



SIA "INŽENIERBŪVE"



PĒTĪJUMS

**BITUMENA FUNKCIONĀLO GRUPU
UN MODIFICĒJOŠO PIEDEVU
IETEKMES IZPĒTE UZ ASFALTBETONA
KOMPOZĪTU STRUKTŪRVEIDOŠANĀS
PROCESIEM UN ILGMŪŽĪBU
(2. KĀRTA)**

GALA ATSKAITE

Apstiprinu, 10. 10. 2017		
(vārds, uzvārds, paraksts)		
Pētniecības projekta nosaukums Bitumena funkcionālo grupu un modificējošo piedevu ietekmes izpēte uz asfaltbetona kompozītu struktūrveidošanās procesiem un ilgmūžību (2. kārtā).		
Līguma numurs	Līgums Nr. LVC2016/1.10/1/AC	
Līguma slēgšanas datums	26. 04. 2016	
Pētniecības projekta stadija	Gala atskaite (100%)	
Starpziņojumu kopējais skaits	3 starpziņojumi un 1 gala atskaite	
Ziņojuma nodošanas datums	10. 10. 2017	
Pētniecības projekta izstrādes periods	02. 01. 2016 (sākta priekšizpēte) – 10. 10. 2017	
Lappušu skaits	94	
Disks vai cits datu nesējs (ir/nav)	ir	
Eksemplāru skaits	1	
JAUNU TEHNOLOĢIJU IZPĒTES PROGRAMMA 2016. - 2018. GADAM		
Pētniecības projekta izpildītāji	Vārds, Uzvārds	Paraksts
Pētniecības projekta vadītājs	Viktors Haritonovs	
Pētnieks	Romāns Kornišovs	
Pētnieks	Emīls Prockāns	
Projektu finansē	VAS "Latvijas Valsts ceļi"/Satiksmes ministrija	
<p>Īss apraksts</p> <p>Bitumenu un modifikatoru mainīgo īpašību un daudzveidības, kā arī atšķirīgu bitumena un polimērmofificētā bitumena (PMB) ražošanas tehnoloģiju pielietojamas iespēju dēļ, nepieciešams veikt kompleksu izpēti, lai radītu ilgmūžīgus polimērmofificētā bitumena (PMB) sastāvus. Pētījuma projekta 1. kārtā tika analizētas bitumena fizikālās, ķīmiskās un fizikāli-ķīmiskās īpašības, kā arī aprobētas metodes bitumena funkcionālo grupu sastāva un struktūras (morfoloģijas) noteikšanai. Šī pētījuma etapa mērķis ir 1. kārtā aprobēto metožu pielietošana bitumena un bitumena mastikas īpašību padziļinātai izpētei, lai izstrādātu vadlīnijas PMB ražošanas tehnoloģijām, piedāvātu metodiku kvalitātes pārbaudēm un sniegtu rekomendācijas „Ceļu specifikācijas 2017” pilnveidošanai.</p> <p>Pētījuma projekta pirmā posma (1. starpziņojuma) ietvaros tika analizētas metodes un tehnoloģijas PMB struktūras un uzglabāšanas stabilitātes uzlabošanai, kā arī novecošanas ātruma samazināšanai. Salīdzinātas apskatīto metožu priekšrocības un trūkumi. Šajā pētījuma etapā, izmantojot SBS polimēru un izejas bitumenu no uzņēmumiem Orlen (Lietuva) un Naftan (Baltkrievija), veikta PMB izgatavošana, izejas bitumenu ķīmiskā testēšana un, izmantojot BBR (Bending Beam Rheometer), noteiktas bitumenu reoloģiskās īpašības zemās ekspluatācijas temperatūrās.</p> <p>Veicot analītisku pētījumu par PMB īpašībām, konstatēts, ka bitumena modifikācijas procesu un PMB sistēmas stabilitāti ietekmē: polimēra saturs, polimēra molekulārā masa, asfaltēnu molekulārā masa un aromātiskums. Secināts, ka SBS modifcētā bitumena negatīvā īpašība ir tā zema izturība pret temperatūru, oksidāciju un ultravioleto starojumu, kas saistīta ar vāju polibutadiēna grupas divkārtīgo saitī (ogleklis-ogleklis). Analizēti vairāki paņēmieni PMB stabilitātes un novecošanas problēmu mazināšanai, tādi kā ķīmiskā piesātinātība, vulkanizācija ar sēru, antioksidanti, hidroforbie māla minerāli, funkcionalizācija un reaģējošo polimēru izmantošana. Secināts, ka ķīmiskā piesātinātība, funkcionalizācija un reaģējošie polimēri ir efektīvi veidi polimēru, piemēram, SBS novecošanas izturības un uzglabāšanas stabilitātes uzlabošanai.</p> <p>Veicot eksperimentālo bitumena un PMB izpēti, noteikts, ka, atkarībā no bitumena klases un ražotāja, testētie bitumenu uzrāda atšķirīgus frakcionālo grupu sastāvus. Konstatēts, ka bitumens B100/150-1 pēc novecināšanas ievērojami zaudēja sveķus un tajā palielinājās asfaltēnu un asfaltogēno skābju daudzums, savukārt bitumenam B70/100-2 novecināšanas rezultātā sveķu procentuālais sastāvs palielinājās, bet samazinājās eļļu procentuālais sastāvs. Visi testētie izejas bitumenu, izņemot svaigu bitumenu B100/150-1, saskaņā ar Gasteļa indeksa kritēriju atbilst stabilai sistēmai. Analizējot BBR (Bending beam rheometer) rezultātus, var secināt, ka saskaņā ar PG sistēmas klasifikāciju izejas bitumenu un projektētie PMB bitumenu ir piemēroti lietošanai visā Latvijas teritorijā.</p> <p>2. un 3. pētījuma posmā tiek turpināta PMB tehnoloģiju un īpašību izpēte. Veikta laboratorijā un PMB ražotnē izgatavotu PMB bitumenu testēšana. Aprobēta fluorescences mikroskopijas metode. Rezultāti uzrāda krasu struktūras atšķirību starp PMB paraugiem izgatavotiem laboratorijā un rūpnīcā. Bitumens B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 1.5% P-2 (izgatavots rūpnīcā) uzrādīja viszemāko kritisko temperatūru - -41,16°C. Konstatēts, ka zemāka SBS daudzuma – 2,0% - pievienošana kombinācijā ar sveķiem (R) un plastifikatoru P-1, salīdzinājumā ar 2.5% modifikatora pievienošanu bez piedevām, nedeva gaidīto ekonomisko un ekspluatācijas īpašību uzlabojumu. Lai gan PMB recepte ar zemu SBS saturu (2%) uzrāda ļoti augstu salizturību (BBR testa rezultāts –36,22°C) un ir atbilstoša lietošanai Latvijas teritorijā.</p>		

4. pētījuma posmā veikta novērtētā bitumen atjaunošanas tehnoloģiju, kā arī atjaunotās struktūras novērtēšanas metožu izpēte. Konstatēts, ka ar emulsijas veida atjaunojošo vielu Latexfalt BV BM1 var iegūt atjauninātā bitumena īpašības un struktūru līdzīgu "svaigam" bitumenam. Secināts, ka efektīvākais veids atjauninātās struktūras novērtēšanai un piedevas optimizācijai ir reoloģisko īpašību un bitumena struktūras vizuāls novērtējums. Šajā pētījuma posmā laboratorijā veikta PMB recepšu izgatavošana dažādās temperatūras, maisīšanas ātrumos un izmantojot dažādus laboratorijas dispergatorus. Noteiktas sakarības starp PMB izgatavošanas veidu un struktūru. 4. pētījuma posmā, izmantojot tradicionālās bitumena testēšanas metodes un DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) metodi, turpināta bitumena mastiku īpašību izpēte. Eksperimentāli noteikts, ka visi aizpildītāji (dolomīta milti, kaļķakmens milti un vieglie pelni "fly ash") 20% daudzumā pasliktina bitumena elastīgās īpašības, bet 40% daudzumā tās uzlabo. Konstatēts, ka dolomīta un kaļķakmens aizpildītājs pasliktina adhēziju ar granītu, tomēr vieglo pelnu aizpildītājs mastikas adhēzijas īpašības ar granītu uzlabo. Izmantojot DSR metodi noteikts, ka pētījuma izmantotājs "svaigs" un ar RTFOT metodi novērtētais bitumens B50/70 atbilst Latvijas klimatiskiem apstākļiem - PG klase +64°C (PG 64). Pievienojot 20 līdz 40% aizpildītāju (visus šajā pētījumā izmantotus) PG klasi var palielināt līdz +76°C (PG 76). Šajā pētījuma posmā izstrādātas vadlīnijas PMB izgatavošanai un modifikatora akceptēšanai, kā arī sniegtas rekomendācijas "Ceļu specifikācijas 2017" pilnveidošanai.

