajati paralleelselt vahustamistehnoloogiaga toodetud WMA lõik ja klassikalisest HMA-st lõik. Ainsad omadused, mis segude vahel erinevad on bituumeni viskoossus segamise ajal, mis väheneb tänu vee lisamisele segamise ajal ning esialgne jäikus paigalduse hetkel. [62]

Asfaltsegusid katsetades selgus, et niiskussisaldus ei erine märkimisväärselt HMA ja WMA segude puhul. See tõestab, et bituumenisse lisatud vesi aurustub lõplikult katendist välja. Seejuures jälgiti tootmise ajal ka täitematerjalide niiskusesisaldust ning see ei erinenud märkimisväärselt. HMA ja WMA katselõikude jäävpoorsus ja bituumeni sisaldus oli valdavalt märkimisväärselt erinevusteta. Ainsad erinevused poorsuse osas tekkisid siis, kui proovikehasid tihendades oli segu liialt maha jahtunud. Roopakindlus oli HMA segude puhul natuke parem, kui WMA segude puhul, kuid jäi siiski normide piiridesse. Samuti katsetati segude tihenemist sama tihendamisprotsessi puhul. Kõigi katselõikude puhul saadu tulemusteks samaväärsed tihenemistegurid. Kokkuvõtvalt leiti, et kuigi mõned katsetulemused võivad WMA segul olla kehvemad, kui HMA puhul, siis vastavad nad kõik miinimumnõuetele. Samuti leidsid paigaldajad, et madalamal temperatuuril WMA segu käitus objektile sarnaselt HMA-le, seejuures tekitades palju vähem asfaldiaure. [62]

Hindamaks vahustamistehnoloogial toodetud WMA pikaajalist sooritust ja vastupidavust viis USA Virginia osariigi Transpordiamet läbi uurimistöö. Uurimise käigus võeti 2014 aastal suurkehad kuuest WMA tehnoloogial rajatud asfaltkattest, mis olid ehitatud aastatel 2008 kuni 2010. Võrdluse jaoks võeti suurkehad ka kolmelt võrreldavalt HMA seguga rajatud kattelt. Testiti ka bituumeni omadusi. [63]

Visuaalselt nägid katendid head välja ning ei näidanud märkimisväärsed kulumisjälgi. Sõidumugavus lõikudel oli hea, IRI tulemused kõigil lõikudel jäid alla 1,9 mm/m kohta. Puurkehade katsetamistest järeldati, et poorsus katsekehadel varieerub sarnaselt HMA katsekehadele. Jäikuse katsetustes esinesid WMA katendid hästi võrreldes HMA katenditega. Jäävdeformatsiooni katsetulemused varieerusid, kuid kõige paremaid

tulemusi saavutas siiski WMA katend. Pragunemiskindluselt saavutasid WMA segud häid tulemusi. Bituumenit katsetades selgus et WMA segudes vananeb bituumen vähem, kui HMA segudes. Tõenäoliselt tänu madalamatele tootmistemperatuuridele. [63]

Kokkuvõtvalt töötavad vahustamistehnoloogial rajatud WMA segud ka pikaajaliselt HMA segudega võrreldavalt. Õigete tingimuste juures on võimalik WMA segude puhul saavutada paremat sooritust kui HMA puhul.

3.4.3 WMA lisandite katsetused USA-s, Texas

USA, Texase osariigi Transpordiameti tellimusel uuriti aastatel 2006 kuni 2009 erinevaid WMA tehnoloogiatel valminud segusid. Katsetati nii laboratoorselt segatud segusid, kui ka valminud katselõikudelt võetud suurkehasid. Uuriti kolmel tehnoloogial valminud WMA segusid. Tehnoloogiateks olid Evortherm keemiline lisand, Sasobit sünteetiline vaha ja Advera sünteetiline tseoliit. [64]

Kõigi kolme lisandi puhul leiti, et saavutamaks soovitud jäävpoorsust ja tihendustegurit, siis optimaalne bituumeni sisaldus segus vähenes. Vähenemine oli kuni 0,4%, kuid sellel võib olla negatiivne efekt katendi pikaajalisele püsivusele. [64]

