

Mukul Rathore

AUGSTA RECIKLĒTĀ ASFALTA SATURA MAISĪJUMI: PROJEKTĒŠANAS PARAMETRI UN ĪPAŠĪBU IZVĒRTĒJUMS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Ceļu un tiltu katedra

Mukul Rathore

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorants

**AUGSTA RECIKLĒTĀ ASFALTA SATURA
MAISĪJUMI: PROJEKTĒŠANAS PARAMETRI
UN ĪPAŠĪBU IZVĒRTĒJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

vadošais pētnieks

Dr. sc. ing. MĀRTIŅŠ ZAUMANIS,

vadošais pētnieks

Dr. sc. ing. VIKTORS HARITONOVŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Rathore M. Augsta reciklētā asfalta satura maisījumi: projektēšanas parametri un īpašību izvērtējums. Rīga, RTU Izdevniecība, 2022. 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2022. gada 22. aprīļa sēdes lēmumu, protokols Nr. P-1.



Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Ceļu un tiltu katedrā un SIA "Ceļu eksperts".



SAFERUP!
Thinking Beyond the Pavement



Promocijas darbs izstrādāts projektā "*SAFERUP!*". Tas ir inovatīvs apmācību tīkls, kas veltīts drošiem, pieejamiem un urbāniem ceļu un ietvju segumiem. Projekts "*SAFERUP!*" saņēmis Eiropas Savienības "*Horizon 2020*" pētījumu un inovāciju programmas finansējumu saskaņā ar Marijas Sklodovskas-Kirī stipendijas vienošanos Nr. 765057.

<https://doi.org/10.7250/9789934228063>
ISBN 978-9934-22-806-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 2. septembrī plkst. 14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē Ķīpsalas ielā 6B 313. kabinetā.

OFICIĀLIE RECEZENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Ainārs Paeglītis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors, Dr. Viktoras Vorobjovas,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Asociētais profesors, Dr. Jorge Rodriguez-Hernandez,
Kantabrijas Universitāte, Spānija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Mukul Rathore (paraksts)

Datums:

Promocijas darba ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi, 66 attēli, 31 tabulas, kopā 143 lappuses. Bibliogrāfijā ir 169 nosaukumi.

SATURS

1. IEVADS	5
2. ZINĀTNISKAIS PAMATOJUMS	8
3. EKSPERIMENTĀLĀS METODES	10
4. MAISĪŠANAS PARAMETRU PĒTĪJUMI	13
5. SILTA MAISĪJUMA ASFALTS AR AUGSTA RECIKLĒTĀ ASFALTA SATURU	19
6. ATJAUNOŠANAS PIEDEVU NOVECINĀŠANAS PĒTĪJUMI.....	23
7. 100 % PĀRSTRĀDĀTU MAISĪJUMU SNIEGUMS	27
8. ASFALTA PĀRSTRĀDES DZĪVES CIKLA IZVĒRTĒJUMS	31
SECINĀJUMI	35

1. IEVADS

Vairāk nekā 90 % Eiropas ceļu segumos tiek izmantots asfalts. Asfalts tradicionāli sastāv no 94 % līdz 96 % (m/m) minerālmateriālu un 4 % līdz 6 % (m/m) bitumena. Līdz ar globālās ekonomikas un jaunas ceļu infrastruktūras skaita palielināšanos, ceļu būvēšanai nepieciešamie izejmateriāli tiek strauji izsmelti. Lai uzlabotu ceļu būves ilgtspējību, jāizmanto 3R princips – samazināt, izmantot atkārtoti un pārstrādāt (angļu val. – *reduce, reuse and recycle*). Tas nozīmē, ka asfalta segumi ir jāveido tā, lai tie ilgi saglabātos, kas savukārt samazinās izejmateriālu patēriņu. Pēc ekspluatācijas laika beigām reciklētais asfalts (RA) ir jāmēģina izmantot atkārtoti tajā pašā asfalta slānī. Ja tajā pašā asfalta slānī RA izmantot nav iespējams, tas jāpārstrādā un jāiestrādā zemākos jeb pamata slāņos vai jāizmanto, lai aizstātu minerālmateriālus ar saistvielām nesaistītajos slāņos, sānu drošības joslās un uzbērumos. Eiropā 68 % no pieejamā reciklētā asfalta izmanto jaunu ceļu būvniecībā un uzturēšanā, savukārt 20 % RA tiek pārstrādāts ar saistvielām nesaistītajos slāņos u. c. inženiertehniskos risinājumos.

Laboratorijas apstākļos jau ir uzskatāmi parādīts, ka asfalta maisījumi, kas sastāv tikai no reciklētā asfalta un atjaunošanas piedevām, var nodrošināt apmierinošu sniegumu. Tomēr šobrīd lielākajā daļā valstu ceļu seguma slāņa asfalta maisījumā reciklēts asfalsts veido tikai 10 % līdz 30 %. To var skaidrot ar tehniskiem ierobežojumiem un pārliecības trūkumu par maisījumu ar augstu RA sastāvu kvalitāti. Šī promocijas darba mērķis ir uzlabot asfalta ceļu būvniecības ilgtspējību, izceļot asfalta maisījumu ar augstu RA sastāvu pozitīvos aspektus attiecībā pret tradicionāliem asfalta maisījumiem un optimizējot maisījumu ar augstu RA sastāvu dizaina parametrus, kā arī uzlabojot saistvielu un atjaunošanas piedevu sniegumu.

1.1. Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt jaunu projektēšanas un testēšanas metodiku atjaunojošo piedevu saturošiem asfalta maisījumiem ar augstu reciklētā asfalta saturu, kā arī izvērtēt šādu maisījumu ilgtermiņa mehāniskās īpašības un ietekmi uz vidi.

1.2. Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, jāizpilda vairāki pētījuma uzdevumi.

1. Izstrādāt procedūru augsta reciklētā asfalta satura maisījumu izgatavošanai laboratorijā, kas ļautu salīdzināt maisījumu mehāniskās, reoloģiskās un ķīmiskās īpašības.
2. Izmantojot ķīmisku piedevu, izstrādāt augsta satura siltā asfalta maisījumu un salīdzināt tā īpašības ar tradicionālo karstā asfalta maisījumu.
3. Izvērtēt ar dažādas izcelsmes atjaunojošajām piedevām modificētu asfalta sastāvu reoloģisko un ķīmisko īpašību izmaiņas, veicot maisījumu ilgtermiņa novēdināšanas simulēšanu laboratorijas apstākļos.
4. Noteikt augsta reciklētā asfalta satura maisījumu risu veidošanās un plaisāšanas īpašības un noteikt korelāciju starp mehāniskām īpašībām un optiski noteiktām deformācijām.
5. Veikt dzīves cikla inventarizācijas analīzi, lai novērtētu ietekmi uz vidi maisījumiem ar augstu reciklētā asfalta saturu.

1.3. Zinātniskā nozīme un novitāte

Patlaban nav standartizētas procedūras reciklētā asfalta maisījumu sagatavošanai laboratorijā. Lai šo problēmu risinātu un ļautu salīdzināt asfalta īpašības, kas noteiktas dažādās laboratorijās, tika veikts sistematisks pētījums, kurā izstrādāta jauna procedūra augsta satura reciklētā asfalta maisījumu sagatavošanai laboratorijā. Promocijas darba gaitā izstrādāta stadijas ekstrakcijas metode, lai no reciklētā asfalta maisījumiem iegūtu vairākus saistvielas slāņus. Jaunā ekstrakcijas metode ir uzlabojums, salīdzinot ar tradicionālajām ekstrakcijas metodēm, kas spēj iegūt tikai vienu saistvielu maisījuma slāni. Nozarē lielas bažas rada reciklētu asfalta maisījumu ilgtermiņa kalpotspēja, kas tika risināta, laboratorijas apstākļos simulējot novecošanos reciklētiem maisījumiem, kas izgatavoti, izmantojot dažādas atjaunojošās piedevas. Šajā pētījumā ir demonstrēts jauns veikspējas rādītājs augsta satura reciklētā asfalta maisījumiem, apvienojot mehānisko plaisu izplatīšanās testēšanu ar digitālo attēlu korelācijas tehniku. Visbeidzot, aprites cikla novērtēšanas metodē tika integrēti ceļa segumu projektēšanas aspekti, ļaujot aprēķināt augsta satura reciklētu asfalta maisījumu ietekmi uz vidi.

1.4. Praktiskais lietojums

Visas promocijas darbā iekļautās publikācijas ir pieejamas atvērtās piekļuves žurnālos, kas palielina šī pētījuma ietekmi. Ieteikto maisīšanas procedūru maisījumiem ar augstu RA sastāvu var izmantot pētnieki un maisījumu projektētāji, lai izveidotu optimālus maisījumus un varētu tos salīdzināt. Maisījumu ar augsta RA sastāvu snieguma novērtējums dažādām saistvielu modifikācijām uzlabos reciklētā asfalta maisījumu projektēšanas metodoloģiju un nodrošinās ievirzi nākotnes pētījumiem, lai risinātu citus ar augsta RA satura maisījumiem saistītus jautājumus. Ilgtermiņa snieguma salīdzinājums dažādām atjaunošanas piedevām kalpos kā vadlīnijas asfalta ražotājiem, lai izvēlētos visefektīvākās atjaunošanas piedevas. Nogurumizturības raksturošanas metodi, kas apvienota ar bezkontakta mērījumu tehniku, var izmantot pētnieki, lai novērtētu maisījumus un izstrādātu jaunus raksturošanas parametrus. Dzīves cikla novērtējuma rezultātus var izmantot, lai salīdzinātu reciklētā asfalta maisījumus ar tradicionālo asfaltu, kas izgatavots līdzīgos apstākļos, ietekmi uz vidi.

1.5. Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Izstrādāta procedūra asfalta maisījumu izgatavošanai laboratorijā, kas ļauj ticami salīdzināt īpašības dažādiem augsta satura frēzētā asfalta sastāviem.
- Izstrādāta stadiju ekstrakcijas metode ļauj no frēzētā asfalta saturošiem maisījumiem atgūt vairākus bitumena slāņus, lai novērtētu samaisīšanās pakāpi starp bitumenu un atjaunojošo piedevu.
- Izstrādāta optiskā deformāciju mērīšanas metodika ļauj noteikt plaisu izplatīšanos augsta satura frēzētā asfalta maisījumos.
- Izstrādāta integrēta ceļa dzīves cikla analīzes metode, kas ietver reciklētā asfalta īpašību ietekmi uz ceļa seguma slāņu biezumiem, tādējādi uzlabojot ietekmes uz vidi kalkulāciju robustumu.

1.6. Zinātniskās publikācijas

1. **Rathore, M.**, Haritonovs, V., Merijs-Meri, R., Zaumanis, M., 2022. Rheological and chemical evaluation of aging in 100 % reclaimed asphalt mixtures containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*. 318, 126026. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126026>.
2. **Rathore, M.**, Haritonovs, V., Zaumanis, M., 2021. Performance Evaluation of Warm Asphalt Mixtures Containing Chemical Additive and Effect of Incorporating High Reclaimed Asphalt Content. *Materials*. 14, 3793. <https://doi.org/10.3390/ma14143793>.
3. **Rathore, M.**, Zaumanis, M., 2020. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. *Construction and Building Materials*. 264, 120709, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120709>.
4. **Rathore, M.**, Zaumanis, M., & Haritonovs, V., 2019. Asphalt Recycling Technologies: A Review on Limitations and Benefits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660, 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/660/1/012046>.

1.7. Līdzdalība starptautiskās zinātniskās konferencēs un darbnīcās

1. 4th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2019), Riga, Latvia, 25th–27th Sep 2019.
2. 57th Peterson Asphalt Research conference, Wyoming, U.S., 13th–14th July 2020.
3. 9th Conference of the European Asphalt Technology Association, Vienna, Austria, 3rd–5th June 2021.
4. 30th International Baltic Road Conference, Riga, Latvia, 22nd–25th Aug 2021.
5. 1st SaferUP! Training Week at University of Bologna, Italy. 1st–5th April 2019.
6. SaferUP! Mid Term Meeting at University College London. 12th June 2019.
7. Fundamentals for Innovative Research in Sustainable Transportation” Workshop held in Moena, Italy. 15th–18th Dec 2019.
8. 2nd SaferUP! Training Week at University of Cantabria. 28th Sep–2nd Oct 2020.
9. 3rd SaferUP! Training Week at Bonn, Germany, 19th–23rd April 2021.
10. 4th SaferUP! Training Week at Coventry University, United Kingdom, 13th–17th Dec 2021.