Pielietojums/pētījuma sfēra	Autoceļu būvniecība/Ceļu būvmateriāli
Papildus izstrādātie materiāli	Zinātniskās publikācijas un rekomendācijas

SATURS

DARBA UZDEVUMS	6
1. ANALĪTISKĀ DAĻA	8
1.2. PMB struktūra	9
1.4. SBS modificētie bitumēni	12
1.5. PMB komponentu savietojamība un stabilitāte	14
1.6. PMB izgatavošana	16
1.7. Risinājumi PMB ar SBS trūkumu novēršanai	17
1.7.1. Ķīmiskā piesātināšana	17
1.7.2. Vulkanizācija ar sēru	19
1.7.3. Antioksidanti	19
1.7.4. Hidrofobie māla minerāli	20
1.7.5. Funkcionalizācija un reaģējošie polimēri	21
1.7.6. Kopsavilkums	22
1.8. Novēcinātā bitumēna īpašību atjaunošana	22
1.8.1. Novēcošanas mehānisms	22
1.8.2. Atjaunojošās piedevas difūzija novecojušā bitumēnā	23
1.8.3. Atjauninātā bitumēna struktūras novērtējums	24
1.8.4. Kopsavilkums	28
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	29
2.1. Eksperimenta plāns	29
2.2. Bitumēna novecošana	30
2.2.1. Metodika	30
2.3. Bitumēna frakcionālo grupu sastāvs	30
2.3.1. Metodika	30
2.4. Rezultāti	34
2.4.1. SARA tests	34

2.4.2	Gasteļa indekss	35
2.4.3	Rezultātu analīze	36
2.5.	Bitumena modifikācija	36
2.5.1	Metodika	37
2.5.2	Rezultāti	38
2.6	Bitumenu pamatīpašību noteikšana	41
2.6.1	Metodika	41
2.6.2	Rezultāti	43
2.6.3	Rezultātu analīze	44
2.7	Bitumenu reoloģisko īpašību noteikšana ar BBR metodi	46
2.7.1	BBR metodika	46
2.7.2	Rezultātu analīze	59
3.	BITUMENA MASTIKAS ĪPAŠĪBU IZPĒTE	68
3.1.	Ievads	68
3.2.	Eksperimentālā daļa	70
3.2.1.	Mastikas paraugu izgatavošana	70
3.2.2.	Aizpildītāja īpašības	70
3.2.3.	Bitumena mastikas pamatīpašības	71
3.2.5.	Asfaltbetona sastāvi	78
3.2.6.	Asfaltbetona sastāvu pamatīpašības	80
	GALVENIE SECINĀJUMI	83
	VADLĪNIJAS BITUMENA MODIFIKATORU IZVĒLEI UN TO KVALITĀTES PĀRBAUDĒM	86
	METODISKIE NORĀDĪJUMI BITUMENA MODIFIKĀTORA AKCEPĒŠANAI	90
	REKOMENDĀCIJAS	92
	LITERATŪRA	92

DARBA UZDEVUMS

IEVADS

Naftas un tās pārstrādes atlikumu (gudrona) daudzveidības, kā arī atšķirīgu bitumena ražošanas tehnoloģiju dēļ, vienas klases bitumēni, kas iegādāti no dažādiem ražotājiem vai viena ražotāja, bet dažādos laika posmos (piemēram, bitumens B70/100) ir ar krasi atšķirīgām īpašībām. Tas ievērojami sarežģī bitumena modifikāciju, kas ir nepieciešama, jo nemodificētiem ceļu bitumēniem ne vienmēr piemīt apmierinošas stiprības un deformatīvās īpašības. Bitumenu un modifikatoru mainīgo īpašību un daudzveidības, kā arī atšķirīgu bitumena un polimērm modificētā bitumena (PMB) ražošanas tehnoloģiju pielietojšanas iespēju dēļ, nepieciešams veikt kompleksu izpēti, lai radītu ilgmūžīgus PMB sastāvus, izstrādātu vadlīnijas PMB ražošanas tehnoloģijām, piedāvātu metodiku kvalitātes pārbaudēm un sniegtu rekomendācijas „Ceļu specifikācijas 2017” pilnveidošanai.

Pētījuma projekta 1. kārtā tika analizētas bitumena fizikālās, ķīmiskās un fizikāli-ķīmiskās īpašības, noteikta SBS modifikatora efektivitāte atkarībā no bāzes bitumena un modifikatora īpašībām un aprobēta atomspēka mikroskopa (AFM) metode bitumena struktūras (morfoloģijas) un funkcionālo grupu noteikšanai. Šajā pētījuma etapā veikta sešu nemodificēto ceļu bitumenu modifikācija, izmantojot dažādas izcelsmes SBS tipa polimērus. Iegūtie rezultāti pierāda, ka polimērm modificēta bitumena īpašības ir atkarīgas ne tikai no bāzes bitumena īpašībām, bet arī no pielietota modifikatora izcelsmes. Konstatēts, ka, pielietojot dažādas izcelsmes (dažādu ražotāju) SBS polimēru viena un tā paša bāzes bitumena modifikācijai, tiek iegūti modificēti bitumēni ar krasi atšķirīgiem uzglabāšanas stabilitātes rādītājiem. Svarīgi atzīmēt, ka naftas pārstrādes uzņēmumi viena un tā paša tipa bitumena ražošanai, piemēram, B70/100 vai B50/70, izmanto dažādas izcelsmes naftas atlikumus. Veiktie pētījumi apstiprina, ka izmantojot viena tipa bitumena ražošanai dažādus naftas atlikumus, to īpašības var krasi atšķirties. Līdz ar to ceļu būvniecībā izmantotā bitumena īpašības lielākā mērā ietekmē naftas atlikumu īpašības, kā arī naftas pārstrādes un bitumena ražošanas tehnoloģijas.

Nemodificēti ceļu bitumēni ne vienmēr var nodrošināt augstas ekspluatācijas īpašības (rišu noturība, noguruma un termoplaisu noturība). Efektīvākais bitumena īpašību uzlabošanas paņēmiens ir tā modifikācija, piemēram, ar SBS polimēru. Polimērm modificēta bitumena (PMB) īpašības būs atkarīgas no izejas bitumena un modifikatora kvalitātes, modifikatora un bitumena mijiedarbības, kā arī PMB ražošanas tehnoloģijas.

Tā kā šobrīd Latvijā sāk aktīvi ražot polimērm modificētus bitumēnus, pētījumā iegūtajiem rezultātiem un aprobētajām metodēm ir liela praktiskā nozīme. Turpmākajos pētījumos nepieciešams turpināt PMB struktūras izpēti, piemēram, izmantojot AFM metodi, kā arī projektēt un izgatavot dažādus PMB sastāvus (receptes) ar mērķi izstrādāt vadlīnijas bitumena modifikācijai, PMB recepšu projektēšanai un kvalitātes pārbaudēm, tādā veidā izstrādājot rekomendācijas „Ceļu specifikācijas 2017” papildināšanai.

Pētījuma projekta 1. kārtā rādīts termostabils polimērm modificēts bitumens. Iegūtie rezultāti ļauj izvērtēt PMB koloidālās struktūras stabilitāti (viendabīgumu), bet nedod atbildi par PMB komponentu (bitumena un polimēra) novecošanas īpašībām. Polimēra un bitumena - polimēra kompozīta - novecošanas īpašības ir atkarīgas no vairākiem faktoriem, tādiem kā temperatūra, PMB struktūra, asfaltbetona sablīvējums u.c. PMB novecošanas mehānismu izpētei ir liela praktiskā nozīme - tā var palīdzēt novērtēt seguma ar PMB dzīves

ciklu, noteikt efektīvas novecošanas izturību uzlabojošas tehnoloģijas (antioksidanti), kā arī, attiecībā uz reciklēto asfaltbetonu (RAP), izvēlēties atbilstošu atjaunojošo piedevu. Lai piedāvātu paņēmienus bitumena novecošanas problēmas samazināšanai un novecojuša PMB īpašību atjaunošanai, nepieciešams veikt tālāku bitumena un PMB novecošanas īpašību izpēti.