USA-s kasutusel oleva rattarooma katse – Hamburg wheel tracking (ingl k) puhul kuivatatakse katsekehasid ahjus kaks tundi asfaltsegu soovitatud tihendamistemperatuuril. Avastati, et WMA puhul oli sellise kuivamisaja puhul deformatsioonikindlus märkimisväärselt kehvem, kui HMA segu puhul. Samas avastati, et kui kuivamisega pikendati neljale tunnile, siis olid WMA segude katsetulemused HMA-ga võrreldavad. Põhjenduseks sellele võib olla jääkniiskuse aurustumine või bituumeni vananemine kuivatuse ajal, mis muudab segu omadusi. [64]

Mitu kuud hoiul seisnud WMA seguproovid tihenesid peale üles soojendamist lihtsamini, kui HMA seguproovid. Laboris segatud ja tihendatud WMA segud omasid sarnaseid tihenemise karakteristikuid kui HMA segud, kuigi neid tihendati ~20°C madalamal temperatuuril. Erinevad WMA lisandid mõjuvad tihenemisele erinevalt. [64]

Pragunemiskindlus oli lisanditega WMA segudel parem, kui võrreldaval HMA segul. Samas võib proovikehade pikem kuivamisaaeg ahjus vähendada WMA tulemusi. Väsimuskindluse puhul näitasid WMA katsekehad nii kuiva kui märja katse puhul paremaid tulemusi. Katsetused näitasid, et nake bituumeni ja täitematerjali vahel oli parem kõigi WMA segude puhul. [64]

Välitingimustes olid WMA katselõigud kõik kvaliteedi poolest võrreldavad HMA kontrollõikudega. Vanim katselõik oli kolme aasta vanune. Puurkehad, mis puuriti aasta vanuselt WMA katselõigult näitasid märkimisväärset jäikuse tõusu. Nii deformatsioonikindlus, pragunemiskindlus ja kaudne tõmbetugevus olid paranenud võrreldes paigaldamise hetkega. HMA tulemused jäid samaväärseks paigaldamise hetkega. [64]

Maaradariga mõõdetud WMA lõigud näitasid, et katend on ühtlaselt tiheda skeletiga. Samuti hinnati röntgen kompuutertomograafiaga puurkehade pooride jaotuvust. Selgus, et WMA katsekehade poorid jaotusid isegi ühtlasemalt, kui HMA katsekehadel. Falling weight deflectometer (ingl k) testseadmega mõõdeti ühel katselõigul katendi elastsusmoodulit ning tulemus oli võrreldav analoogselt HMA katendi tulemustega. [64]

Tulemustest saab järeldada, et WMA lisandid oluliselt parandavad asfaltsegu tihendamismadusi. WMA lisanditega segud on kvaliteediomadustelt võrreldavad HMA segudega. WMA tehnoloogiate puhul võib värskes asfaltsegus olla rohkem niiskust, kui HMA puhul, seega võivad katsetulemused sellest niiskusest mõjutatud olla. WMA tehnoloogiate kasutuselevõtu korral tuleks üle vaadata katsemetoodikad ja katsekehade kuivamisajad ja -temperatuurid. Aja möödudes võivad WMA katendite tugevusomadused paraneda. [64]

3.4.4 Katsetused Lätis WMA tehnoloogial valmistatud SMA seguga

Aastal 2012 valmis Lätis uuring WMA tehnoloogiate laboratoorsete katsetuste kohta. Katsetati Sasobit vahaga ja Rediset WMX keemilise lisandiga valmistatud segusid. Uurimise käigus hinnati nii bituumeni omadusi, asfaltsegu omadusi, kui ka katsemetoodikaid. Katsetatavaks asfaltseguks oli SMA 11, mille täitematerjaliks oli graniitkillustik. Katsetati 50/70 ja 40/60 penetratsiooniga bituumeneid. Lisandid segati bituumenisse 175°C juures. [65]

Katsetustest tehti järeldused:

Sasobit (vaha) lisand vähendab bituumeni viskoossust kõrgetel temperatuuridel ning suurendab seda keskmistel temperatuuridel. Katte jahtudes tõstab Sasobit lisand deformatsioonikindlust ja suurendab bituumeni elastsust. Rediset WMX lisandil on vähene mõju bituumeni viskoossusele. [65]