2. ZINĀTNISKAIS PAMATOJUMS

2.1. Reciklētais asfalts

Ar terminu “reciklētais asfalts” apzīmē sasmalcinātu asfalta materiālu, kas ir nofrēzēts no nolietota seguma un ko var pārstrādāt, lai izmantotu jaunā segumā. Visbiežāk vecais seguma materiāls tiek savākts no būvniecības zonām un tālāk aizvests uz centrālo ražošanas vietu, kurā tas tiek sasmalcināts, pārbaudīts, sašķirots pēc izmēriem un novietots uzkrāšanai kā izejviela. RA materiālu īpašības atkarīgas no vairākiem faktoriem, piemēram, oriģinālā seguma tipa, biezuma un vecuma, vides un satiksmes plūsmas, oriģinālo minerālmateriālu kvalitātes un īpašībām, no izmantoto saistvielu satura, kā arī no iekārtām, ar kurām nolietotais segums ir iegūts. Dažas no grūtībām un ierobežojumiem, kas saistīti ar reciklēto asfaltu maisījumiem, un to risinājumi apkopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

RA materiālu ierobežojumi un to risinājumi

Problēmas	Ierobežojumi	Risinājumi
Augsts smalkās frakcijas saturs	Ierobežo maksimālo RA daudzumu asfalta maisījuma specifikāciju dēļ.	Izvērtējiet no pārāk lielas apstrādes un izmantot atbilstošas metodes, kas samazina putekļu veidošanos, piemēram, smalcināšanu.
Mainīgums	RA ar augstu mainīgumu būs nepieciešamas vairāk pārbažu un smalcināšanas, kas palielina ražošanas izmaksas.	Labi uzturēti, loka formas, vienmērīgi slāņoti RA uzkrājumi aizkavē segregāciju.
Mitruma saturs	Augsts RA mitruma saturs samazinās rūpnīcas ražošanas ātrumu un maksimālo RA daudzumu maisījumā.	Lai uzglabātu RS, var izmantot lielas koniskas kaudzes, tas samazina mitruma uzkrāšanos.
Piesārņojums	Indīgas vielas RA sastāvā var nonākt gruntsūdeņos un ietekmēt cilvēku veselību.	RA uzglabāšana uz cietām virsmām aizkavēs piesārņojumu un apakšējās virsmas blīvēšanos.

2.2. Silta maisījuma asfalts

Silta maisījuma asfalts (angļu val. – *warm mix asphalt; WMA*) ir asfalta maisījuma veids, kurā ražošanas procesa temperatūra ir samazināta par 20–40 °C, salīdzinot ar tradicionāla asfalta ražošanas procesa temperatūru. Tehnoloģijas pamatprincips ir specifisku piedevu pievienošana maisījuma iegūšanas procesa pēdējos posmos vai pievienošana, izmantojot saistvielu putošanu, kurā saistvielu izveidots minarālmateriālu pārklājumu var uzlabot un iegūt ievērojami zemākā temperatūrā. *WMA* zemā ražošanas temperatūrā atvieglo augsta RA satura iekļaušanu, pateicoties mazākai saistvielu novecošanai šajā procesā. Zemāka ražošanas temperatūra nozīmē arī zemāku enerģijas patēriņu un samazinātu izplūdes gāzu daudzumu. *WMA* metodes iedala trijās plašās kategorijās, kas iekļauj putošanas procesus, organiskas un ķīmiskas piedevas.

2.3. Reciklētā asfalta maisījuma ražošana

Karstā maisījuma asfalta ražošanas procesā minerālmateriālus tradicionāli uzkarsē līdz 150–190 °C temperatūrai. Visbiežāk izmantotā metode ir pārkarsēt neapstrādātus minerālmateriālus (190–250 °C temperatūrā), lai, tos sajaucot kopā ar reciklēto asfaltu, minerālmateriāli izžūtu un sasildītu RA kondukcijas ceļā. RA ir vai nu uzkarsēts 110–160 °C temperatūrā (siltā/karstā pārstrāde), vai arī pievienots, tam esot apkārtējās vides temperatūrā (aukstā pārstrāde). Atjaunošanas piedevas maina RA saistvielu īpašības, lai sasniegtu nepieciešamās mehāniskās īpašības. Parasti tās pievienotas saistvielai, ņemot vērā to, ka šajā procesā nav nepieciešamas nekādas papildu ierīces. Tomēr ir gadījumi, kuros ir iespējams atjaunošanas materiālus pievienot RA materiālā vai maisījumā. Laboratorijas apstākļos visbiežāk izmantotā RA materiāla karsēšanas temperatūra ir 110 °C, ilgums – divas stundas. Kad RA saturs daudzums maisījumā ir augsts (līdz pat 100 %), karsēšanas temperatūru palielina pat virs 155 °C.

2.4. Novecošanās raksturošana

Ceļa seguma ekspluatācijas laikā asfalta saistvielās notiek dažādas fizikāli ķīmiskas izmaiņas, kas pasliktina ceļa seguma stāvokli. Galvenais ceļu segumu novecošanās iemesls ir bitumena oksidācija, tās rezultātā ceļa segumā var rasties nogurumizturības defekti un termoplaiss. Asfalta maisījumu novecošanos var sadalīt divos posmos: īstermiņa novecošanās, kas rodas bitumena iztvaikošanas dēļ maisīšanas un būvdarbu laikā; ilgtermiņa novecošanās, kas rodas oksidācijas un sacietēšanas dēļ. Saistvielu novecošanās pieeja ir noderīga, lai salīdzinātu novecošanās uzņēmību un saprastu novecošanās mehānismus, taču tā neņem vērā minerālmateriālu ietekmi uz oksidāciju un asfalta maisījuma sniegumu. Ilgtermiņa bitumena novecošanās ir lēns process, un tas ir atkarīgs no dažādiem vides faktoriem.

2.5. Dzīves cikla novērtējums

Dzīves cikla novērtējums (angļu val. – *life cycle assesment; LCA*) ir sistematiska metode, lai kvantitatīvi novērtētu preces vai pakalpojuma ietekmi uz vidi. *LCA* apskata visus procesus, kas saistīti ar noteikto produktu, un kvantificē visas iesaistītās ievades un izvades plūsmas sistēmā no produkta “dzimšanas” jeb izejmateriālu ieguves līdz “kapam” jeb produkta dzīves cikla beigām. Vairāki asfalta pētnieki ir izmantojuši *LCA* kā rīku, lai salīdzinātu dažādas pārstrādes alternatīvas un to ietekmi uz vidi. Ceļa segumu dzīves cikla izvērtējumu var iedalīt šādos posmos: izejmateriālu iegūšana; materiālu ražošana; pārvadāšana; būvniecība; izmantošana; uzturēšana; dzīves cikla noslēgums.

3. EKSPERIMENTĀLĀS METODES

Lai novērtētu maisījumus un saistvielas, tika izmantotas standarta testēšanas metodes (3.1. tab.). Tika attīstīta jauna saistvielu ekstrahēšanas metode, lai no maisījuma varētu iegūt četras dažādu saistvielu kārtas. Papildus tika izmantota digitāla attēlu korelācijas metode, lai izveidotu jaunu maisījuma novērtēšanas indikatoru. Izmantojot Furjē transformācijas infrasarkanā spektroskopijas analīzi, tika aprēķināts jauns indekss, kas kvantificē atjaunošanas piedevu ietekmi. Visas iepriekšminētās metodes īsi aprakstītas nākamajās nodaļās.

3.1. Fāžu ekstrahēšanas metode

Šīs metodes galvenais darbības princips ir iegremdēt asfalta paraugu šķīdinātājā uz noteiktu laiku, izšķīdinot noteikta biezuma bitumena ārējo kārtu. Fāžu ekstrahēšanas metode, kas izstrādāta šī promocijas darba gaitā, aprakstīta tālāk tekstā.

- Asfalta maisījums, kas iegūts pēc maisīšanas, tiek atdesēts, paralēli tas tiek irdināts un sadalīts, lai samazinātu daļiņu aglomerāciju.
- 1400 g šī maisījuma tiek ievietoti cilindriskā sietā, četri cilindriski trauki, kas lielāki par sietu, tiek piepildīti ar 1400 ml toluola.
- Cilindriskais siets ar maisījumu tiek lēnām ievietots pirmajā traukā un turēts tajā vienu minūti. Pēc tam tiek noliets toluols, siets tiek ievietots otrajā traukā un turēts tajā divas minūtes. Šis process tiek atkārtots ar trešo un ceturto trauku, un turēšanas periods ir attiecīgi trīs un 60 minūtes.
- Iegūtais šķīdums no visiem četriem traukiem tiek pārliets centrālās iekārtā, lai atbrīvotos no smalkās frakcijas.
- Izmantojot rotācijas ietvaicētāju un filtrēto šķīdumu, iegūst bitumenu saskaņā ar *EN 12697-3*.

Turēšanas posms katram traukam tika noteikts empīriski, lai nodrošinātu, ka katrā slānī tiek iegūts līdzīgs bitumena daudzums; asfalta un toluola daudzumi tika noteikti tādi, lai nodrošinātu pilnīgu asfalta iegremdēšanu, kas ir atkarīga no sieta un trauka izmēriem.

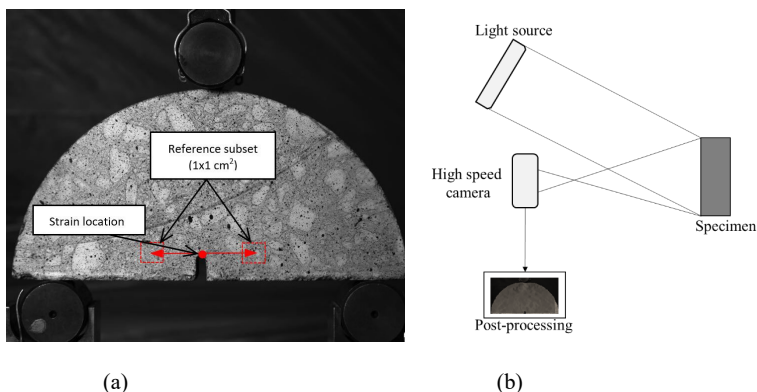
3.1. tabula

Standarta mērījumu metodes

Mērījumu metode	Standarts	Mērītais lielums
Penetrācija un mīkstināšanas punkts	<i>EN 1426, 1427</i>	Saistvielas cietība/mīkstums
Temperatūras un frekvences amplitūdas diapazona tests	<i>EN 14770</i>	Saistvielas stingums
Lineārās amplitūdas diapazona tests	<i>AASHTO TP101</i>	Saistvielas nogurumiztūrbas īpašības
Vairāku slodžu slīdes deformācijas tests	<i>AASHTO TP70</i>	Saistvielas paliekošās deformācijas
Netiešās stiepes stiprība	<i>EN 12697-23</i>	Maisījuma ūdensjutība
Stinguma moduļa mērījums	<i>EN 12697-26</i>	Maisījuma stingums
Parauga termālā sprieguma tests	<i>EN 12697-46</i>	Maisījuma zemas temperatūras plaisāšana
Riteņa slīdes tests	<i>EN 12679-22</i>	Maisījuma augstas temperatūras paliekošās deformācijas
Puscilindra lieces tests	<i>AASHTO TP 124-16</i>	Maisījuma plaisāšanas pretestība
Horizontālās dinamiskā seguma skalošanas tests	<i>CEN/TS 16637-2</i>	Izskalošanās vielas

3.2. Digitālā attēlu korelācija

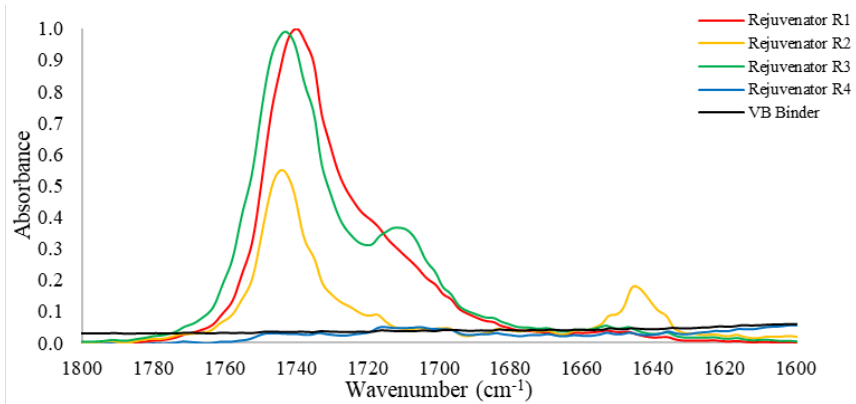
Digitālās attēlu korelācijas (angļu val. – *digital image correlation; DIC*) pamatā ir sekot vieniem un tiem pašiem pikseļu punktiem dažādos deformētos attēlos. Šajā pētījumā tika izmantota augstas izšķirtspējas kamera ar puscilindra lieces mērījuma uzstādījumu (3.1 (b) att.), lai nomērītu pilna lauka deformāciju un analizētu plaisu attīstību paraugā. Ekspozīcijas laiks un fokusa attālums tika iestatīti manuāli katra mērījuma sākumā, lai nodrošinātu optimālo gaišumu mērījumam. Kameras kadrēšanas biežums ir 1000 kadri/sekundē. Mērījuma laikā iegūto attēlu pēcapstrādei tika izmantota *Imetrum's Video GaugeTM* programmatūra. Virtuāli deformācijas standartmēri tika novietoti roba galā, lai noteiktu horizontālo deformāciju (3.1. (a) att.).



3.1. att. (a) Virtuālo deformācijas standartmēru novietojums; (b) digitālu attēlu korelācijas komponentu shematisks attēlojums.

3.3. Furjē transformācijas infrasarkanās spektroskopijas analīze

Bitumena ķīmiskās īpašības var noteikt, izmantojot absorbcijas spektrus, ko var noteikt ar Furjē transformācijas infrasarkanās (FTIR) spektroskopijas analīzi (angļu val. – *Fourier transform infrared spectroscopy analysis*). 3.2. attēlā redzams ar FTIR iegūtais spektrs, un var redzēt izteiktu maksimumu pie 1740 cm^{-1} , kas atbilst atjaunošanas piedevai. Var aprēķināt tangenciālo laukumu starp 1720 cm^{-1} un 1760 cm^{-1} ; aprēķinot šo laukumu visiem bitumena paraugiem un izdalot ar references laukumu ($1400\text{—}1470\text{ cm}^{-1}$), var definēt jaunu parametru – atjaunošanas indeksu I_R .