Viena no svarīgākajām divkomponenšu sistēmām asfaltbetona struktūrā ir bitumens un aizpildītājs, kas veido bitumena mastiku. Šo komponentu īpašības, mijiedarbība un daudzums var ievērojami ietekmēt asfaltbetona ekspluatācijas īpašības. Līdz ar to, turpinot pētījumu, nepieciešams novērtēt aizpildītāja ietekmi (aktivitāte, izcelsme, daudzums) uz bitumena mastikas īpašībām, kā arī salīdzināt to ar Latvijas apstākļiem tradicionālo pieeju (izmantojot dolomīta miltus), lai piedāvātu ar aizpildītāja un bitumena mastikas īpašībām saistītus priekšlikumus „Ceļu specifikāciju 2015” pilnveidošanai.

PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Izstrādāt, balstoties uz projektēto PMB sastāvu īpašībām, vadlīnijas bitumena modifikācijas tehnoloģijām, kā arī veikt PMB adhēzijas un novecošanas īpašību izpēti, lai palielinātu asfaltbetona ilgmūžību un sniegtu rekomendācijas „Ceļu specifikācijas 2017” pilnveidošanai.

DARBA SATURS

1. Saistvielu īpašības:

- 1.1. Noteikt PMB iegūšanai izmantoto nemodificētu bitumenu funkcionālo grupu sastāvu ar liesmas jonizācijas detektora (FID) un plāna slāņa hromatogrāfijas (TLC) metodēm.
- 1.2. Projektēt un izgatavot PMB sastāvus, izmantojot Latvijas apstākļiem tradicionālus (B70/100) un netradicionālus (B 160/220) bitumenus.
- 1.3. Noteikt PMB struktūras īpašības, izmantojot atomspēka mikroskopa (AFM) metodi.
- 1.4. Izstrādāt vadlīnijas bitumena modifikācijas tehnoloģijām, un ar PMB kvalitātes pārbaudēm un sastāviem saistītas rekomendācijas „Ceļu specifikācijas 2017” pilnveidošanai.
- 1.5. Veikt nemodificēta bitumena un PMB novecošanas īpašību izpēti, un piedāvāt efektīvus risinājumus novecošanās problēmas samazināšanai.
- 1.6. Piedāvāt efektīvu novērtētu PMB īpašības atjaunojošu tehnoloģiju.
- 1.7. Piedāvāt metodiskus norādījumus bitumena modifikatora akceptēšanai (sertificēšanai).

2. Bitumena mastikas īpašības

- 2.1. Noteikt dažādas izcelsmes aizpildītāju (kaļķakmens, cements, dolomīts) aktivitāti (maluma smalkumu) un mineraloģisku sastāvu.
- 2.2. Novērtēt dažādas izcelsmes aizpildītāju īpašību un daudzuma ietekmi uz bitumena mastikas īpašībām. Salīdzināt rezultātus ar Latvijas apstākļiem tradicionālo aizpildītāju (dolomīta milti) un piedāvāt priekšlikumus (attiecībā uz izcelsmi, daudzumu, granulometrisko sastāvu) „Ceļu specifikāciju 2015” pilnveidošanai.

1. ANALĪTISKĀ DAĻA

1.1. IEVADS

Pastāv vairāki iemesli, lai modificētu bitumenu, kuru izmanto kā saistvielu asfalta ražošanā:

- 1) Saglabāt elastīgās īpašības (elastīgās deformācijas) zemās ekspluatācijas temperatūrās;
- 2) Palielināt stingumu augstās ekspluatācijas temperatūrās un samazināt rišu veidošanos;
- 3) Samazināt viskozitāti iekļāšanas temperatūrā;
- 4) Uzlabot stiprības īpašības;
- 5) Uzlabot novecošanas izturību;
- 6) Uzlabot noguruma izturību;
- 7) Samazināt seguma konstruktīvā slāņa biezumu;
- 8) Samazināt dzīves cikla izmaksas;
- 9) Uzlabot nodilumizturību.

Modifikāciju var veikt ar dažādām metodēm, piemēram, modifikācija ar polimēru, modifikācija ar ķīmiskām piedevām (sērs, dažādas skābes), uzpūšana ar gaisu vai tvaiku u.c. Šajā pētījumā veikta viena no pasaulē visplašāk lietotajām modifikācijas metodēm – polimērmodifikācija.

Pirmais komerciāli tirgū atzītais polimērs ir SBS (stirols-butadiēns-stirols), kuru 1965.gadā izstrādāja ASV. Sākotnēji šo polimēru izmantoja iepakojumiem, gumijas izstrādājumiem, apaviem un modificēta bitumena jumta seguma materiāliem, bet tikai pēc tam ceļa bitumena modifikācijai [2].

1970 gados pētnieki pierādīja, ka polimēru (plastomēru un termoplastisko elastomēru) pievienošana ceļu bitumenam uzlabo noturību pret paliekošo deformāciju veidošanos. 1980 gados tika atklāts, ka polimermodificētam bitumenam (PMB) ir laba plaisu un novecošanas noturība. 1990 gados vairākās valstīs pieauga interese par PMB izpēti. Sistēmiskie pētījumi par PMB mehāniskajām, reoloģiskajām, termiskajām, morfoloģiskajām un novecošanas īpašībām, un uzglabāšanas stabilitāti ļāva arvien labāk izprast plaši lietoto PMB priekšrocības un trūkumus. Tika secināts, ka PMB uzlabo rišu noturību augstās temperatūrās un noturību pret plaisu veidošanos zemās ekspluatācijās temperatūrās, tomēr PMB sistēma nav stabila un polimērs var atslāņoties no bitumena (hetoreģēna sistēma). Kopš 2000. gada pētījumus par PMB īpašībām var iedalīt divās grupās:

- 1) Turpinās padziļināta polimērmodifikācijas mehānisma un tā bojāšanās izpēte;
- 2) Tiek mēģināts novērst dažādus PMB trūkumus.

Pirmajā gadījumā zinātnieki uzsvāra liek uz makrostruktūras, deformatīvo īpašību, noguruma plaisu veidošanās un novecošanās īpašību izpēti. Otrajā gadījumā izpēte fokusējās uz PMB trūkumu novēršanu, izmantojot, piemēram, antioksidantus, veicot funkcionalizāciju, vulkanizāciju ar sēru, izmantojot reaktīvus polimērus u.c. risinājumus, kuri vari uzlabot PMB uzglabāšanas stabilitāti un palēnināt novecošanos [2].

1.2. PMB STRUKTŪRA

Polimērmofificēta bitumena (PMB) sastāvā ir divas atšķirīgas fāzes (vielas) – bitumens un polimērs. Svarīgi atzīmēt, ka PMB fāzes – bitumena - struktūra ir vairāku fāžu (asfaltēni, sveķi, eļļas) sistēma [1]. Izšķir trīs PMB struktūras:

1) Zems polimēra saturs

Zema polimēra satura gadījumā bitumens veido nepārtrauktu fāzi, kurā izkliedētas polimēra daļiņas. Šajā sistēmā ir paaugstināts asfaltēnu saturs (polimērs uzsūc eļļas). Līdz ar to struktūrai ir uzlabota kohēzija (struktūras iekšējā stiprība) un elastība. Augstās ekspluatācijas temperatūrās (ap 600°C) stinguma modulis polimēra fāzei ir augstāks nekā bitumena matricai (nepārtrauktai bitumena fāzei), kas nodrošina PMB sistēmas rišu noturību. Zemās ekspluatācijas temperatūrās stinguma modulis polimēra fāzei ir zemāks nekā bitumena matricai, kas nodrošina PMB sistēmas trausluma izturību. Līdz ar to bitumenā disperģēts polimērs uzlabo PMB īpašības augstās un zemās ekspluatācijas temperatūrās. Sistēmā ar zemu polimēra saturu noteicošā loma ir bitumena izvēlei.

2) Vidējs polimēra saturs

Vidēja polimēra satura (ap 5%) gadījumā veidojas divas savienotas un nepārtrauktas fāzes. Šo PMB sistēmu ir grūti kontrolēt un tai ir vāja struktūras stabilitāte.