Bituumeni vananemisega kaasnevate omaduste muutust hinnati rolling thin film oven testiga – RTFOT (ingl k) (EVS-EN 12607-1). Leiti, et madalal temperatuuril on

bituumeni omadused peale RTFTOT vananemist sarnased puhtal ja lisanditega bituumenil. Rediseti WMX lisand vähendas oksüdatiivset kõvenemist võrreldes teiste proovidega ning vähenes murdumistäpi temperatuur. Oksüdatiivsel kõvenemisel on erinevad efektid HMA ja WMA puhul. Seetõttu peaks WMA segude laboratoorse segamise ja katsetamise puhul kaaluma proovide vanandamist enne nende tihendamist, et saada võrreldavaid tulemusi HMA-ga. [65]

Mõlema lisandi kasutamine tõestas, et vähemalt 25°C tihendamistemperatuuri alandamine on võimalik, säilitades HMA-ga võrreldava segu tiheduse ja tihenemisomadused. Samuti säilib vähemalt 25°C tihendamistemperatuuri alanemisel sarnane jäikus ja deformatsioonikindlus HMA segudele. [65]

KOKKUVÕTE

Käesolev lõputöö keskendub CO₂ emissioonide hulga leidmisele asfaldi tootmises Eestis ning nende vähendamise meetmete kirjeldamisele. Lõputöös pööratakse tähelepanu kasvuhoonegaasidest põhjustatud kliimamuutustele ja nende takistamise vajalikkusele. Lõputöös leitakse arvutuste ja erinevate allikate põhjal Eestis aastal 2020 asfaldi tootmisega tekitatud CO₂ ekvivalentsid alates toorainete tootmisest ja transpordist kuni asfaltsegu valmimiseni. Lõputöö annab indikatiivse ülevaate Eesti asfaldi tootmisel tekkivatest CO₂ heidetest ning nende leidmise meetodikatest. Kõik leitud tulemused kehtivad ainult tehtud eelduste korral. Aastal 2020 tekkis asfaldi tootmisest kokku 80 936,1 t CO₂eq heiteid toodetud 1 715 151 t asfaltsegu kohta. Arvutuste tulemused näitavad, et maagaasist tekib põlevkiviõliga võrreldes vähem kasvuhoonegaase.

Lõputöös kirjeldatakse erinevaid CO₂ vähendamise meetmeid. Süvitsi analüüsitakse asfaldi tootmis- ja paigaldustemperatuure alandavaid WMA tehnoloogiaid. Tehakse ülevaade WMA tehnoloogiate kogemustest välisriikides. Samuti kirjeldatakse laboratoorsete katsetuste ja välikatsetuste tulemusi WMA tehnoloogiatega välisriikides. Tuuakse välja WMA tehnoloogiate puudused ja eelised võrreldes kuuma asfaldiga. WMA tehnoloogiate valikul tuleb meeles pidada ka kasutatavate lisandite tootmise CO₂ heiteid. Näiteks suurendab tseoliitide kasutamine asfaldi tootmise CO₂ heidet suuremaks võrreldes kuuma asfaltseguga, sest lisandi tootmisprotsessis tekib suur kogus CO₂ heidet.

Lõputöö on mõeldud kokkuvõtva informatiivse allikana WMA tehnoloogiate kohta. Autor püüdis anda võimalikult hea ülevaate WMA tehnoloogiate valikutest ning nende eelistest ja puudustest. Järgmiseks sammuks Eestis oleks erinevate WMA tehnoloogiate katsetused laboratoorselt segatud proovisegudega. Seejärel katselõikude rajamine ning sellega seonduvad väli- ja laboratoorsed katsetused.

SUMMARY

The following master's thesis focuses on finding the amount of CO₂ emissions produced from the production of asphalt concrete in Estonia and describing measures to reduce them. Attention is paid to climate change caused by greenhouse gases and the need to prevent them. CO₂ equivalent emissions are found by calculations and variable sources for the year 2020 asphalt production in Estonia, starting from the production of raw materials and transportation until the finished product in the asphalt plant. The thesis provides an indicative overview of CO₂ emissions produced from the production of asphalt concrete and methods to calculate them. In the year 2020, about 80 936 tonnes of CO₂eq emissions were produced by the production of 1 715 151 tonnes of asphalt concrete in Estonia. Calculations also show that using natural gas as the primary fuel in the asphalt plant produces less CO₂ emissions than using shale oil as fuel.