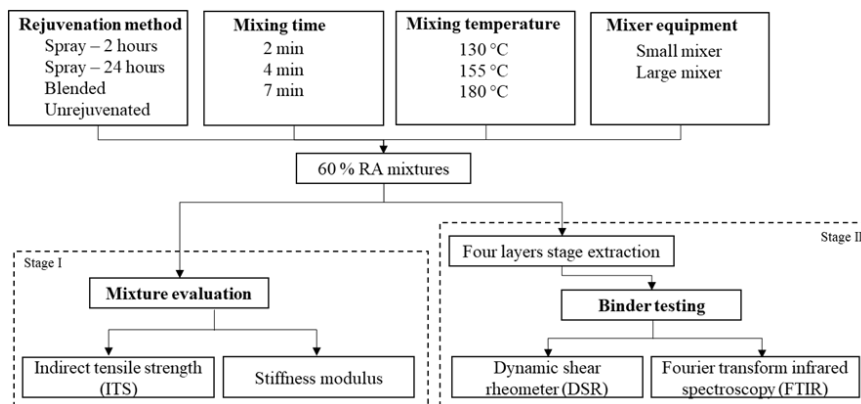
3.2. att. Normēts FTIR spektrs visām apskatītajām atjaunošanas piedevām.

4. MAISIŠANAS PARAMETRU PĒTĪJUMS

Šajā nodaļā aprakstīti rezultāti un pētījumu analīze par maisīšanas parametru ietekmi uz mehāniskajām īpašībām maisījumiem ar augstu RA saturu, kas izgatavoti laboratorijas apstākļos. Pētījumā veiktos eksperimentus var iedalīt divos posmos (4.1. att.). Pirmajā posmā tiek novērtētas asfalta mehāniskās īpašības, otrajā – raksturotas ekstrahēto saistvielu reoloģiskās un ķīmiskās īpašības.

Lai sagatavotu maisījumu ar 60 % RA sastāvu (*AC-16* standarta maisījumā), tika izmantotas divas daļas reciklētā asfalta (RA 0/11 un RA 11/22; Šveices izcelsmes) neapstrādāti minerālmateriāli, 70/100 penetrācijas klases bitumens (5,5 % pēc svara) un 4,8 % atjaunošanas piedevas (taleļlas bāze). Maisījuma novērtēšanai tika izmantots netiešās stiepes stiprības un stinguma tests, saistvielu īpašību raksturošanai tika izmantots dinamiskais bīdes reometrs un Furjē transformācijas infrasarkanās spektroskopijas analīze.

Maisījumu nomenklatūra balstīta maisīšanas parametra izvēlē, piemēram, atjaunošanas metode (“smidzināts” – 2 stundas / 24 stundas, atjaunošanas piedeva izsmidzināta un atjaunošanas piedeva, kam seko 2 stundu / 24 stundu miera posms; “sajaukts” – atjaunošanas piedeva sajaukta ar svaigām saistvielām; “neatjaunots” – nav nekādu atjaunošanas piedevu), tiek fiksēts arī maisīšanas laiks (2 min, 4 min vai 7 min), maisīšanas temperatūra (130 °C, 155 °C vai 180 °C) un maisīšanas iekārta (mazais vai lielais maisītājs).



4.1. att. Eksperimenta plāns.

4.1. Volumetriskā analīze

Volumetriskās analīzes rezultāti apkopoti 4.1. tabulā. Gaispildīto poru saturs maisījumam “Smidzināts – 2 stundas” bija par 33,1 %, maisījumam “Smidzināts – 24 stundas” par 19,9 % augstāks nekā maisījumam “Sajaukts”. 4.1. tabulā redzams, ka, palielinot maisīšanas laiku no divām uz četrām minūtēm, tiek nedaudz samazināts poru saturs. Maisīšanas laika palielināšana no divām uz četrām minūtēm palielināja arī maisījuma homogenitāti, kas nozīmē uzlabotu blīvēšanos. Arī maisīšanas temperatūras palielināšana samazināja maisījuma poru saturu.

Maisīšanas temperatūru iedalījums Tukija-Krāmera grupās rāda, ka temperatūras palielināšana virs 155 °C būtiski ietekmē maisījuma blīvēšanās īpašības. Poru saturs maisījumiem, kas mikstē mazajā mikserī, bija ievērojami zemāks nekā maisījumiem, kas mikstēti lielajā mikserī. Visi citi parametri abiem maisījumiem bija vienādi, atšķirība poru saturā liecina, ka izmantotā ierīce ietekmē RA saistvielu un neapstrādātu saistvielu sajaukšanās pakāpi.

4.1. tabula

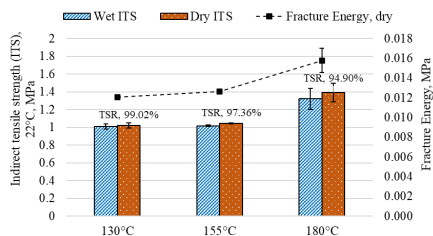
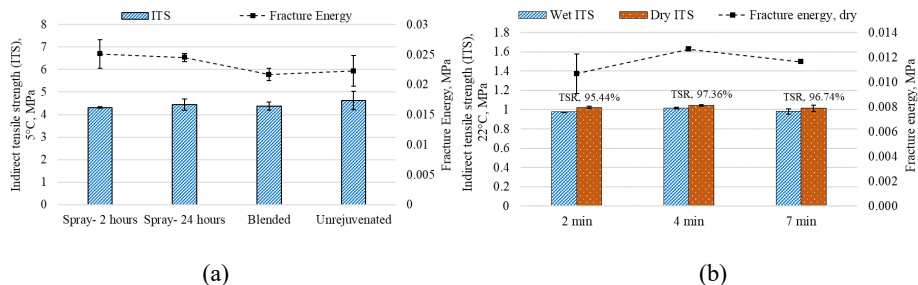
Maisījumu volumetriskās īpašības

Maisījumi	Poru saturs, %	VMA, %	VFB, %	Tukija-Krāmera grupa
Atjaunošanas metodes				
Smidzināts 2 stundas	2,7	16,0	83,5	A
Smidzināts 24 stundas	2,4	15,7	84,8	A
Sajaukts	2,0	15,3	87,0	A
Neatjaunots	1,8	15,1	88,0	A
Maisīšanas laiks				
2 min	3,3	16,4	80,1	A
4 min	2,8	16,1	82,7	A
7 min	2,9	16,1	81,9	A
Maisīšanas temperatūra				
130 °C	3,1	16,3	80,9	A
155 °C	2,8	16,1	82,7	A
180 °C	2,1	15,4	86,6	B
Maisīšanas ierīce				
Mazais mikseris	2,0	15,3	87,0	A
Lielais mikseris	2,8	16,1	82,7	B

4.2. Netiešās stiepes stiprības tests

4.2. (a) attēlā redzami netiešās stiepes stiprības (angļu. val. – *indirect tensile strength; ITS*) mērījumu rezultāti dažādām atjaunošanas metodēm. Tika novērots, ka neviena no atjaunošanas metodēm neietekmē maisījumu netiešo stiepes stiprību. Maisījumiem *Smidzināts – 2 stundas* un *Smidzināts – 24 stundas* bija nedaudz augstāka plīsumu enerģija, ko var skaidrot ar noliektu RA saistvielu augstāko aktivāciju gadījumos, kuros atjaunošanas piedevas tika izsmidzināta tieši uz RA materiāla, nevis sajauktas ar svaigām saistvielām.

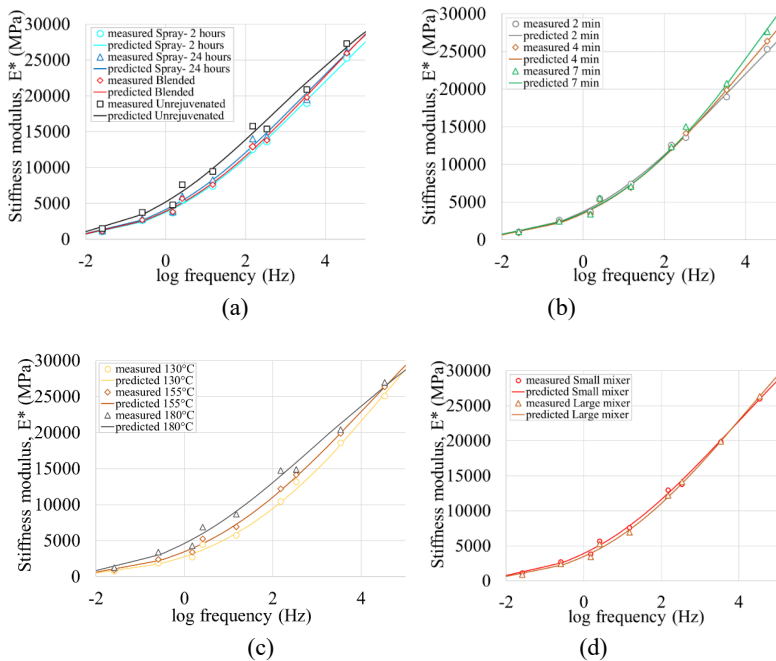
4.2. (b) attēlā redzami netiešās stiepes stiprības mērījumu rezultāti dažādiem maisīšanas laikiem. Maisīšanas laiks, līdzīgi kā atjaunošanas metode, neietekmēja netiešās stiepes stiprību ne sausiem, ne ar ūdeni apstrādātiem paraugiem. Maisījumu augstās stiepes stiprības proporcijas (angļu val. – *tensile strength ratio; TSR*) liecina par ļoti zemiem mitruma ietekmes bojājumiem. *ITS* mērījumu rezultāti 22 °C temperatūrā dažādām maisījumu maisīšanas temperatūrām redzami 4.3. (c) attēlā. Redzams, ka maisījumam, kas izgatavots 180 °C temperatūrā, ir augstāka *ITS* vērtība, salīdzinot ar maisījumiem, kas izgatavoti 130 °C un 155 °C temperatūrā, kuru *ITS* vērtības ir samērā līdzīgas. Tas nozīmē, ka maisījuma stingums būtiski pieaug izteiktas oksidācijas ietekmē, kas notiek, ja temperatūra ir lielāka par 155 °C.



4.2. att. ITS rezultāti dažādām: (a) atjaunošanas metodēm; (b) maisīšanas laikiem; (c) maisīšanas temperatūrām. Kļūdu nogriežņi norāda standartnovirzi.

4.3. Asfalta maisījumu stinguma modulis

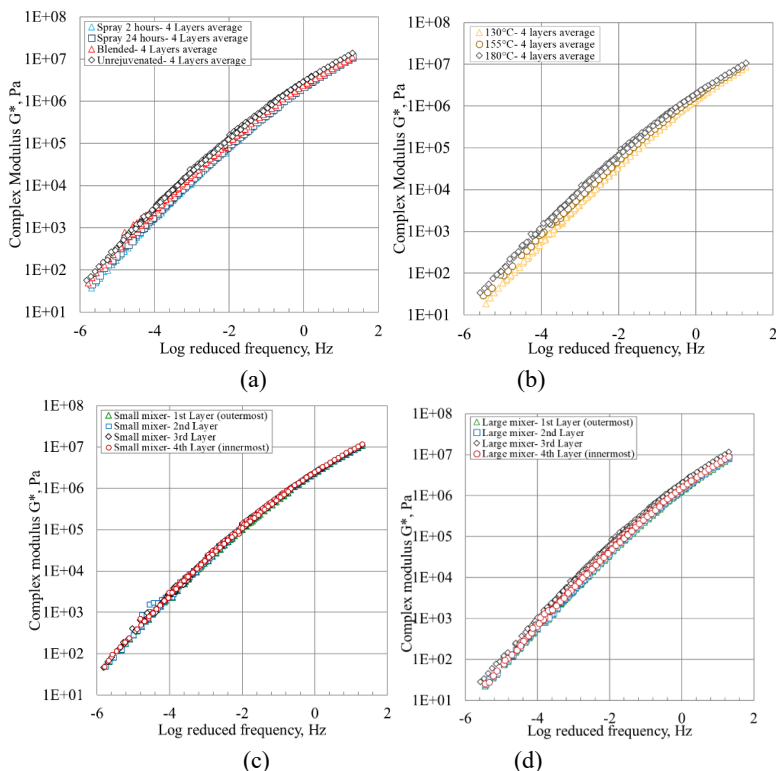
Stinguma moduļa mērījuma tika veikti, lai novērtētu maisījumu stinguma izmaiņas, variējot maisīšanas parametrus. Augstāka stinguma moduļa vērtība nozīmē, ka maisījumam ir augstāks stingums. 4.3. (a) attēlā redzams, ka visi trīs maisījumi, kuru sastāvā ir atjaunošanas piedevas, ir ar mazāku stingumu nekā neatjaunotais maisījums. Atjaunošanas piedevām ir saistvielas mīkstinošs efekts, kas samazina maisījuma stingumu. 4.3. (b) attēlā redzams, ka maisīšanas laika palielināšana neietekmēja maisījuma stinguma moduli. Apskatot maisīšanas temperatūras ietekmi uz maisījumu, 4.3. (c) attēlā redzamas būtiskas atšķirības starp maisījumiem vidējā stinguma zonā, turklāt temperatūras paaugstināšana palielina stingumu, ko skaidro ar augstāku oksidāciju un ar to saistīto novecošanos. 4.3. (d) attēlā redzams, ka stinguma moduļa vērtības maisījumam mazajā mikserī ir augstākas nekā maisījumam lielajā mikserī, tomēr nevienā no stinguma zonām atšķirības nav ievērojamas.