3) Augsts polimēra saturs

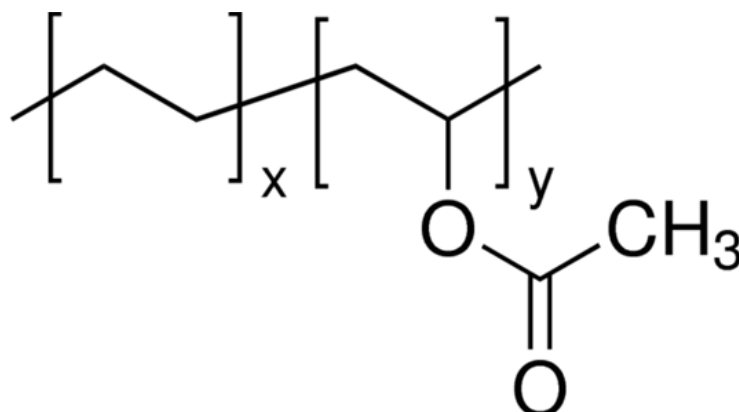
Augsta polimēra satura (virs 5%) gadījumā polimērs bitumenā veido matricu jeb nepārtraukto fāzi. Šajā sistēmā bitumena sastāvā esošās eļļas plastificē polimēru (polimērs uzsūc eļļas), bet asfaltēni ir disperģēti polimēra matricā. Šīs sistēmas īpašības būtiski atšķiras no iepriekš aprakstīto sistēmu īpašībām un atkarīgas pārsvarā no polimēra īpašībām.

1.3. POLIMĒRMODIFIKATORU GRUPAS

Polimērus, kurus var izmantot bitumena modifikācijai, var iedalīt sekojošās grupās [4 - 7]:

1) Termoplastiskie polimēri

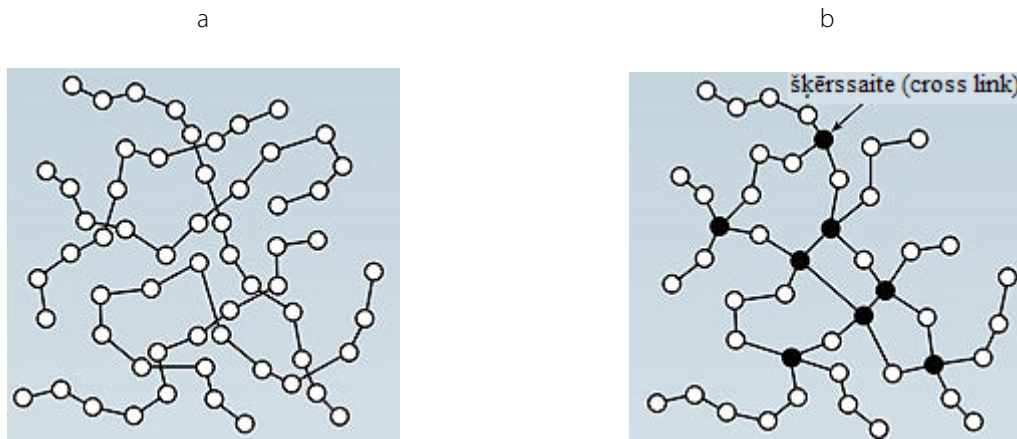
(paaugstinātā temperatūrā kūst, bet atdzesējot atgriežas iepriekšējā fizikālajā stāvoklī). Šos polimērus var vairākkārt pārstrādāt. Šāda īpašība izskaidrojama ar to uzbūvi. Šos polimērus veido dažāda garuma lineāras vai nēdaudz sazarotas molekulu ķēdes, kuras savā starpā saista starpmolekulārie pievilksnās spēki. Karsējot molekulas, tās sāk svārstīties, cita no citas attālinās un spēki, kas tās saista, pamazām izzūd, līdz polimērs pilnīgi izkūst. Pie šādiem polimēriem pieder polietilēns (PE), polipropilēns (PP), polistirols (PS), etilēna vinila acetāts (EVA). 1. attēlā parādīta EVA struktūra.



1. att. EVA struktūra [2]

2) Termoreaktīvie polimēri

paaugstinātā temperatūrā neklūst mīksti un tos nevar izkausēt, kā arī karsējot nav iespējams mainīt to formu. Šīs atšķirības nosaka termoreaktīvo polimēru uzbūve. Tā ir līdzīga telpiskam trīsdimensiju režģim, kurā elementārposmus saista izturīgas kovalentās saites (skat. 2. att.). Šādu struktūru var sagraut, tikai karsējot polimēru samērā augstās temperatūrās, kad notiek tā sadalīšanās. Pie šādiem polimēriem pieder epoksīda sveķi.



2. att. Polimēru struktūra: a) termoplastiskie; b) termoreaktīvie [3]

3) Dabiskie un sintētiskie kaučuki.

Dabiskais kaučuks ir amorfa viela, kas spēj kristalizēties cietā vielā. Kaučukam ir raksturīga elastības saglabāšana plašās temperatūras robežās, taču, ilgi uzglabājot kaučuku, tas kļūst cietš. Pie šādiem polimēriem pieder dabiskā gumija, polibutadiēns un poliizoprēns.

4) Termoplastiskais kaučuks.

Pie šādiem polimēriem pieder stīrēna-butadiēna bloka kopolimērs (SBS) un stīrēna-izoprēna bloka kopolimērs (SIS).

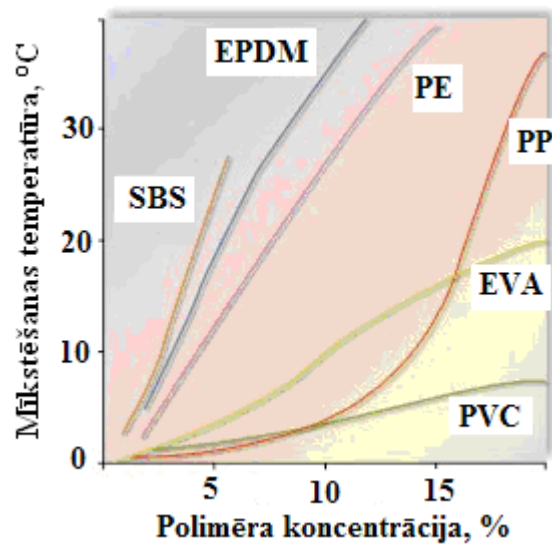
5) Jauktās sistēmas.

1. tabulā dots bitumena modificēšanai lietojamo polimēru priekšrocību un trūkumu apkopojums. Katram polimēram ir savas raksturīgās īpašības. Piemēram, EVA padara bitumenu stingu, bet SBS palielina bitumena elastību. Polimēra saturs bitumenā var svārstīties robežās no 2 līdz 20% no bitumena masas. Šobrīd SBS modificēta bitumena iegūšanai izmanto 2 - 3% polimēra (izņēmums ir augsti modificēti bitumēni). 3. attēlā parādīta mīkstēšanas temperatūras izmaiņa atkarībā no polimēra veida un koncentrācijas.

Bitumena modificēšanai lietoto polimēru īpašību salīdzinājums [1]			
Polimērs	Priekšrocības	Trūkumi	Pielietojums
Polietilēns (PE)	Izturība augstās temperatūrās; Novecošanas izturība Augsts stingums; Zemas izmaksas.	Grūti disperģējams bitumenā; PMB sistēmas stabilitātes problēmas; Augsts polimēra saturs, lai sasniegtu PMB īpašību uzlabojumus (rišu noturību); Nav elastīgas atjaunošanās.	Plašs industriālais pielietojums, bet bitumena modificēšanai izmanto ļoti reti.