Different ways of reducing CO₂ emissions are described in the thesis. In-depth warm mix asphalt technologies are analyzed. They reduce the production and compaction temperatures. The experience of WMA technologies abroad is reviewed. The results of laboratory and field tests with WMA technologies abroad are also described. The pros and cons of different WMA technologies are reviewed. When choosing a WMA technology it is important to remember that additive production also impacts the CO₂ emissions. For example, using zeolites increases the overall CO₂ emissions compared to hot mix asphalt.

The thesis is intended as a summary and informative source about WMA technologies. The author tried to give the best possible overview of the options of WMA technologies and their advantages and disadvantages. The next step in Estonia would be to laboratory test different WMA technologies with laboratory mixed sample mixtures. Then the construction of test sections and performing the related field and laboratory tests.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETLU

- [1] Elering, "Kliimakonverents, saastekvoodid ja süsinikukaubandus," [Online]. Available: <https://elering.ee/book/export/html/1209>. [Accessed 19 jaanuar 2021].
- [2] United Nations, "What Is Climate Change?," [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>. [Accessed 23 aprill 2022].
- [3] Kliimamuutused.ee, "Mida tähendab kliimanetraalsus?," [Online]. Available: <https://www.kliimamuutused.ee/uudised/mida-tahendab-kliimanetraalsus>. [Accessed 19 jaanuar 2022].
- [4] Keskkonnaministeerium, "Kyoto protokoll," [Online]. Available: <https://envir.ee/kyoto-protokoll>. [Accessed 3 märts 2022].
- [5] Eesti Keskkonnauuringute Keskus, "F-gaasid ja nende kasutamine," [Online]. Available: <https://www.klab.ee/f-gaasid/f-gaaside-kasutamine/>. [Accessed 10 märts 2022].
- [6] Keskkonnaministeerium, "Pariisi kokkulepe," [Online]. Available: <https://envir.ee/pariisi-kokkulepe>. [Accessed 19 jaanuar 2022].
- [7] Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu, "Pakett „Eesmärk 55”,“ [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/green-deal/eu-plan-for-a-green-transition/>. [Accessed 19 jaanuar 2022].
- [8] TheGlobalEconomy.com, "Carbon dioxide (CO2) emissions per capita in the European union," Source: The World Bank, 2018. [Online]. Available: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/Carbon_dioxide_emissions_per_capita/European-union/. [Accessed 10 aprill 2022].
- [9] Keskkonnaministeerium, "Rahvusvaheline aruandlus," [Online]. Available: <https://envir.ee/kliima/kliima/rahvusvaheline-aruandlus#kasvuhoonegaaside-in>. [Accessed 19 jaanuar 2022].
- [10] Eestimaa Looduse Fond, Eesti Roheline Liikumine, Keskkonnaõiguse Keskus, "Kliimamuutused," [Online]. Available: <https://www.kliimamuutused.ee/pohjused-ja-tagajarjed/pohjused/peamised-pohjused-eestis>. [Accessed 27 veebruar 2022].
- [11] Riigikogu, "Atmosfääriõhu kaitse seadus," 15 juuni 2016. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/114122021002>. [Accessed 6 märts 2022].
- [12] United States Environmental Protection Agency, "Understanding Global Warming Potentials," [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. [Accessed 11 märts 2022].
- [13] Greenhouse gas protocol, "Global warming potential values," [Online]. Available: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2018-06/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf. [Accessed 11 märts 2022].
- [14] Eesti Asfaldiliit, "Asfalt arvudes 2020," 2021. [Online]. Available: https://www.asfaldiliit.ee/files/filemanager/files/asfalt_arvudes_2020.pdf. [Accessed 19 jaanuar 2022].
- [15] Keskkonnaminister, "Välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid," 3 märts 2019. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/108032019006>. [Accessed 27 jaanuar 2022].
- [16] K. määrus, "Kütuste süsiniku eriheid," 27 detsember 2016. [Online]. Available: https://www.riigiteataja.ee/akt/1080/3201/9006/KKM_m86_lisa2.pdf#. [Accessed 26 jaanuar 2022].