4.3. att. Stinguma moduļa līknes dažādām: (a) atjaunošanas metodēm; (b) maisīšanas laikiem; (c) maisīšanas temperatūrām; (d) maisīšanas ierīcēm.

4.4. Saistvielu dinamiskais modulis

Tika noteikts vidējais dinamiskais modulis četriem slāņiem, lai noteiktu kopējo atjaunošanas metodes ietekmi (4.4. (a) att.). Smidzinot atjaunošanas piedevas, tiek iegūts zemāks kopējais bitumena stingums (skatīt salīdzinājumu 4.4. (a) attēlā starp *Smidzināts – 2 stundas*, *Smidzināts – 24 stundas* un *Sajaukts*). Tas nozīmē, ka atjaunošanas piedevu mīkstinošais efekts bija izteiktāks, kad tās tika izsmidzinātas. 4.4. (b) attēlā redzams, ka maisīšanas temperatūras palielināšana pārbīda dinamiskā moduļa līkni augšup, liecinot par lielāku bitumena novecošanos, tas sakrīt ar mikseru testu rezultātiem. Mikseri ar iekšējo sildīšanu parasti tiek uzskatīti par pārākiem, salīdzinot ar maziem mikseriem bez sildīšanas funkcijas. 4.4. (c) attēlā redzams, ka maisījums mazajā mikserī ir ar viendabīgu stingumu visos četros slāņos, savukārt maisījumiem lielajā mikserī ir daudz plašāks stinguma intervāls starp slāņiem (4.4. (d) att.). Tas var liecināt par nepilnīgu neapstrādāta bitumena un RA bitumena sajaukšanu.



4.4. att. Vidējais dinamiskais modulis dažādām: (a) atjaunošanas metodēm; (b) maisīšanas temperatūrām; dinamiskais modulis četriem saistvielu slāņiem: (c) mazajā mikserī; (d) lielajā mikserī.

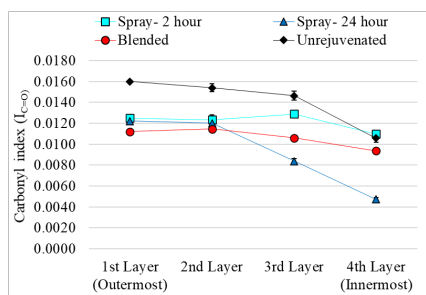
4.5. FTIR analīze

Karbonila indekss apraksta bitumena novecošanās pakāpi. 4.5. (a) attēlā redzams, ka maisījumiem, kuros izmantotas atjaunošanas piedevas, ir zemāks karbonila indekss, salīdzinot ar neatjaunoto maisījumu, izņemot iekšējo slāni. To var skaidrot ar saistvielu ķīmiskām izmaiņām, kas notiek, pievienojot atjaunošanas piedevas. 4.5. (b) attēlā redzams, ka atjaunošanas piedevas tika uztvertas visos slāņos (par to liecina I_R vērtības) visiem maisījumiem, izņemot neatjaunotajam maisījumam, kurā $I_R \approx 0$.

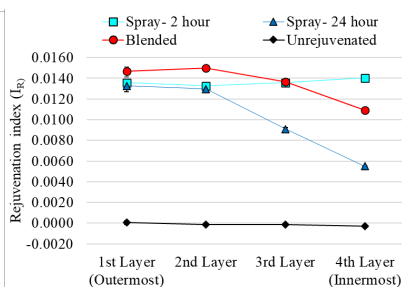
Karbonila indekss 180 °C maisīšanas temperatūras maisījumam ir zemāks nekā maisījumiem, kas izgatavoti 130 °C un 155 °C temperatūrā, izņemot ārējo kārtu (4.5. (c) att.). Divu dažādu saistvielu klātbūtne varētu būt viens no iemesliem, kāpēc karbonila indekss nepieaug, palielinot maisīšanas temperatūru.

Maisījuma, kas izgatavots mazajā mikserī, karbonila indekss bija būtiski augstāks nekā maisījumam, kas izgatavots lielajā mikserī (4.5. (d) att.) Augstāks karbonila indekss varētu liecināt par pārmērīgu oksidāciju un ar to saistīto novecošanos, un tas saistīts ar atklāto

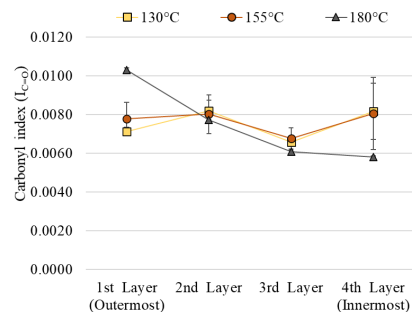
maisīšanas sistēmu. Maisījuma, kas izgatavots mazajā mikserī, atjaunošanas indekss ir nedaudz augstāks nekā maisījumam, kas izgatavots lielajā mikserī, visiem slāņiem, izņemot iekšējo (4.5. (f) att.). Neskatoties uz to, ka atjaunošanas indekss norādīja uz atjaunošanas piedevu klātbūtni bitumenā, iepriekš aprakstītie analīzes sarežģītumi liecina par to, ka atjaunošanas indekss ne obligāti norāda atjaunošanas piedevu daudzumu bitumenā.



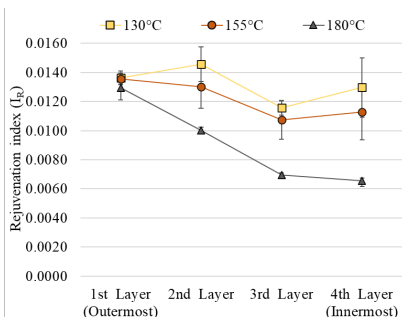
(a)



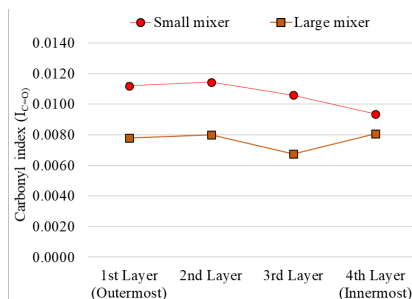
(b)



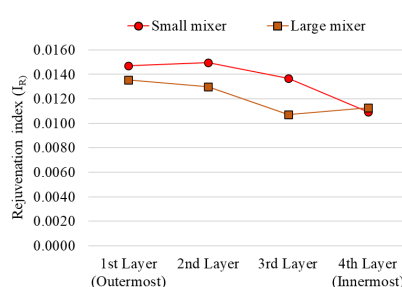
(c)



(d)



(e)



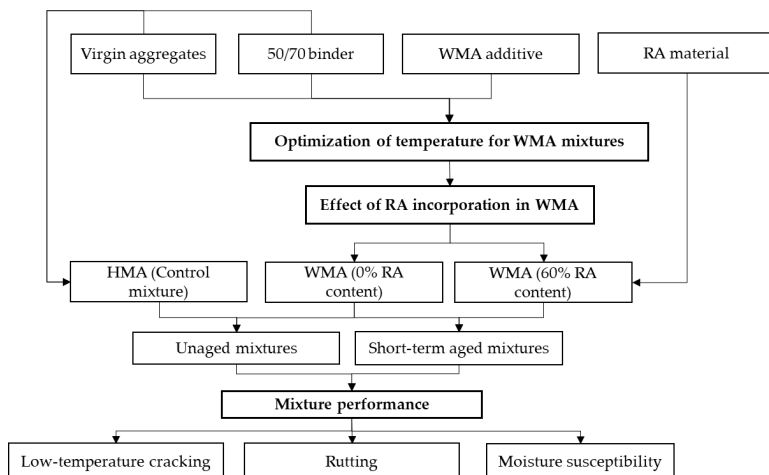
(f)

4.5. att. No FTIR spektra analīzes rezultātiem aprēķinātie indeksi dažādām atjaunošanas metodēm, maisīšanas temperatūrām un maisīšanas ierīcēm.

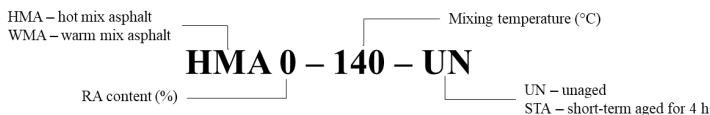
5. SILTA MAISĪJUMA ASFALTS AR AUGSTA RECIKLĒTĀ ASFALTA SATURU

Šajā nodaļā aprakstīti rezultāti pētījuma sadaļai, kurā salīdzināts tradicionāla karsta maisījuma asfalta (angļu val. – *hot mix asphalt*; *HMA*) sniegums ar silta maisījuma asfaltu (angļu val. – *warm mix asphalt*; *WMA*) ar 60 % RA saturu. Šim pētījumam izveidotais eksperimenta plāns redzams 5.1. attēlā. RA materiāls šim pētījumam iegūts asfalta rūpnīcā Vangažos, Latvijā, neapstrādātās saistvielas – “*ORLEN Asphalt*” Mažeikos, Lietuvā. Visiem *WMA* maisījumiem tika izmantota ķīmiska piedeva ar piegādātāja ieteikto 0,4 % (ūdens/saistviela) devu.

Tika noteikts, ka optimālais saistvielas saturs ir 5,5 % (pēc svara) no minerālmateriāliem, izmantojot Māršala metodi. Visi maisījumi tikai iegūti, izmantojot divas sagatavošanas metodes, lai salīdzinātu svaigu maisījumu ar īslaicīgi novecinātu maisījumu. Lai simulētu novecošanu, maisījumi tika pārklāti ar pannu un ievietoti krāsnī uz četrām stundām saskaņā ar *EN 12697-52* standartu. *HMA* maisījumi tika turēti 135 °C temperatūrā, *WMA* – 120 °C. Ir svarīgi minēt, ka apzīmējums “*WMA*” attiecas tikai uz maisījumiem, kas sagatavoti, izmantojot ķīmiskas piedevas, maisījumu nomenklatūra redzama 5.2. attēlā.



5.1. att. Eksperimentu plāns.



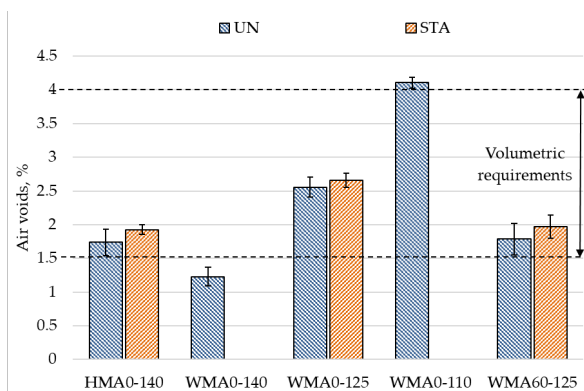
5.2. att. Maisījumu nomenklatūra.

5.1. Volumetriskā analīze

Visu maisījumu volumetriskās analīzes rezultāti redzami 5.3. attēlā. Maisījuma *WMA0-140-UN* poru saturs bija zemāks nekā maisījuma *HMA0-140-UN*. Šajā gadījumā piedevu pievienošana, nemainot temperatūru, uzlaboja maisījuma blīvēšanos. Šis rezultāts sakrīt ar sagaidīto, zinot, ka piedevas uzlabo maisījumu blīvēšanos, iestrādājamību un minerālmateriālu pārklāšanu.

Maisījums *WMA0-125-UN* uzrādīja augstāku poru saturu nekā *WMA0-140-UN*, *WMA0-110-UN* uzrādīja augstāku poru saturu nekā *WMA0-125-UN*. *WMA* maisīšanas temperatūru samazināšana palielināja poru saturu maisījumos, jo, samazinot temperatūru, palielinās bitumena viskozitāte un samazinās blīvēšanās. No visiem sagatavotajiem *WMA* maisījumiem tikai maisījuma *WMA0-125-UN* poru saturs atbilst VSIA “Latvijas Valsts ceļi” specifikācijā norādītajam poru saturam *WMA* maisījumiem. Pēc šiem rezultātiem tika noteikta optimālā *WMA* maisījumu maisīšanas temperatūra – 125 °C.

Maisījuma *WMA60-125-UN* poru saturs bija par 0,8 % zemāks nekā *WMA0-125-UN*, savukārt maisījuma *WMA60-125-STA* poru saturs bija par 0,6 % zemāks nekā *WMA0-125-STA*. Tas nozīmē, ka 60 % RA materiāla iekļaušanas *WMA* maisījuma sastāvā samazināja maisījuma poru saturu.