Tabula 1

Polimērs	Priekšrocības	Trūkumi	Pielietojums
Polipropilēns (PP)	Viegli iestrādājams.	Neuzlabo elastību un mehāniskās īpašības; Zema termoplastu noturība; PMB sistēmas stabilitātes problēmas.	Bitumena modifikācijai neizmanto.
Etilēna vinila acetāts (EVA) Etilēna metakrilāts (EMA)	Ļoti laba savietojamība ar bitumenu; Augsta PMB sistēmas stabilitāte; Zemas izmaksas salīdzinājumā ar bloka kopolimēriem; Uzlabo bitumena adhēziju ar minerālmateriāliem.	Neuzlabo elastīgo atjaunošanos.	Bitumena modifikācijai un jumta segumiem.
Polivinilhlorīds (PVC)	Izturība augstās temperatūrās.	Piemērots kā aizpildītājs.	Bitumena modifikācijai neizmanto.
Stirēna-butadiēna bloka kopolimērs (SBS) un stirēna-izoprēna bloka kopolimērs (SIS)	Augsta elastība augstās un zemās ekspluatācijas temperatūrās; Augsta stiprība; Stabila PMB struktūra pie zema SBS satura.	Izmaksas; Augsta viskozitāte iekļāšanas temperatūrā (slikta viegliestrādāmība); Salīdzinājumā ar citiem polimēriem ir zemākā novecošanas noturība; Modificēšanai ir piemērots bitumens ar augstu eļļu un zemu asfaltēnu saturu.	Bitumena modifikācijai un jumta segumiem.
Etilēna-propilēna-diēna monomērs (EPDM)	Laba dispersijas spēja.	Sliktā viegliestrādāmība un savietojamība ar bitumenu; Modifikācijas efektivitātes panākšanai ir nepieciešams augsts polimēra daudzums.	Jumta segumiem.
Epoksīda sveķi	Ķīmiski izturīgi; Uzlabo adhēziju; Augsta noturība augstās un zemās ekspluatācijas temperatūrās.	Izmaksas; Bitumens uzrāda termoreaktīvo sveķu īpašības.	PMB bitumenu izmanto lidostu un tiltu segumiem.
Dabiskais kaučuks	Elastība; Rišu noturība; Stiepjamība (duktilitāte).	PMB sistēmas stabilitāte un novecošanās.	Bitumena modifikācijai.
Polibutadiēns, poliizoprēns	Laba dispersijas spēja; Elastīgas īpašības ir labākas nekā citiem termoplastiskiem polimēriem	Var sadalīties skābekļa klātbūtnē un augstās temperatūrās.	Bitumena modifikācijai un jumta segumiem.
Lietoto riepu gumija	Pieejamība; Zemas izmaksas; Uzlabo rišu, noguruma un termoplastu noturību.	Vairākas efektīvās tehnoloģijas ir patentētas; Ilgs bitumena modificēšanas laiks augstās temperatūrās; Ja gumija nav devulkanizēta, tad darbojas kā aizpildītājs.	Bitumena modifikācijai.
Kombinācijas	Uzlabojumi, kurus nevar panākt, izmantojot vienu polimēru.	Trīs un vairāku komponentu savietojamība un stabilitāte.	Bitumena modifikācijai.

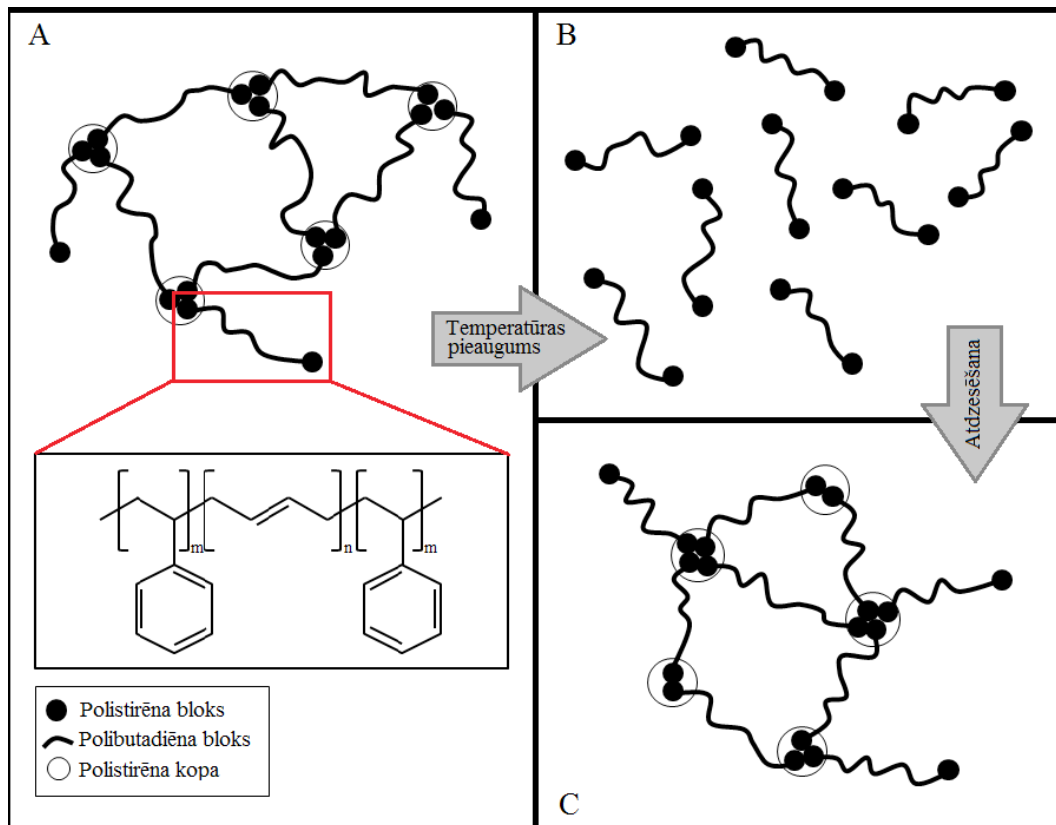


3. att. Sakarība starp polimēra koncentrāciju un mīkstēšanas temperatūru [1]

1.4. SBS MODIFICĒTIE BITUMENI

Vairums disperģēto polimēru ar bitumena saistvielu neveido ķīmiskās saites, bet mijiedarbojas tikai fizikālā līmenī. Šobrīd SBS polimērs, neskatoties uz salīdzinoši zemu novecošanās izturību un augstu cenu, ir vispopulārākais polimērs bitumena modifikācijai, jo uzlabo bitumena elastīgās īpašības zemās un aukstās ekspluatācijas temperatūrās [8].

Apkārtējās vides temperatūrās apstākļos SBS polimēra polistirēna (PS) bloks ir ciets un mehāniski stiprs, savukārt polibutadiēna (PB) bloks ir ļoti elastīgs. Šajā temperatūra starp PS un PB veidojas vājas fizikālās saites (starpmolekulārie spēki). Šī saite pazūd augstās temperatūrās (virs + 90°C), kad molekulārās termodinamiskās kustības kinētiskā enerģija ir lielāka nekā starpmolekulārie spēki [9-11]. Tomēr pēc atdzesēšanas SBS īpašības atjaunojas, jo starp PS un PB no jauna veidojas starpmolekulārās saites (skat. 4. att.).



4. att. SBS polimēra struktūra. [2]
A) apkārtējās vides temperatūrā, B) uzkaršējot, C) atdziesējot

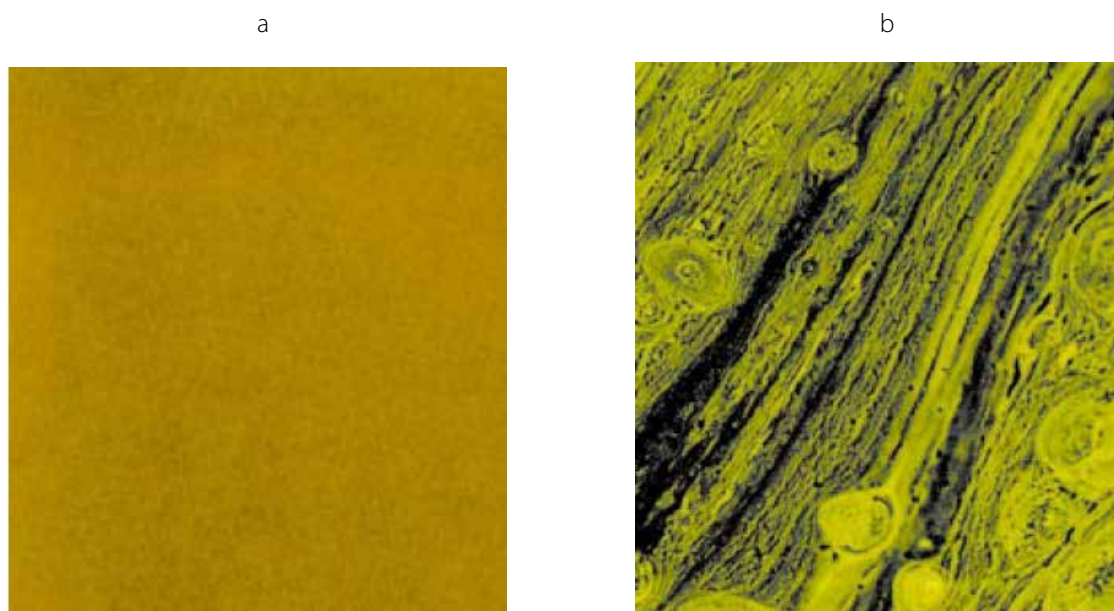
Labas īpašības un pieņemama cena padara SBS par populārāko bitumena modifikatoru, tomēr ir daži būtiskie trūkumi, piemēram, bitumena un SBS savietojamība nav pietiekami laba, jo SBS PMB struktūrā ar asfaltēniem "sacenšas" par vieglo frakciju – eļļu - absorbēšanu. Zems vieglo frakciju saturs nozīmē pārāk augstu asfaltēnu saturu, un polimēra ievadīšana var izraisīt asfaltēnu nogulsņēšanos (stabilitātes zudums), kā rezultāta PMB maisījums kļūs grūti iestrādājams. Kad PMB struktūrā notiek fāžu atdalīšanās, polimērs paceļas tuvu bitumena virsmai, bet asfaltēni nolaižas lejā. Pētījuma 1. kārtā šī parādība konstatēta vairākiem PMB bitumeniem, kad, nosakot uzglabāšanas stabilitāti, bitumena parauga augšējā daļa kļuva ļoti mīksta (augsta penetrācija), bet apakšējā daļa ļoti cieta (zema penetrācija). Svarīgi atzīmēt, ka PMB mīkstēšanas temperatūra lielā mērā atkarīga no aromātiskuma un izejas bitumena vidējās molekulārās masas un tikai nedaudz no izejas bitumena cietības.