- [17] Keskkonnaministeerium, "Greenhouse gas emissions in Estonia 1990 - 2019 National inventory report," Keskkonnaministeerium, Tallinn, 2021.
- [18] United States Environmental Protection Agency, "Direct Emissions from Mobile Combustion Source," december 2020. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/mobileemissions.pdf?VersionId=AN.MYxbIAuJ3wZ8B8zH.gensm6TiA5qf>. [Accessed 11 märts 2022].
- [19] M.-. j. kommunikatsiooniminister, "Kütuste tarbimisaine alumised kütteväärtused," 8 oktoober 2021. [Online]. Available: https://www.riigiteataja.ee/akti/1181/0201/2001/MKM_m63_lisa4.pdf. [Accessed 3 veebruar 2022].
- [20] Keskkonnaamet, "Keskkonnaluba," 10 veebruar 2021. [Online]. Available: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=&search=1&permit_nr=&owner_name=paekivi&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&search_location=&permit_status=ISSUED&permit_id=120385. [Accessed 16 veebruar 2022].
- [21] OÜ Inseneribüroo STEIGER, "Harju maakonna Väo lubjakivimaardla täiendava varu (plokkides 31 ja 32) arvele võtmise seletuskiri," OÜ Inseneribüroo STEIGER, Tallinn, 2012.
- [22] BRE Global Ltd, "Environmental Product Declaration," BRE Global Ltd, Coalville, 2018.
- [23] AB Volvo, "Emissions from Volvo's trucks," 2018. [Online]. Available: https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo/volvo-trucks/markets/global/pdf/our-trucks/Emis_eng_10110_14001.pdf. [Accessed 27 veebruar 2022].
- [24] Transpordiamet, "Sõidukite statistika," [Online]. Available: <https://www.mnt.ee/et/ametist/statistika/soidukite-statistika>. [Accessed 3 veebruar 2022].
- [25] Norsk Stein AS, "Environmental product declaration - Crushed Rock from Tau Quarry," Norsk Stein, 2020.
- [26] Searoutes, "SeaRoutes is a professional tool for route and distance calculation, voyage planning of seagoing vessels.," Searoutes, [Online]. Available: <https://classic.searoutes.com/>. [Accessed 5 märts 2022].
- [27] P. H. a. K. C.A, "Ship Emissions Study," Laboratory for Maritime Transport, National Technical University of Athens, Athens, 2008.
- [28] Veecotechno OÜ, "Veecotechno dredging equipment," [Online]. Available: <http://www.dredge.ee/et/kontakt-2/>. [Accessed 27 veebruar 2022].
- [29] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
- [30] Caterpillar, "Caterpillar performance handbook edition 46," Caterpillar, Illinois, 2016.
- [31] Eurobitume, "Life-cycle inventory for bitumen version 3.1," European Bitumen Association, Brussels, 2020.
- [32] ESU-services, "Life cycle inventories of oil refinery processing and products," ESU-services, 2018.
- [33] United States Environmental Protection Agency, "Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle," [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>. [Accessed 10 aprill 2022].
- [34] Eesti Standard, *EVS 901-3:2021 Tee-ehitus Osa 3: Asfaltsegud*, Eesti Standardikeskus, 2021.