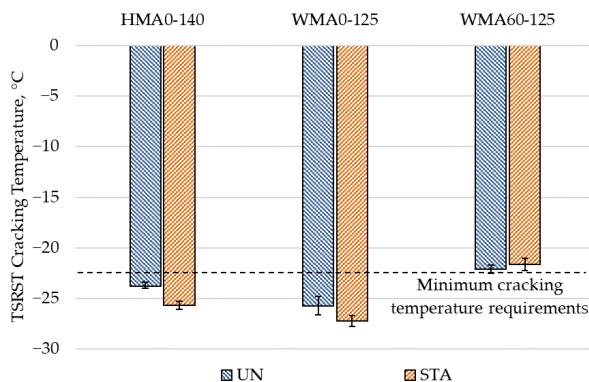


5.3. att. Volumetriskās analīzes rezultāti.

5.2. Sniegums zemā temperatūrā

Zemāka plīsuma temperatūra liecina par labāku sniegumu attiecībā pret zemas temperatūras plaisāšanu. Var redzēt, ka *WMA* maisījumiem (*WMA0-125-UN* un *WMA0-125-STA*) ir zemāka plaisāšanas temperatūra (attiecīgi par 1,9 °C un 1,55 °C) nekā *HMA* maisījumiem (*HMA0-125-UN* un *HMA0-125-STA*).

60 % RA materiāla iekļaušana ir būtiski samazinājusi *WMA* maisījumu izturību pret zemas temperatūras plaisāšanu. *WMA60-125-UN* un *WMA60-125-STA* maisījumiem bija būtiski zemākas plaisāšanas temperatūras (attiecīgi 3,6 °C un 5,9 °C) nekā *WMA0-125-UN* un *WMA0-125-STA* maisījumiem. Tas skaidrojams ar oksidēto saistvielu (no RA materiāliem) stingumu, kas maisījumu padara trauslāku.

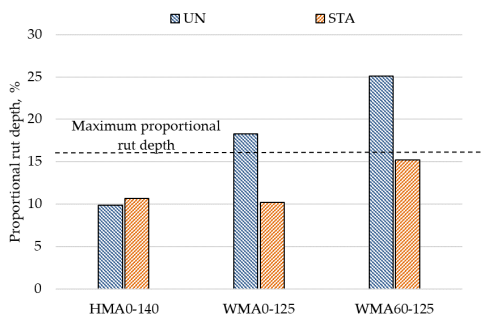


5.4. att. Zemas temperatūras plaisāšanas testu rezultāti.

5.3. Riteņa sliedes testa īpašības

Maisījuma *WMA0-125-UN* proporcionālais sliedes dziļums ir par 8,4 % augstāks nekā maisījumam *HMA0-140-UN* (5.5. att.). Saistvielu modifikācijas ietekmē samazinātais maisījuma stingums palielināja riteņa sliedes uzņēmību, ietekme uz *WMA* maisījumiem bija lielāka nekā uz *HMA* maisījumiem.

60 % RA materiāla iekļaušana palielināja riteņa sliežu dziļumu par 6,8 % *WMA* maisījumos. Šis gan atšķiras no kopējās tendences, kurā RA materiāli uzlabo riteņa sliedes pretestību. Zemāku RA maisījumu riteņa sliedes pretestību varētu skaidrot ar plūsmas koeficienta atšķirībām smalkiem minerālmateriāliem RA maisījumos un svaigos maisījumos, RA maisījumos tas ir zemāks. Svaigos *WMA* maisījumos riteņa sliedes dziļums pēc īslaicīgas novecināšanas bija ievērojami samazināts un līdzīgs *HMA* references maisījuma riteņa sliedes dziļumam. Tikai īslaicīgi novecināti *WMA* maisījumi atbilda proporcionālajiem riteņa sliedes dziļuma kritērijiem, kas noteikti VSIA “Latvijas Valsts ceļi” specifikācijā.

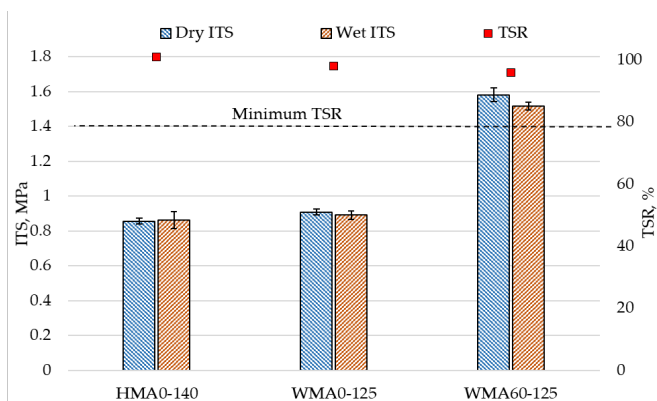


5.5. att. Proportionālie riteņa sliedes dziļuma rezultāti.

5.4. Ūdensjutība

Visu maisījumu netiešās stiepes stiprība pēc maisījumu apstrādes ar ūdeni būtiski nemainījās (5.6. att). Tas nozīmē, ka zemāka maisīšanas temperatūra *WMA* maisījumos būtiski nemainīja mitruma ietekmi uz maisījumu sniegumu. Visi maisījumi atbilst minimālajiem jeb 80 % netiešās stiepes stiprības proporcijas kritērijiem.

WMA maisījums *WMA60-125*, kura sastāvā ir 60 % RA materiāli, uzrādīja par 74 % augstāku sauso netiešās stiepes stiprību un par 70 % – slapjo, salīdzinot ar neapstrādātiem *WMA* maisījumiem. To nodrošina RA materiālos esošās oksidētās saistvielas, tās palielina maisījuma stingumu, kas savukārt palielina maisījuma netiešās stiepes stiprību. RA materiālu iekļaušana sastāvā būtiski neietekmēja *WMA* maisījumu ūdensjutību.



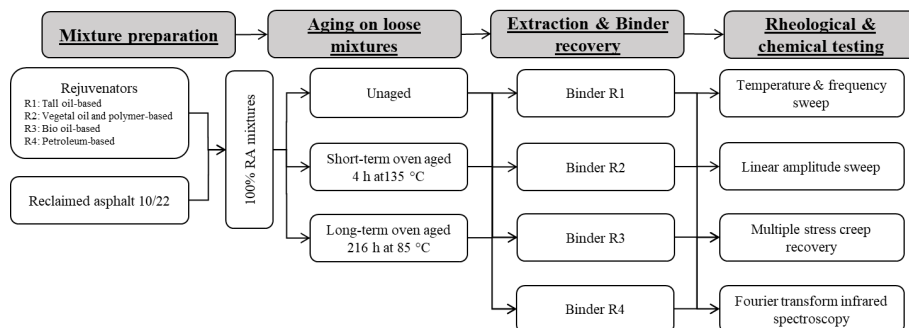
5.6. att. Ūdensjutības rezultāti.

6. ATJAUNOŠANAS PIEDEVU NOVECINĀŠANAS PĒTĪJUMI

Šajā nodaļā aprakstīta mākslīgas novecināšanas ietekme uz 100 % RA maisījumu ar dažādām atjaunošanas piedevām ķīmiskajām un reoloģiskajām īpašībām. 6.1. attēlā redzams eksperimenta plāns. RA materiāls iegūts asfalta rūpnīcā Vangažos, Latvijā, neapstrādātās saistvielas ir 50/70 penetrācijas klases bitumens, iegūts “ORLEN Asphalt” Mažeikos, Lietuvā. 100 % RA maisījumi izgatavoti tā, lai tie atbilstu VSIA “Latvijas Valsts ceļi” specifikācijas AC-16 standartam.

Šajā pētījumā tika apskatīti četri komerciāli bieži izmantotu atjaunošanas piedevu veidi: taleļļas bāzes (R1); augu eļļas un polimēru bāzes (R2); bioeļļas bāzes (R3); naftas bāzes (R4) atjaunošanas piedevas. Piegādātāja ieteiktā deva visām atjaunošanas piedevām bija aptuveni 5 % no bitumena satura.

Novecināšanas simulācija tika veikta nesablīvētiem maisījumiem. Pēc novecināšanas tika ekstrahētas saistvielas un kopā iegūti 12 bitumena paraugi ar dažādām atjaunošanas piedevām novecināšanas parametriem. Paraugu nomenklatūra ir atkarīga no novecināšanas apstākļiem (VB – neapstrādāts bitumens, UN – nenovecināts, STA – īslaicīgi novecināts, LTA – ilglaicīgi novecināts) un atjaunošanas piedevu veida (R1, R2, R3 vai R4).

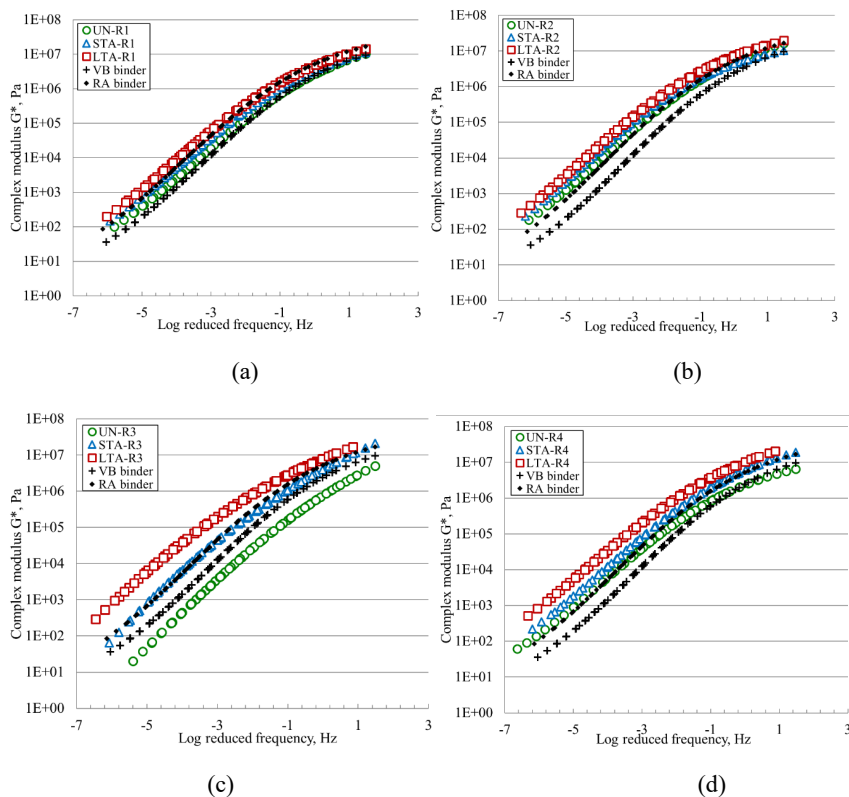


6.1. att. Pētījuma plāns.

6.1. Saistvielu dinamiskie moduļi

Dinamiskā moduļa pieaugums liecina par bitumena stinguma palielināšanos, to izraisa paaugstināta asfaltēna/maltēna proporcija, kas rodas, bitumenam novecojot. Novecināšanas simulācijas ietekmi uz maisījumiem var redzēt dinamisko bīdes moduļu pieaugumā plašā frekvenču spektrā (6.2. att.). Redzams, ka visiem bitumena paraugiem, izņemot R4, dinamiskā moduļa pieaugums ar novecināšanu īpaši izteikts ir pie zemām frekvencēm (attiecīgi augstām temperatūrām). Tas rāda, ka ilgtermiņā lielākajai daļai atjaunošanas piedevu (ar taleļļas, augu eļļas un polimēru, bioeļļas bāzi) ir redzami uzlabojumi sniegumā tieši zemās temperatūrās, samazinot bitumena stinguma izmaiņas zemās temperatūrās. R4 parauga atjaunošanas piedeva

ir ar naftas bāzi, un tā bija mazāk efektīva nekā citas atjaunošanas piedevas, lai uzlabotu ilglaicīgu zemas temperatūras sniegumu.



6.2. att. Dinamiskā moduļa līknes 20 °C temperatūrā dažādām atjaunošanas piedevām:
(a) *R1*; (b) *R2*; (c) *R3*; (d) *R4*.

6.2. Saistvielu nogurumizturība

6.1. tabulā redzams, ka abos apskatītajos deformācijas līmeņos visu nenovecināto bitumena paraugu (izņemot *UN-R3*) noguruma ilgizturība ir augstāka nekā neapstrādātām saistvielām. Tas ir saistīts ar nenovecināto bitumena paraugu augstāku stingumu, kas palielina noguruma ilgizturību. Ar atjaunošanas piedevām *R3* modificēto saistvielu viskozitāte ir augstāka nekā neapstrādātām saistvielām, kas savukārt nozīmē to, ka noguruma ilgizturība *UN-R3* paraugam ir zemāka vairākos deformācijas līmeņos.

Pēc īslaicīgas novecināšanas visiem četriem bitumena paraugiem bija augstāka noguruma ilgizturība nekā nenovecinātajiem paraugiem – gan 2,5 %, gan 5 % deformācijai. Pēc ilglaicīgas novecināšanas paraugiem *R2* un *R4* noguruma ilgizturība samazinājās, savukārt paraugiem *R1* un *R3* – palielinājās. Tas varētu liecināt par to, ka atjaunošanas piedevas ar taleļļas (*R1*) un

bioeļļas bāzi (*R3*) vairāk uzlabo ilgtermiņa bitumena nogurumizturību nekā atjaunošanas piedevas ar augu eļļas (*R2*) vai naftas (*R4*) bāzi.