Svarīga SBS modificētā bitumena negatīvā īpašība ir tā zemā noturība pret temperatūru, oksidāciju un ultravioleto starojumu, kas saistīta ar vāju polibutadiēna grupas divkārtšo saiti α -H. Nevēlamas ķīmiskās reakcijas (brīvu skābekļa atomu - peroksīda radikāļi un hidroperoksīda veidošanās) padara SBS polimēru jūtīgu pret temperatūru, oksidāciju un ultravioleto starojumu. Lai novērst šo trūkumu zinātnieki izstrādāja SBS polimēra hidrogenēšanas metodi - divkārtšās saites likvidācija (ķīmiskās saites piesātinātība) [2].

1.5. PMB KOMPONENŠU SAVIETOJAMĪBA UN STABILITĀTE

Visi PMB mikro līmeņi ir nevienmērīgi – polimērs uzbriest uzsūcot izejas bitumena vieglās frakcijas. Ar vieglajām frakcijām piesātināta polimēra fāze ievērojami palielinās tilpumā [12]. Savietojamība starp bitumenu un polimēru ir nepieciešama, lai izvairītos no fāžu atdalīšanās PMB uzglabāšanas un sūkņēšanas laikā un sasniegtu atbilstošas asfaltbetona īpašības. Polimērs var būt savietojams, daļēji savietojams un nesavietojams ar bitumenu. Piejaucot nesavietojamu polimēru bitumenam, iegūst heterogēnu maisījumu bez kohēzijas vai duktilitātes. Ja bitumenam pievieno daļēji savietojamu polimēru, tad ir nepieciešams papildus mehāniskais, ķīmiskais vai termiskais process, kas uzlabo izejas bitumena īpašības. Savietojamie materiāli ar tradicionālām maisīšanas tehnoloģijām veido fizikāli stabilus maisījumus un var gan uzlabot, gan arī neuzlabot bitumena īpašības [1].

5. attēlā ir parādīti stabila un nestabila PMB maisījuma attēli, kas iegūti ar fluorescences mikroskopijas metodi.



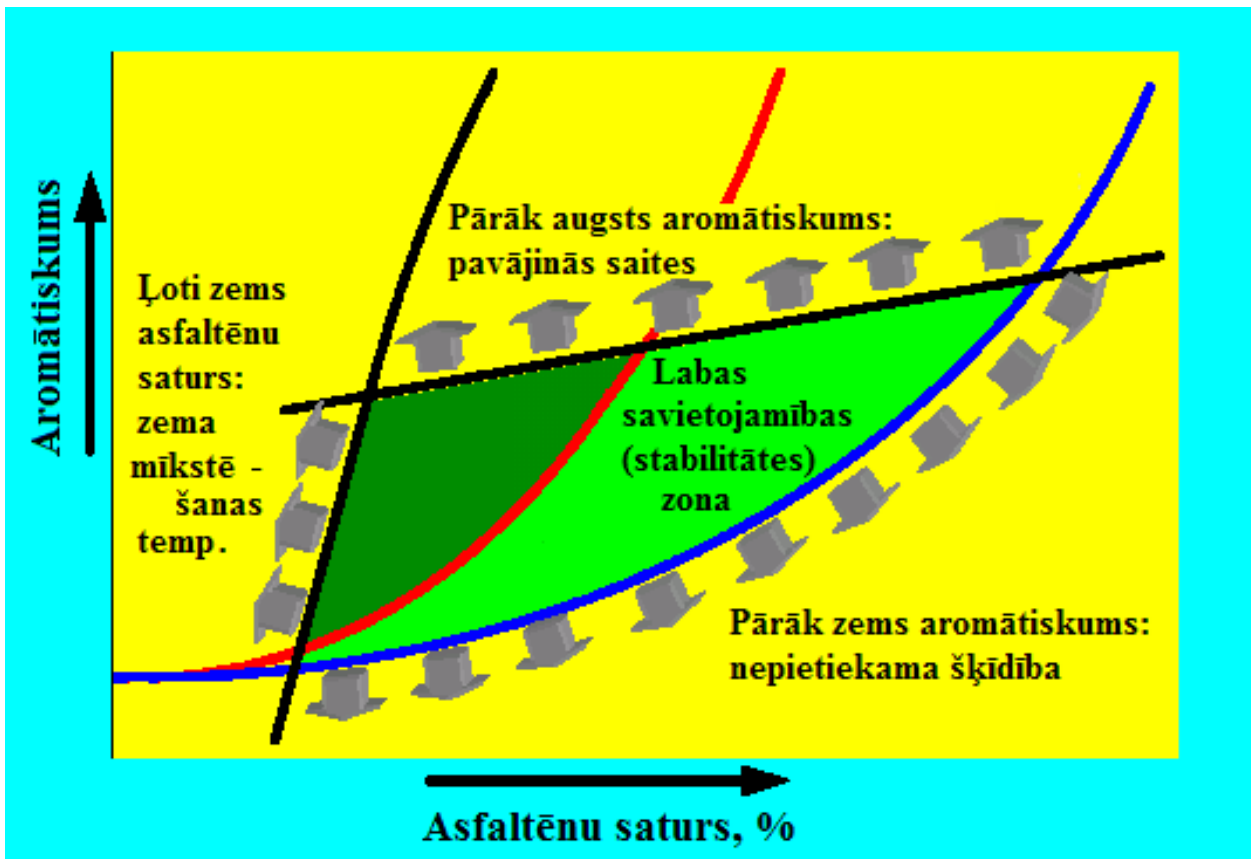
**5. att. Fluorescences mikroskopija [1]
a) Stabila PMB sistēmā; b) Nestabila PMB sistēma**

PMB sistēmas stabilitāte SBS modificētiem bitumeniem, kā arī citiem termoplastiskiem elastomēriem (TE), ir atkarīga no vairākiem faktoriem:

- Polimēra saturs;
- Polimēra molekulārās masas;
- Asfaltēnu molekulārās masas;
- Aromātiskuma.

Stabilas PMB struktūras radīšanai bitumenam jāsaturs pietiekami liels vieglo frakciju saturs, lai šķīdinātu un uzbriedinātu polimēru (skat. 6. att.). Lai veikt efektīvu bitumena modifikāciju, jāņem vērā sekojoši apstākļi:

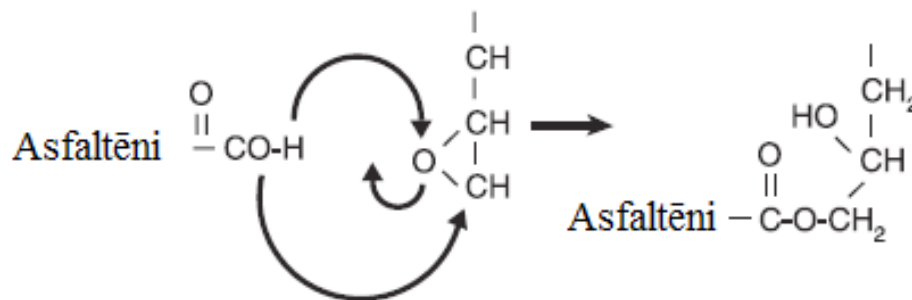
- Ja bitumena saturā ir daudz aromātisko oglekļa ražu, tad polimērs labi šķīdīs bitumenā.
- Ja polimērs nešķīst, tad šķīdība jānodrošina, pievienojot eļļu (plastifikatoru).