- [35] Transpordiamet, 2021. [Online]. Available: https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/ehitus/asfaldist_katendikihtide_ehitamise_juhis_0.pdf. [Accessed 25 jaanuar 2022].
- [36] Transpordiamet, "Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise," Transpordiamet, Tallinn, 2021.
- [37] M.-. j. taristuminister, "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded," 10 august 2015. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107082015001?leiaKehtiv>. [Accessed 15 veebruar 2022].
- [38] Euroopa asfaldiliit (EAPA), "The use of Warm Mix Asphalt," Euroopa asfaldiliit (EAPA), Brüssel, 2014.
- [39] E. G. F. G. Federico Autelitanoa, "Half-warm mix asphalt with emulsion. An experimental study on," ELSEVIER B.V, Parma, 2021.
- [40] Euroopa Asfaldiliit (EAPA), "Asphalt in figures 2020," Euroopa Asfaldiliit (EAPA), Brüssel, 2021.
- [41] J. Liiva, "Soojad asfaltsegud," Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn, 2018.
- [42] K. A. Z. R. B. S. K. A. B. N. H. M. K. N. N. M. R. H. N. A. H. S. A. H. N. I. M. Y. Mohd Ezree Abdullaha, "Warm Mix Asphalt Technology: A Review," Penerbit UTM Press, Batu Pahat, Johor, 2014.
- [43] M. Zaumanis, "Warm Mix Asphalt," ResearchGate, 2014.
- [44] M. Zaumanis, "Warm mix asphalt investigation," Technical University of Denmark, 2010.
- [45] P. R. E. R. Krzysztof Maciejewski, "Effects of Short-Term Ageing Temperature on Conventional and High-Temperature Properties of Paving-Grade Bitumen with Anti-Stripping and WMA Additives," MDPI, Basel, 2021.
- [46] Environmental XPRT, "Astec - Warm Mix Systems," XPRT Media, [Online]. Available: <https://www.environmental-expert.com/products/astec-warm-mix-systems-701301>. [Accessed 10 Mai 2022].
- [47] ASTEC INDUSTRIES INC, "ASTEC WARM MIX SYSTEM," [Online]. Available: <https://www.astecindustries.com/products/details/astec-warm-mix-system?>. [Accessed 16 mai 2022].
- [48] A. F. Buss, "Investigation of sustainable pavement technologies evaluating warm mix asphalt using recycled asphalt materials," Iowa State University, 2014.
- [49] A. C. R. B. F. B. C. C. Anda Ligia Belc, "Environmental Impact Assessment of Different Warm Mix Asphalts," MDPI, 2021.
- [50] Z. D. A. S. D. T. R. Ivica Androjic, "Analysis of impact of aggregate moisture content on energy demand during the production of hot mix asphalt (HMA)," Elsevier Ltd, Nemetin, 2019.
- [51] J. George H. Simmons, "Stockpiles. Technical paper T-129," ASTEC.
- [52] Marini - Fayat group, "Energy savings - Asphalt plant energy saving is a fundamental issue," [Online]. Available: <https://marini.fayat.com/en/technology/energy-savings>. [Accessed 2 aprill 2022].
- [53] National Highways, "MANUAL OF CONTRACT DOCUMENTS FOR HIGHWAY WORKS," juuli 2021. [Online]. Available: https://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/mchw/vol1/pdfs/3796149%20MCHW%20Vol%201%20Series%20900_Print%20v0.2.pdf. [Accessed 14 veebruar 2022].
- [54] E. H. J. B. G. B. M. C. J. C. T. H. M. J. W. J. D. N. B. P. R. S. B. Y. John D'Angelo, "Warm-Mix Asphalt: European Practice," U.S. Department of Transportation, 2008.