6.1. tabula

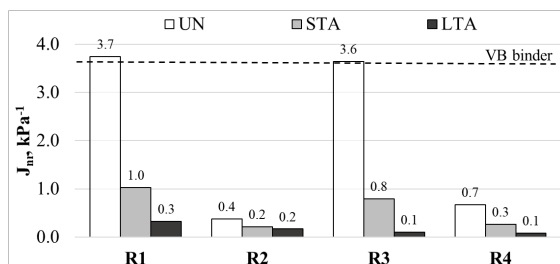
Ar VEDC modeli aprēķinātā noguruma ilgzturība 2,5 % un 5 % deformācijai

Saistviela	UN		STA		LTA	
	2,5 % N_f	5 % N_f	2,5 % N_f	5 % N_f	2,5 % N_f	5 % N_f
VB Saistviela	41,812	4898	×	×	×	×
R1	76,546	8414	97,508	9125	129,223	10,652
R2	106,019	9073	168,539	12,494	135,006	9502
R3	19,535	2993	82,058	8523	181,708	10,433
R4	112,143	10,835	199,611	11,875	134,771	7767

6.3. Saistvielas paliekošās deformācijas

Neelastīgas slīdes deformācijas J_{nr} mērījumu rezultāti no vairāku slodžu slīdes deformācijas testiem ar 3,2 kPa slodzi redzami 6.3. attēlā. Zemākas bitumena J_{nr} vērtības liecina par labākiem maisījumu riteņa slīdes rādītājiem. Nenovecinātiem paraugiem *R1* un *R3* J_{nr} vērtība bija augstāka nekā pārējiem diviem paraugiem. Tas nozīmē, ka bitumena paraugi, kas modificēti ar taleļļu (*R1*) un bioeļļu (*R3*) ir jutīgāki pret paliekošajām deformācijām nekā citas saistvielas.

Tomēr paraugu *R1* un *R3* J_{nr} vērtības bija gandrīz vienādas ar neapstrādāta bitumena J_{nr} vērtību, kas liecina par to, ka nenovecinātiem paraugiem ir tādi paši paliekošo deformāciju rādītāji kā neapstrādātam bitumenam. Īslaicīgi novecinātiem maisījumiem (*STA*) J_{nr} vērtība bija būtiski zemāka, kas nozīmē, ka bitumena oksidācija īslaicīgas novecināšanas procesā var būtiski uzlabot augstas temperatūras deformācijas pretestību. Pēc ilglaicīgas novecināšanas redzams vēl lielāks J_{nr} vērtības kritums, kas liecina par to, ka ir palielinājies saistvielu stingums, kas savukārt palielina bitumena paliekošo deformāciju pretestību.



6.3. att. Neelastīgas slīdes deformācijas J_{nr} mērījumu rezultāti no vairāku slodžu slīdes deformācijas testiem 60 °C temperatūrā.

6.4. Bitumena ķīmisko īpašību raksturojums

6.2. tabulā var redzēt, ka karbonila indeksa vērtība nenovecinātām saistvielām ar atjaunošanas piedevām ir augstāka nekā neapstrādātām saistvielām (0,1). Augstāks indekss šajos paraugos liecina par augstāku saistvielu novecošanas pakāpi RA saistvielu klātbūtnes dēļ. Pēc īslaicīgas

novecināšanas saistvielas ir vairāk oksidējušās, tāpēc tiek sagaidīts augstāks karbonila indekss. Pretēji gaidītajam, pēc īstermiņa novecināšanas visu bitumenu paraugu karbonila indekss samazinājās. To varētu skaidrot ar specifisko paraugu īpašībām vai to, ka īstermiņa saistvielu novecināšana nebija pietiekama, lai novērotu ievērojamu karbonila indeksa pieaugumu.

Pēc ilgtermiņa novecināšanas visu paraugu karbonila indekss pieauga, salīdzinot ar īstermiņa novecināšanu. Tas liecina par to, ka pēc ilglaicīgas novecināšanas parādās ievērojams karbonila maksimuma intensitātes pieaugums. Tomēr, salīdzinot ar nenovecinātiem bitumena paraugiem, *R1*, *R3* un *R4* karbonila indeksi bija nedaudz lielāki, savukārt *R2* paraugiem tie bija līdzīgi gan ilglaicīgi novecinātam, gan nenovecinātam paraugam. Nekonsekventie rezultāti varētu liecināt par to, ka atjaunošanas piedevas klātbūtne saistvielās ietekmē karbonila indeksus.

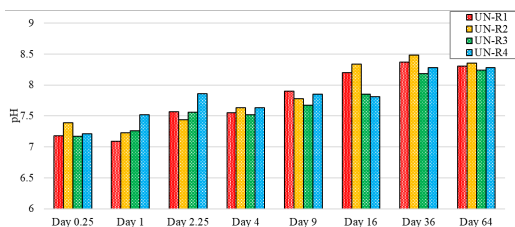
6.2. tabula

Normētu karbonila indeksu spektra aprēķinu rezultāti

Materiāls	Novecināšanas stāvoklis	Vidējais karbonila indekss ($I_C = o$)	SD	Vidējais sulfonila indekss ($I_S = o$)	SD
<i>VB</i>	<i>UN</i>	0,10	0,005	1,20	0,108
<i>R1</i>	<i>UN</i>	0,20	0,009	1,93	0,364
	<i>STA</i>	0,17	0,018	1,56	0,045
	<i>LTA</i>	0,22	0,004	1,69	0,010
	<i>UN</i>	0,18	0,017	1,71	0,164
<i>R2</i>	<i>STA</i>	0,17	0,003	1,40	0,020
	<i>LTA</i>	0,18	0,004	1,57	0,031
	<i>UN</i>	0,18	0,007	1,57	0,075
<i>R3</i>	<i>STA</i>	0,17	0,004	1,69	0,063
	<i>LTA</i>	0,23	0,063	1,64	0,301
	<i>UN</i>	0,16	0,003	1,47	0,025
<i>R4</i>	<i>STA</i>	0,11	0,005	2,46	0,035
	<i>LTA</i>	0,18	0,017	1,65	0,049

6.5. Horizontālā dinamiskā seguma skalošana

pH izmaiņas horizontālās dinamiskās seguma skalošanas testa laikā visiem paraugiem ar 100 % RA saturu un dažādām atjaunošanas piedevām redzamas 6.4. attēlā. Rezultāti rāda, ka nav būtisku atšķirību starp pH dažādiem maisījumiem. 64. dienā visiem asfalta maisījumiem pH bija starp 8,28 un 8,35. Paraugu *UN-R1*, *UN-R2*, *UN-R3*, *UN-R4* elektriskā vadītspēja bija attiecīgi 304–561 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 389–721 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 336–597 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 380–755 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dažādos laikos.



6.4. att. Skalotu paraugu pH horizontālās dinamiskās seguma skalošanas testa laikā.

7. 100 % RECIKLĒTU MAISĪJUMU ĪPAŠĪBAS

Šajā nodaļā aprakstīts 100 % RA maisījuma ar trim dažādām atjaunošanas piedevām riteņa sliedes un plaisāšanas pretestības salīdzinājums ar tradicionālo *HMA*. Papildu pētījuma mērķis ir nomērīt asfalta paraugu virsmas deformāciju, izmantojot bezkontakta digitālo attēlu korelāciju un salīdzināt korelāciju starp optisko horizontālo deformāciju un tradicionāliem enerģijas parametriem plīsumu testos.

RA materiāls iegūts asfalta rūpnīcā Vangažos, Latvijā, neapstrādātas saistvielas ir 50/70 penetrācijas klases bitumens, iegūts “*ORLEN Asfalt*” Mažeikos, Lietuvā. 100% RA maisījumi taisīti tā, lai tie atbilstu VSIA “Latvijas Valsts ceļi” specifikācijas *AC-16* standartam. Šajā pētījumā 100 % RA maisījumos tika izmantotas trīs populāras atjaunošanas piedevas: ar taleļļas bāzi (*R1*); ar augu eļļas un polimēru bāzi (*R2*); ar bioeļļas bāzi (*R3*). Visām trim atjaunošanas piedevām tika izmantota piegādātāja ieteiktā deva – 5 %.

7.1. Riteņa sliedes rādītāji

7.1. tabulā apkopoti riteņa sliedes slīpuma testa rezultāti 100 % RA maisījumiem ar trim dažādām atjaunošanas piedevām (*R1*, *R2* un *R3*) un *HMA* maisījumam (*C*) salīdzināšanai. Paraugiem *R1* un *R2* bija zemi riteņa sliedes izturības rādītāji, paraugi sasniedza maksimālo riteņa sliedes dziļumu pēc 2650 un 4750 cikliem. *R3* maisījums uzrādīja daudz labāku pretestību pret riteņa sliedes deformācijām, maksimālo sliedes dziļumu sasniedzot pēc 7350 cikliem. Maisījums *C* savukārt izturēja 10 000 ciklus un uzrādīja būtiski augstāku riteņa sliedes pretestību nekā visi 100 % RA maisījumi.

Maisījumiem, kuriem tests tika pārtraukts, nesasniedzot 10 000 ciklus, sliedes dziļums tika aprēķināts no lineārās riteņa sliedes deformācijas līknes daļas pēc *EN 12697-22*. Riteņa sliedes dziļums ir aprēķināts deformācijām, kas izveidojušās starp 5000 un 10 000 ciklu, tāpēc netiek ņemta vērā sākotnējā konsolidācija, savukārt tiek ņemta vērā deformācija testa sekundārajā fāzē.

7.1. tabula

Riteņa sliedes testa rezultāti

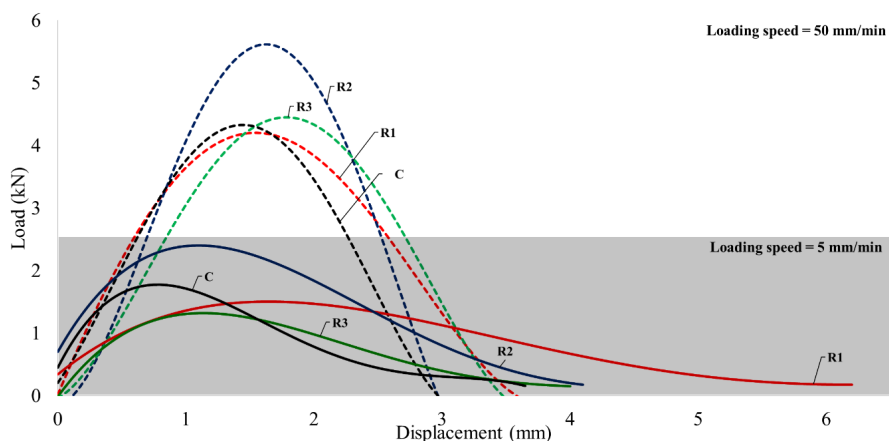
Maisījums	Vidējais ciklu skaits	Vidējais riteņa sliedes dziļums, mm	Riteņa sliedes slīpums, mm/1000 cikliem	Vidējais poru saturs, %
<i>R1</i>	2650	19,42	4,28	2,6
<i>R2</i>	4750	19,74	2,39	1,7
<i>R3</i>	7350	16,28	1,46	3,5
<i>C</i>	10000	7,97	0,36	5,2

Šajā pētījumā smalko minerālmateriālu plūsmas koeficients RA materiālu maisījumos bija zemāks nekā neapstrādātu minerālmateriālu maisījumos. Apaļu minerālmateriālu klātbūtne RA materiālos varētu būt iemesls zemākiem 100 % RA maisījumu riteņa sliedes rādītājiem. Vēl

viens iemesls varētu būt atjaunošanas piedevu daudzums, kas konkrētajiem maisījumiem netika optimizēts. Zemāks atjaunošanas piedevu saturs, iespējams, palielinātu riteņa sliedes pretestību.

7.2. Plaisāšanas pretestība

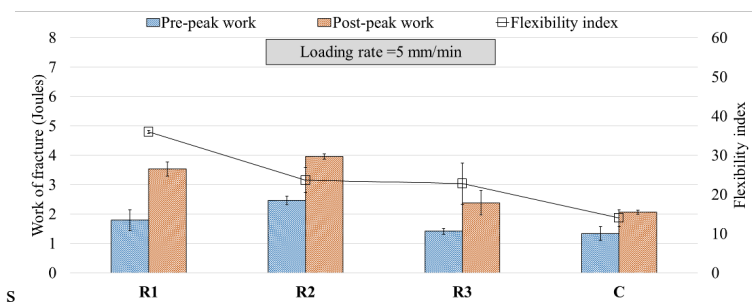
7.1. attēlā redzamas slodzes pret pārvietojumu mērījumu vidējās vērtības visiem maisījumiem (tika izmantots *AASHTO TP 124-16* standarta plaisāšanas pretestības tests). Visu maisījumu līknēm ir augstāki maksimumi pie 50 mm/min sloģošanas ātruma nekā pie 5 mm/min, tas ir tāpēc, ka pie augstākiem sloģošanas ātrumiem maisījumi uzvedas tā, it kā tiem būtu lielāks stingums. *R2* maisījuma maksimums bija visaugstākais abos sloģošanas ātrumos. Tika aprēķināta arī plīsuma enerģija – specifiskāk, elastības indekss (angļu val. – *flexibility index*) (*FI*), kas ņem vērā līknes formas slīpuma koeficientu.