6. att. Bitumena funkcionālo grupu ietekme uz PMB maisījuma stabilitāti [1]

Vieglo frakciju – plastifikatoru - ievadišana var uzlabot PMB stabilitāti, tomēr pārāk liels vieglo frakciju saturs var veicināt pārāk lielu uzbrišanu, radot negatīvu polistirēna bloku plastifikācijas efektu. Līdz ar to jautājums par PMB sistēmas stabilitātes nodrošināšanu joprojām paliek aktuāls. Viens no perspektīvākajiem risinājumiem ir ķīmiskās vielas, kā, piemēram, sērs, dialkila amīda tauki, cinka sulfonēts SBS (patents Nr. EP0618274A1) vai maleīna anhidrīds savienots ar stirēna etilēna/butilēna stirēnu (SEBS-gMAH), kuras nodrošina ķīmiskās saites veidošanos starp polimēru un bitumenu (polimēru funkcionalizācija).

Ja bitumenam pievieno funkcionalizēto polimēru (funkcionalizācija veido ķīmisku saiti), tad starp bitumenu un polimēru var veidoties ūdeņraža saite. Kā piemēru, kad polimērs ķīmiski reaģē ar bitumenu, var minēt uzņēmuma Dupon (Francija) komercializētu produktu Elvaloy®, kas ir terpolimērs (kopolimērs, kurš sastāvs no trim atšķirīgiem monomēriem), kurš ietver etilēnu, butilakrelātu un glicidol metakrilātu (GMA). Šim polimērām tieši GMA molekulas veido ķīmisku saiti ar bitumenu (skat. 7. att.).



7. att. Polimēra un asfaltēnu ķīmiskā reakcija

1.6 PMB IZGATAVOŠANA

Maisīšanas apstākļiem un disperģijai ir būtiskā ietekme uz PMB struktūru un īpašībām. Pietiekami ilgs maisīšanas laiks nodrošina polimēra atbilstošu dispersiju un PMB struktūras viendabību. Savukārt pārāk ilgs maisīšanas laiks var veicināt PMB deformatīvo īpašību pasliktinājumu zemās ekspluatācijas temperatūrās. Bez maisīšanas un malšanas, svarīgs kontrolējams un mainīgs parametrs ir PMB izgatavošanas temperatūra. Faktori, kuri ietekme PMB ražošanas procesu ir [1]:

1) Polimēra daba

Laiks, kurš nepieciešams lai iegūt PMB maisījuma viendabību ir atkarīgs no polimēra tipa un tā molekulāras masas. Jo lielākā molekulārā masa, jo ilgāks maisīšanas laiks būs nepieciešams.

2) Polimēra fizikālā forma (granulas, pulveris)

Jo smalkākas polimēra daļiņas, jo mazāk laika būs nepieciešams malšanai, lai iegūt atbilstošu dispersitāti. Polimēra īpatnējās virsmas palielinājums nozīme tā straujāku šķīšanu bitumenā. Tas nozīme, ka pulverveidīgs polimērs disperģēsies un šķīdis bitumenā straujāk nekā granulveidīgs.

3) Izejas bitumena klase un izcelsme

Bitumenam ir svarīga loma, jo tā funkcionālo grupu sastāvs un viskozitāte ievērojami ietekmē PMB ražošanu. Bitumenam jā satur pietiekoši daudz vieglo frakciju, lai šķīdinātu un uzbriedinātu polimēru, kā citas funkcionālo grupas, lai nodrošinātu PMB ilgmūžību. Bitumeni ar zemāku viskozitāti veicina modifikācijas procesa paātrinājumu (ātrāka uzbriedināšana, dispersija un homogenizācija).

4) Iekārtu tips

Polimēru var izkļiedēt (izšķīdināt) bitumenā divos veidos – izmantojot augstās un zemās bīdes maisītājus. Zemās bīdes maisītāju izmanto pulverveidīga polimēra izkļiedēšanai bitumenā. Lāpstiņu maisītājs bitumena tvertnē nodrošina PMB viendabību un maisījuma temperatūras vienmērību. Augstās bīdes maisīšanas procesā polimēra daļiņas tiek sasmalcinātas un vienmērīgi izkļiedētas PMB ražotnes rezervuārā.

5) Laika – temperatūras režīms maisīšanas laikā

No ekonomiskā aspekta jā sasniedz zemāku maisīšanas temperatūru un laiku PMB maisījuma viendabības nodrošināšanai. PMB izgatavošanai nepieciešamais laiks un temperatūra atkarīga no bitumena tipa un polimēra uzbriedināšanas laika. Piemēram, ražojot PMB ar SBS polimēru, jāizvairās no temperatūrām, kas lielākas par 190°C, lai samazinātu izejas bitumena un polimēra priekšlaicīgu novecošanos.

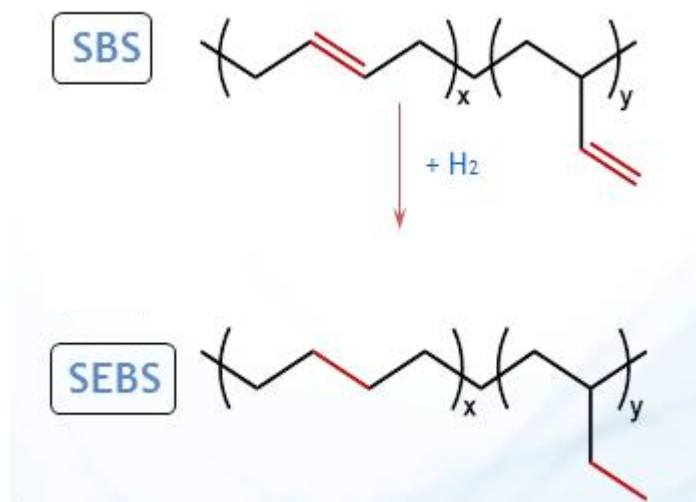
1.7 RISINĀJUMI PMB AR SBS TRŪKUMU NOVĒRŠANAI

Zināšanas par bitumena modifikāciju ar polimēriem ir strauji attīstījušās, tomēr joprojām pastāv daži būtiski trūkumi, kā, piemēram, PMB augstās izmaksas, zema novecošanas izturība un uzglabāšanas stabilitāte, kuri ierobežo to pielietojumu. Pētnieki dažādos veidos mēģina novērst PMB trūkumus. Progresīvākie PMB trūkumu novēršanas pasākumi ir apkopoti 2. tabulā [2].

Tabula 2		
Paņēmieni PMB stabilitātes un novecošanās problēmu minimizēšanai		
Uzlabošanas paņēmieni	Priekšrocības	Trūkumi
Ķīmiskā piesātinātība (divkāršās saites likvidācija)	Uzlabota noturība pret augstām temperatūrām, oksidāciju un ultravioleto starojumu	Augstas izmaksas; Uzglabāšanas stabilitātes problēmas.
Vulkanizācija ar sēru	Uzlabota uzglabāšanas stabilitāte; Labas īpašības augstās ekspluatācijas temperatūrās.	Slikta reciklējamība; Zema novecošanās izturība; Pielietojams tikai nepiesātinātiem polimēriem, kā, piemēram, SBS.
Antioksidanti	Samazinās oksidācija.	Augstas izmaksas.
Hidrofobie māla minerāli	Uzlabota uzglabāšanas stabilitāte; Laba novecošanās izturība; Laba rīšu noturība.	Nav īpašību uzlabojumu zemās ekspluatācijas temperatūrās, piemēram, duktilitāte un elastība.
Funkcionalizācija	Uzlabotā savietojamība ar bitumenu.	Augstas izmaksas; Dažos gadījumos grūti kontrolējams.
Reaģējošie polimēri	Uzlabotā savietojamība ar bitumenu; Rīšu noturība.	Nav īpašību uzlabojumu zemās ekspluatācijas temperatūrās.