- [55] Statens vegvesen, "N200:2021 Vegbygging," 2021. [Online]. Available: <https://svv-cm-sv-apppublic-prod.azurewebsites.net/product/859924/nb#id-df3dead5-0cdc-4dcb-fe8d-aa6d158d4fbb>. [Accessed 11 Mai 2022].
- [56] National Asphalt Pavement Association, "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2019," NAPA, 2019.
- [57] D. N. a. T. B. Matthew Corrigan, "Public Roads - July/August 2010," Juuli 2010. [Online]. Available: <https://highways.dot.gov/public-roads/julyaugust-2010/hot-warm>. [Accessed 3 Aprill 2022].
- [58] H. K. a. K. Garfield, "Public Roads - November/December 2013," November/Detsember 2013. [Online]. Available: <https://highways.dot.gov/public-roads/novemberdecember-2013/look-back-moving-forward>. [Accessed 3 Aprill 2022].
- [59] National Cooperative Highway Research Program, "Long-term Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies," National Academy of Sciences, 2017.
- [60] E. C. F. B. C. C. Anda Ligia Belc, "Influence of Different Warm Mix Additives on Characteristics," MDPI, 2021.
- [61] Eesti Standard, *EVS 901-3:2009 Tee-ehitus Osa 3: Asfaltsegud*, Eesti Standardikeskus, 2009.
- [62] A. H. D. M. R. Jason Wielinski, "Laboratory and Field Evaluations of Foamed Warm-Mix Asphalt Projects," Granite Construction, Inc, 2009.
- [63] P. P. STACEY D. DIEFENDERFER, "Performance of Foamed Warm Mix Asphalt in Virginia Over Four to Six Years," Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 2017.
- [64] J. B. A. E. A. Cindy Estakhri, "Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas," Texas Transportation Institute, 2010.
- [65] E. O. V. H. G. B. J. S. Martins Zaumanis, "Laboratory evaluation of organic and chemical warm mix asphalt technologies for SMA asphalt," The Baltic journal of road and bridge engineering, Riga, 2012.
- [66] M.-. j. t. määrus, "ASFALTBETOONSEGUDE LUBATUD SEGAMISTEMPERATUURIDE," 3 august 2015. [Online]. Available: https://www.riigiteataja.ee/aktiis/1070/8201/5001/MKM_m101_lisa15.pdf#. [Accessed 25 jaanuar 2022].
- [67] T. T. B.W.Ang, "Analysis of process energy use of asphalt-mixing plants," Elsevier Ltd., 1993.
- [68] Elering AS, "Kuu keskmise gaasi kvaliteet," jaanuar 2022. [Online]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/public/Gaas/Gaasis%C3%BCsteem/Maagaasi%20kvaliteeditunnistus%20jaanuar%202022.pdf>. [Accessed 3 veebruar 2022].
- [69] CONTROLS S.p.A., "Indirect Tensile Test for UTM, AsphaltQube, AMPT Pro and AMPTQube," [Online]. Available: <https://www.controls-group.com/usa/dynamic-testing-accessories/indirect-tensile-test-for-utm-asphaltqube-ampt-pro-and-amptqube.php>. [Accessed 7 veebruar 2022].
- [70] Eesti Standard, *EVS-EN 12697-34:2020 Asfaltsegud, Osa 34: Marshalli katse*, Eesti Standardikeskus, 2020.
- [71] M.-. j. k. määrus, "Kütuste tarbimisaine alumised kütteväärtused," 8 oktoober 2012. [Online]. Available: https://www.riigiteataja.ee/aktiis/1181/0201/2001/MKM_m63_lisa4.pdf. [Accessed 14 veebruar 2022].
- [72] Transpordiamet, "Sõiduki taustakontroll," 2022. [Online]. Available: <https://eteenindus.mnt.ee/public/soidukTaustakontroll.jsf>. [Accessed 16 veebruar 2022].

- [73] Eesti Standard, *EVS-EN 1426:2015 Bituumen ja bituumensideained. Nõelpenetratsiooni määramine*, Eesti Standardikeskus, 2016.
- [74] IndiaMART InterMESH Ltd, "Bitumen Penetration Test Apparatus, For Laboratory," IndiaMART InterMESH Ltd, [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/bitumen-penetration-test-apparatus-4059324088.html>. [Accessed 16 veebruar 2022].
- [75] M. M. A. Aziz, "A short review on using crumb rubber as modification of bitumen binder," *Jurnal Teknologi*, 2015.
- [76] Eesti Standard, *EVS-EN 1427:2015 Bituumen ja bituumensideained. Pehmenemistäpi määramine kuuli-rõnga meetod*, Eesti Standardikeskus, 2016.
- [77] C. Jin. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=JTtfKORhZEU&ab_channel=NCTEL. [Accessed 16 veebruar 2022].
- [78] K. Lill, *Taltech Tee-ehitusmaterjalid õppeaine materjalid*, Tallinn, 2022.
- [79] Sphera, "GaBi Solutions," Sphera, [Online]. Available: <https://gabi.sphera.com/international/index/>. [Accessed 17 veebruar 2022].
- [80] Volvo, "Emissions from Volvo," [Online]. Available: https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo/volvo-trucks/markets/global/pdf/our-trucks/Emis_eng_10110_14001.pdf.