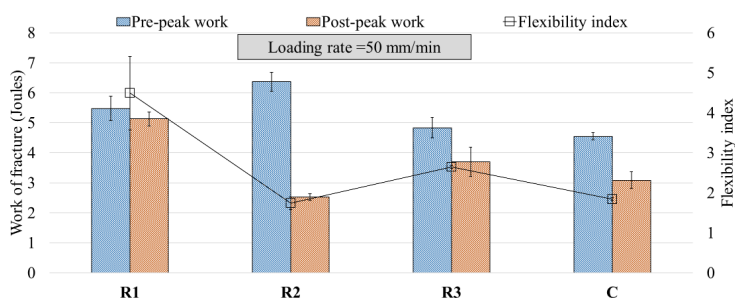
7.1. att. Slodzes un pārvietojuma līknes puscilindra lieces testam ar ātrumu 5mm/min.

Pie 5 mm/min sloģošanas ātruma maisījumam *R2* bija visaugstākās enerģijas vērtības pirms un pēc maksimālās slodzes (7.2. att.). Salīdzot ar *R2*, maisījumu *R1*, *R3* un *C* pirms maksimālās slodzes darba vērtības bija attiecīgi par 27 %, 43 % un 46 % zemākas. Līdzīgi rezultāti ir pēc maksimālās slodzes vērtībām, kas ir par 11 %, 40 % un 41 % mazākas maisījumiem *R1*, *R3* un *C* nekā maisījumam *R2*. Vislielākā plaisāšanas pretestība starp 100 % RA maisījumiem ir maisījumam *R2*, kas saistīts ar augu eļļu un polimēru bāzi atjaunošanas piedevām. Ir zināms, ka polimēri asfaltu maisījumos uzlabo plaisāšanas pretestību.

Pie 50 mm/min sloģošanas ātruma, līdzīgi kā iepriekš, visaugstākā pirms maksimālās slodzes enerģijas vērtība bija *R2* maisījumam. Tomēr pēc maksimālās slodzes enerģijas vērtība *R2* maisījumam bija viszemākā, kas liecina par lielāku plaisas izplatīšanās ātrumu pēc sabrukšanas. 7.3. attēlā redzams, ka elastības indeksi sakārto maisījumus šādā secībā: $R1 > R3 > R2 \approx C$. No tā var secināt, ka *R1* maisījums, kas satur taleļļas bāzes atjaunošanas piedevas, varētu būt ar vislielāko plaisāšanas pretestību. Pārsteidzošā kārtā *R2* ir viszemākais elastības indekss starp 100 % RA maisījumiem, kas nozīmē, ka augu eļļas un polimēru bāzes atjaunošanas piedevas uzlaboja stingrību, taču samazināja plaisāšanas pretestību.



7.2. att. Plīsuma enerģija un elastības indekss visiem maisījumiem pie 5 mm/min slogošanas ātruma. Kļūdu nogriežņi parāda intervālu.



7.3. att. Plīsuma enerģija un elastības indekss visiem maisījumiem pie 50 mm/min slogošanas ātruma. Kļūdu nogriežņi parāda intervālu.

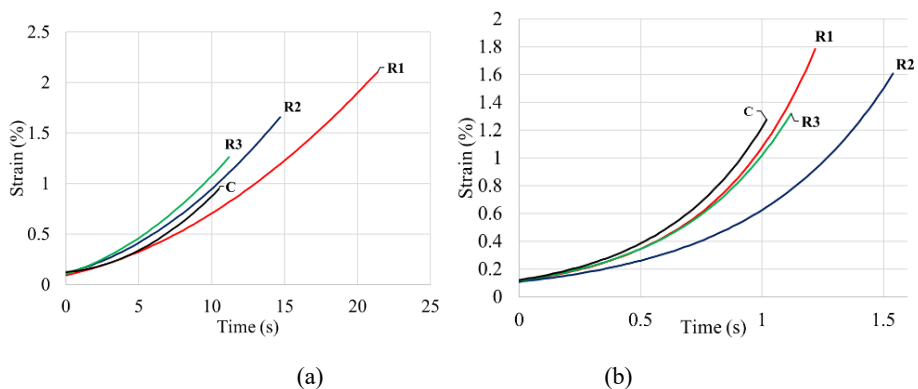
7.3. Digitālo attēlu korelācijas rezultāti (DIC)

Lai noteiktu asfalta-saistvielu sistēmas mehānisko spriegumus sadalījumu un korelāciju starp optiski nomērīto deformāciju un tradicionāliem indikatoriem, tika izmantota digitālo attēlu korelācija (DIC). Augstāka līmeņa deformācija pie maksimālās slodzes liecina par materiāla spēju vairāk deformēties, pirms veidojas mikroplaisas, t. i., materiālam ir augstāka elastība.

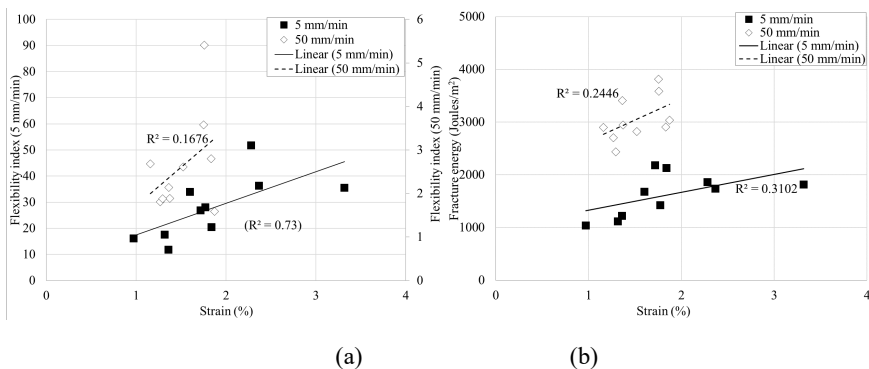
Kā redzams 7.4. (a) attēlā, pie 5 mm/min slogošanas ātruma maisījumus var sakārtot pēc to horizontālās deformācijas vērtības šādi: $R1 > R2 > R3 > C$. Pie maksimālās slodzes vidējā parauga $R1$ vērtība bija 2,1 %, kas ir augstāka nekā pārējiem maisījumiem: $R2$ (1,6 %), $R3$ (1,2 %) un C (0,9 %). Šie rezultāti rāda, ka $R1$ maisījumam ir augstāka elastība, kas sakrīt ar maisījumu elastības indeksa rezultātiem pie 5 mm/min slogošanas ātruma. Starp elastības indeksu un horizontālās deformācijas vērtību pie 5 mm/min slogošanas ātruma tika noteikta korelācija ($R^2 = 0,73$) (7.5. (a) att.).

Pie 50 mm/min slogošanas ātruma maisījumus var sarindot pēc to horizontālās deformācijas vērtībām šādi: $R1 > R2 > R3 > C$ (7.4. (b) att.), kas sakrīt ar secību pie 5 mm/min slogošanas ātruma. Tomēr šajā gadījumā horizontālās deformācijas vērtībām ir zema korelācija gan ar elastības indeksu, gan plīsuma enerģiju, kā redzams 7.5. (a) un (b) attēlā. Viens no zemās

korelācijas iemesliem varētu būt zemā deformācijas mērījumu precizitāte pie lieliem slogošanas ātrumiem, jo paraugi ir viegli lūstoši un tajos veidojas momentānas plaisas.



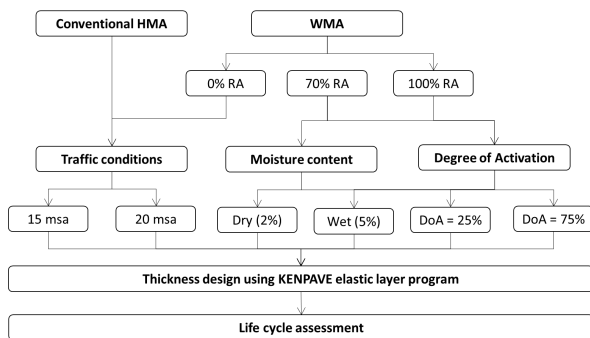
7.4. att. Horizontālā deformācija pie roba gala puscilindra formas lieces testā pie slogošanas ātruma: (a) 5 mm/min; (b) 50 mm/min.



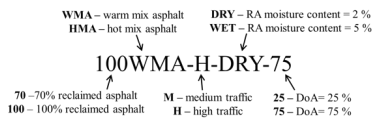
7.5. att. Korelācijas koeficients starp plaisas deformāciju un plīsuma parametriem.

8. ASFALTA PĀRSTRĀDES DZĪVES CIKLA IZVĒRTĒJUMS

Šī nodaļa aprakstīts dzīves cikla (*LCA*) izvērtējums un salīdzinātas dažādas reciklētā asfalta segumu alternatīvas, kas iegūtas, sajaucot silta maisījuma piedevas ar atjaunošanas piedevām. Dzīves cikla novērtējuma pētījuma plāns ir redzams 8.1. attēlā. Pētījumā apskatīti četri dažādi mainīgie: (1) 70 % un 100 % RA saturs *WMA* maisījumos (tie apzīmēti ar *70WMA* un *100WMA*); (2) divas dažādas satiksmes intensitātes (vidēja jeb 15 *msa* un augsta jeb 20 *msa*); (3) divi dažādi relatīvie mitrumi (sausss jeb 2 % un slapjš jeb 5 %); (4) divas ar saistvielu aktivizācijas pakāpes (*DoA* ir 25 % un 75 %). Kopā $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ dažādi scenāriji. Neapstrādāti maisījumi sastāv no tradicionāliem *HMA* un *WMA* maisījumiem ar divām dažādām satiksmes intensitātes iespējas, kas kopā veido $2 \times 2 = 4$ scenārijus. Tātad kopā dzīves cikla pētījumam tika salīdzināti 20 dažādi scenāriji. Nomenklatūra redzama 8.2. attēlā. *LCA* pētījumos tiks izmantota *SimaPro 9.2.0* programmatūra, lai kvantificētu šādu procesu ietekmi uz vidi: materiālu ieguve; pārvadāšana; asfalta ražošana un būvniecība. *SimaPro* ir analītiska programmatūra, ko izmanto, lai noteiktu preču un pakalpojumu ietekmi uz vidi.



8.1. att. Dzīves cikla pētījuma plāns.

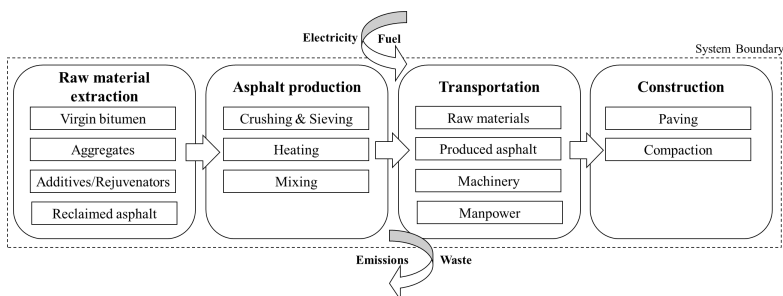


8.2. att. Segumu scenāriju nomenklatūra.

8.1. Funkcionālā vienība un sistēmas robežas

Šajā pētījumā par funkcionālo vienību tiek uzskatīts 1 km uzbūvēta seguma 15 m platumā, tā biezums atbilst attiecīgajai satiksmes slodzei. Sistēmas robežas redzamas 8.3. attēlā. Šajā pētījumā apskatīti procesi, kas saistīti ar materiālu iegūšanu, pārvadāšanu, asfalta ražošanu un būvniecību. Segumu scenāriji veidoti pēc mehāniski empīriskas pieejas, kur seguma segmenti ir analizēti pēc to kritiskajām vērtībām, pieņemot, ka katrs seguma strukturālais slānis ir homogēns, izotropisks un lineāri elastīgs (lineāri elastīgā slāņošanas teorija), biezumi ir izvēlēti, balstoties uz atļauto atkārtotas sloģošanas reižu skaitu. Vairāku slāņu sistēmu analīzei šajā

pētījumā tika izmantots *KENPAVE*. Satiksmes noslodze tika apskatīta kā ekvivalento asu 80 kN slodzes kumulatīvais rādītājs un izteikta kā miljoni ekvivalento asu (*million standard axles – msa*) atkārtojumi. Seguma riteņa sliedes N_R un noguruma ilgizturība N_f tika aprēķināti, izmantojot 8.1. un 8.2. vienādojumu saskaņā ar *IRC 37-2018* 90 % ticamībai. Rezultāti apkopoti 8.2. tabulā.



8.3. att. Segumu sistēmas robežas.

$$N_R = 1,41 \times 10^{-8} \left[\frac{1}{\varepsilon_v} \right]^{4,5337} \quad (8.1)$$

$$N_f = 0,5161 \times C \times 10^{-4} \left[\frac{1}{\varepsilon_t} \right]^{3,89} \times \left[\frac{1}{M_{Rm}} \right]^{0,854} \quad (8.2)$$

$$C = 10^M, \text{ un } M = 4,84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69 \right) \quad (8.3)$$

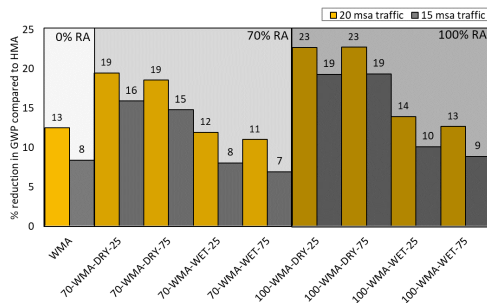
ε_v – vertikālā stiepes izturība asfalta slāņa apakšā; ε_t – horizontālā spiedes izturība slāņa augšpusē; M_{Rm} – apakšējās asfalta kārtas stigrums; V_{be} – efektīvā bituma tilpuma procenti no maisījuma; V_a – poru satura tilpuma procenti no maisījuma.

8.2. tabula
Seguma biezums: $M - 15 \text{ msa}$, $H - 20 \text{ msa}$

	HMA		WMA		70WMA		100WMA	
					Biezums (mm)			
	M	H	M	H	M	H	M	H
Satiksmes intensitātes								
Dilumkārtā	40	40	40	40	40	40	40	40
Saistes kārtā	60	90	55	85	50	75	50	65
Minerālmateriālu starpslānis	100	100	100	100	100	100	100	100
Ar cementu apstrādāts pamats	100	100	100	100	100	100	100	100
Nesaists apakšslānis	200	200	200	200	200	200	200	200
Ar <i>KENPAVE</i> aprēķinātās kritiskās vērtības un pieļaujamā satiksme (<i>IRC: 37-2018</i>)								
Stiepes deformācija <i>BC</i> apakšā (μ)	210,4	198,1	206,4	196,0	177,5	171,1	163,1	160,3
Noguruma maksimālais ciklu skaits (<i>msa</i>)	16	21	16	20	17	20	19	20
Spiedes deformācija grunts pamatnes augšpusē (μ)	406,7	356,3	414,2	361,7	415,4	365,7	411,1	379,2
Maksimālais riteņa sliedes ciklu skaits (<i>msa</i>)	33	61	31	57	30	54	32	46

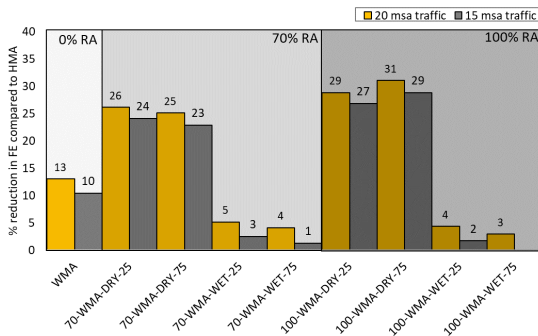
8.2. Dzīves cikla ietekmes novērtējums

8.4. attēlā redzams, ka visbūtiskākais globālās sasilšanas samazināšanas potenciāls (23 % un 19 %) ir maisījumiem *100-WMA-DRY-25* un *100-WMA-DRY-25* vidējas un augstas satiksmes intensitātes apstākļos, galvenokārt tāpēc, ka maisījumos netiek izmantoti neapstrādāti materiāli. Interesanti, ka pārstrādātiem maisījumiem *70-WMA-WET* un *100-WMA-WET* ar augstu mitruma saturu (5 %) dzīves cikla izmeši bija gandrīz līdzvērtīgi ar *WMA* maisījumiem, kuros nav RA materiālu. Tātad augstais enerģijas daudzums, kas nepieciešams, lai izžāvētu RA minerālmateriālus, kompensē transporta un tīrīdņu materiālu ieguves ietaupījumus.



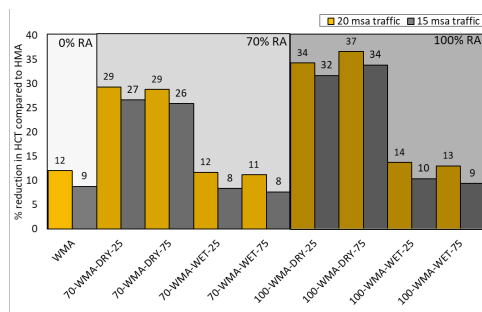
8.4. att. Procentuāls globālās sasilšanas samazināšanas potenciāla (kg CO₂) salīdzinājums ar *HMA* maisījumu.

8.5. attēlā redzams, ka *WMA* maisījumiem to zemākās sagatavošanas temperatūras dēļ ir par 10–13 % mazāks saldūdens ekotoksiskuma potenciāls nekā *HMA* maisījumiem. Tomēr maksimālais aprēķinātais samazinājums – par 23–31 % – bija maisījumiem *70-WMA-DRY* un *100-WMA-DRY*, kuros ir RA. Interesanti, ka, izmantojot RA materiālus ar augstu mitrumu, 70 % un 100 % RA maisījumi neuzrādīja būtisku (mazāk par 5 %) saldūdens ekotoksiskuma potenciāla samazināšanos. Šis rezultāts vēlreiz liecina par to, ka dzīves cikla izmešu samazinājumam ir svarīgi izmantot zema mitruma RA materiālus.



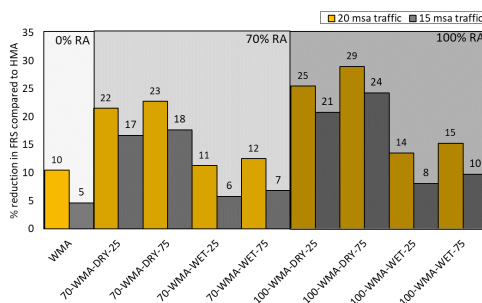
8.5. att. Procentuālais saldūdens ekotoksiskuma (kg 1,4-DB) samazinājuma salīdzinājums ar *HMA* maisījumu.

8.6. attēlā var redzēt, ka *WMA* maisījumiem ir būtiski lielāks cilvēku kancerogenitātes samazinājums (par 9–12%), salīdzinot ar *HMA* maisījumiem. Tomēr vislielākais samazinājums (par 26–32 %) ir, iekļaujot maisījuma sastāvā 70 % vai 100 % RA materiāla ar zemu mitrumu. Visaugstākais saistvielu aktivizācijas efekts bija 100-*WMA* maisījumiem, ja pievienotajam RA materiālam bija zems mitrums. Zemākos *DoA* (25 %) neapstrādāto saistvielu saturam ir jābūt lielākam, lai sasniegtu pietiekamu saistvielu daudzumu, bet mazāk aktīvu saistvielu klātbūtnes dēļ ir nepieciešamas mazāks atjaunošanas piedevu daudzumu nekā augstākos *DoA* (75 %).



8.6. att. Procentuāls cilvēku kancerogenitātes (kg 1,4-DB) samazinājuma salīdzinājums ar *HMA* maisījumu.

Kā redzams 8.7. attēlā, fosilo resursu deficīts tika samazināts par 5 % un 10 %, samazinot ražošanas temperatūru par 30 °C vidējas un augstas satiksmes intensitātes scenārijos, savukārt, salīdzinot ar rezultātiem, kas aprakstīti iepriekš, šis nav būtisks ieguvums. Uzlabojumi tādās kategorijas kā globālās sasilšanas potenciāls, saldūdens ekotoksiskus un cilvēku kancerogenitāte ir būtiskāki. To varētu skaidrot ar saistvielu ražošanas un pārvadāšanas sagādātajiem apgrūtinājumiem.



8.7. att. Procentuāls fosilo resursu deficīta (kg naftas) samazinājuma salīdzinājums ar *HMA* maisījumu.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā risinātas svarīgas problēmas, kas saistītas ar atjaunojošās piedevas saturošu augsta reciklēta asfalta satura maisījumu projektēšanu un novērtēšanu. Lai optimizētu augsta satura reciklētā asfalta maisījumu laboratorijas maisīšanas procedūru, tika variēti svarīgākie maisīšanas parametri un novērtēta to ietekme uz asfalta maisījumu mehāniskajām un reoloģiskajām īpašībām. Tika salīdzinātas arī reciklēta asfalta maisījumu, kas sagatavoti, izmantojot silto maisījumu tehnoloģiju, īpašības ar tradicionālajiem asfalta maisījumiem. Lai novērtētu atjaunojošo piedevu ilgtermiņa ietekmi uz reciklēta asfalta maisījumu īpašībām, tika veiktas novecošanas simulācijas laboratorijas apstākļos. Tika pētīta arī korelācija starp mehāniskiem plaisāšanas parametriem un optiski noteiktām deformācijām. Visbeidzot, tika novērtēta reciklēta asfalta īpašību ietekme uz vidi ceļa segas dzīves cikla aprēķinā. Pamatojoties uz šo pētījumu, veikti vairāki secinājumi.

1. Pētījumā izstrādāta augsta satura reciklēta asfalta maisījumu laboratoriskā sajaukšanas procedūra, kas nodrošina to, ka maisīšanas parametru ietekme uz īpašībām tiek samazināta līdz minimumam, tādējādi ļaujot ticami salīdzināt dažādu asfalta sastāvu īpašības. Pamatojoties uz šo pētījumu, atjaunojošo līdzekli ieteicams pievienot tieši uz reciklēta asfalta, reciklēta asfalta karsēšanu un jaukšanu nedrīkst veikt temperatūrā, kas augstāka par 155 °C, un četru minūšu maisīšanas laiks ir apmierinošs maisījumu sagatavošanai laboratorijā. Turklāt, salīdzinot maisījumus, jāņem vērā maisītāja tips.
2. Izmantojot siltā maisījuma tehnoloģiju, tika panākts asfalta sildīšanas un sajaukšanas temperatūras samazinājums par 15 °C. Tas sasniegts, optimizējot gaispildīto poru saturu Latvijas Valsts ceļi specifikācijās noteiktajās 1,5–4 % robežās. Siltajā asfalta maisījumā izmantojot 60 % reciklēta asfalta, gaispildīto poru saturs tika samazināts attiecīgi par 0,8 % un 0,6 % nenovecinātajiem un īslaicīgi vecinātajiem maisījumiem. Ņemot vērā šī pētījuma rezultātus, tika noteikta nepieciešamība izmantot atjaunojošo piedevu kopā ar siltā asfalta maisījuma piedevu, lai palielinātu materiālu sajaukšanos un kompensētu novecojušās saistvielas īpašības.
3. Lai salīdzinātu dažādu bitumena paraugu novecošanās pakāpi, šajā pētījumā tika izstrādāts novecošanās indekss, kas balstīts kompleksā moduļa izmaiņās. Izvērtējot ilgtermiņa īpašības, uz taleļļas bāzes izstrādātais atjaunojošais līdzeklis ieguva zemāko novecošanās indeksa vērtību (3,10), uz naftas bāzes izgatavotais atjaunojošais līdzeklis ieguva augstāko novecošanās indeksa vērtību (8,27) starp četrām izmantotajām atjaunojošām piedevām. Uz taleļļas bāzes izstrādātā atjaunojošā piedeva uzrādīja līdz pat 37 % lielāku noguruma ciklu skaitu pie 5 % deformācijas, savukārt uz bioeļļas bāzes izgatavotā piedeva uzrādīja līdz 41 % lielāku noguruma ciklu skaitu pie 2,5 % deformācijas, salīdzinot ar citām atjaunojošām piedevām.
4. Pamatojoties uz noteiktajiem testa terminēšanas kritērijiem, maksimālais risu veidošanās ciklu skaits tradicionālajiem *HMA* maisījumiem bija par 2630–7330 lielāks, salīdzinot ar 100 % reciklētiem asfalta maisījumiem, atkarībā no izmantotā atjaunojošās piedevas veida. Salīdzinot ar tradicionālo *HMA*, visi 100 % reciklētie asfalta maisījumi ar atjaunojošajām piedevām uzrādīja par 11–44 % lielāku plaisāšanas enerģiju pie 50 mm/min sloģošanas ātruma un par 13–91 % lielāku plaisāšanas enerģiju pie 5 mm/min sloģošanas ātruma. Pamatojoties uz elastības indeksa vērtībām pie 50 mm/min sloģošanas ātruma, uz taleļļas bāzes izgatavotā atjaunojošā piedeva uzrādīja visaugstāko izturību pret plaisāšanu starp visām atjaunojošajām piedevām.

5. Dzīves cikla novērtējums tika veikts, lai novērtētu ieguvumus apkārtējās vides saglabāšanā, izmantojot reciklēta asfalta maisījumus tradicionālo maisījumu vietā. Balstoties uz globālās sasilšanas ietekmes kategorijas rezultātiem, asfalta ražošanas posms uzrādīja vislielāko ietekmi, veidojot 45–53 % no kopējās globālās sasilšanas ietekmes, jo šajā posmā tiek izdalīts liels emisiju daudzums. Iestrādājot 70 % reciklēta asfalta, aprēķinātās emisijas tika samazinātas par līdz 26 %, taču tika pierādīts, ka šos ieguvumus var nonivelēt papildu emisijas, kas rodas reciklēta asfalta ar augstu mitruma saturu žūšanas procesā.



Mukul Rathore dzimis 1992. gadā Sitapurā, Indijā. Ieguvis bakalaura grādu būvinženierijā Nacionālajā Tehnoloģiju institūtā Agartalā (2014) un maģistra grādu transporta inženierijā Deli Zinātnisko un novatorisko pētījumu akadēmijā (2017). 2015. gadā CSIR Indija viņam piešķīra Junior Research Fellowship (*GATE*). 2017. gadā *M. Rathore* ieguva vecākā pētnieka amatu par pētījumiem transporta inženierijas jomā Centrālajā ceļu pētniecības institūtā Deli. 2019. gadā saņēmis Eiropas Komisijas Marijas Sklodovskas-Kirī stipendiju, lai trīs gadus strādātu *SAFERUP* projektā. Pētniecības intereses saistītas ar ilgtspējīgiem būvmateriāliem, asfalta pārstrādi un dzīves cikla novērtēšanas metodēm.