1.7.1 ĶĪMISKĀ PIESĀTINĀŠANA

Nevēlamas ķīmiskās reakcijas (brīvu skābekļa atomu - peroksīda radikāļi un hidroperoksīda - veidošanās) padara SBS polimēru jūtīgu pret temperatūru, oksidāciju un ultravioleto starojumu. Lai pārvarētu šos trūkumus, zinātnieki lielu uzmanību pievērš ķīmiski piesātināto termoplastisko elastomēru, kā, piemēram SEBS (stirēns-etilēns/butadiēns-stirēn) radīšanai un to īpašību izpētei. Šo polimēru iegūst veicot SBS polimēra hidrogenēšanu jeb piesātināšanu ar ūdeņradi (skat. 8. att.). Ķīmiskā piesātinātība (divkāršās saites likvidācija) padara polimēru ļoti noturīgu pret augstām temperatūrām, oksidāciju un ultravioleto starojumu,

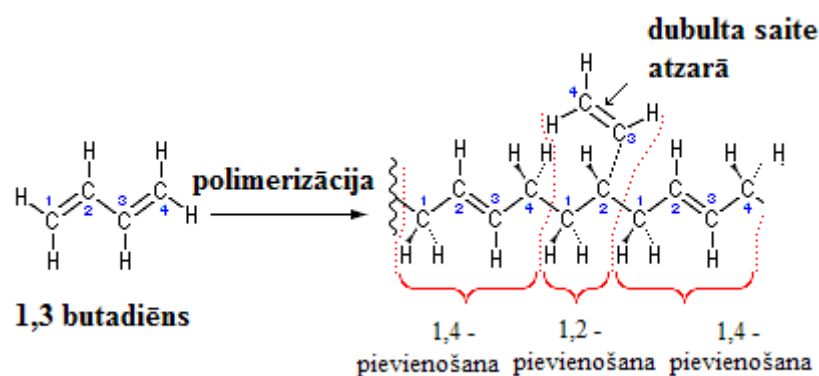


8. att. SEBS polimēra iegūšana, veicot SBS polimēra hidrogenēšanu [13]

tomēr divkāršās saites (ogleklis-ogleklis) likvidācija samazina SEBS polimēra, salīdzinājumā ar SBS, polaritāti, līdz ar to var nedaudz samazināties šī polimēra savietojamība ar bitumenu. Stablu PMB struktūru ar SEBS polimēru var iegūt, ja polimēra daudzums ir zem 4%. Kā SEBS polimēra negatīvās īpašībām jāmin augstāka cena (papildus izmaksas par hidrogenēšanu) un etilēna/butilēna grupas tieksme kristalizēties.

Lai novērst šos trūkumus, veikta daļējā SBS hidrogenēšana un radīts SBEBS (stirēn-butadiēns-etilēns/butilēns-stirēns) tipa kopolimērs. Eksperimentāli noteikts, ka šim polimēram salīdzinājumā ar SBS ir labākas mehāniskās īpašības (rišu noturība, elastība), uzglabāšanas stabilitāte un noturība pret augstām temperatūrām, oksidāciju un ultravioleto starojumu.

Vēl viens mēģinājums uzlabot SBS polimēra noturību pret augstām temperatūrām, oksidāciju un ultravioleto starojumu ir vājas divkāršās saites (ogleklis-ogleklis) pārvietošana, izmantojot augstu vinila saturu, no vidusdaļas (pamatvietas) uz atzarojumu. To var panākt ar speciālu apstrādi, pievienojot 1,3 butadiēnam speciālu 1,2 piedevu (skat. 9. att.). Šī, PMB struktūrai pārvietotā divkāršā (ogleklis-ogleklis) saite, oksidēsies ievērojami lēnāk [8-10].



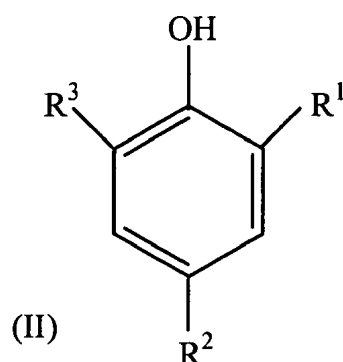
9. att. SBS ar augstu vinila saturu – divkāršās saites (ogleklis-ogleklis) pārvietošana uz atzarojumu

1.7.2. VULKANIZĀCIJA AR SĒRU

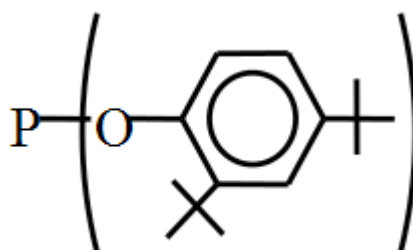
Vulkanizācija ar sēru uzlabo bitumena un SBS polimēra uzglabāšanas stabilitāti. Sērs izveido ķīmiskās šķērssaites starp polimēra molekulām un ķīmiski savieno bitumenu un polimēru ar sulfīda vai/un polisulfīda saitēm. Šīs ķīmiskās saites nepārraujas augstās temperatūrās un līdz ar to ir daudz stiprākās nekā vājas fizikālās saites, nodrošinot uzlabotu uzglabāšanas stabilitāti. Šķērssaites starp polimēra molekulām nodrošina polimēra režģa izveidi un stabilitāti, savukārt ķīmiskā saite starp bitumenu un polimēru samazina sadalīšanas iespēju. Tomēr sēra izmantošana bitumena un polimēra uzglabāšanas stabilitātes nodrošināšanai aprobežojas ar ķīmiski nepiesātinātiem polimēriem, piemēram, SBS, kam saglabāta vāja nepiesātināta divkārtšā saite (ogleklis – ogleklis), kas iesaistīta ķīmiskā reakcijā ar sēru. Zinātniekiem nav vienota viedokļa par sēra izmantošanu PMB struktūras stabilitātes uzlabošanai, jo daži pētnieki ir konstatējuši, ka sērs uzlabo bitumena reoloģiskās īpašības, bet citi ir secinājuši, ka vulkanizācija ar sēru pasliktina novecošanas izturību. Šī paņēmiena plašu pielietojumu ierobežo PMB bitumena slikta reciklējamība (ķīmisko sēra reakciju vulkanizācijas procesā dēļ).

1.7.3 ANTIOKSIDANTI

Antioksidantu uzdevums ir palēnināt PMB oksidāciju. Laboratorijas apstākļos polimērmodificētā bitumenā var ievadīt dažādus antioksidantus, kā, piemēram, kavēts fenola maisījums (patents Nr. EP 2029704 B1) jeb fenola antioksidants (skat. 10. att.), fosfīta antioksidants (skat. 11. att.), organiskais cinka antioksidants.



10. att. Fenola antioksidanta struktūra



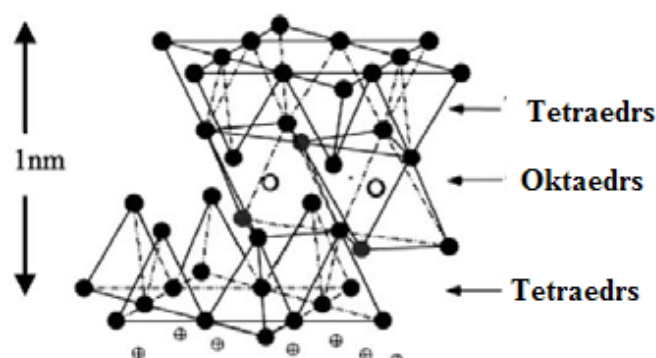
11. att. Fosfīta antioksidanta struktūra

Antioksidanti neitralizē brīvos radikāļus un/vai sadala hidroperoksīdus, kuri veidojas oksidācijas procesā. Antioksidācijas procesi notiek lielos ātrumos (augsta reaktivitāte), tāpēc laboratorijas apstākļos veicot PMB novecošans procesu palēnināšanu, palēnina arī antioksidācijas ātrumu. Šobrīd pētījumi notiek laboratorijas apstākļos, un secināts, ka reālos PMB ražošanas un ekspluatācijas apstākļos antioksidantu uzvedība krasi

atšķirsies. Tāpat augstās antioksidācijas izmaksas ir vēl viens faktors, kas ierobežo šo vielu plašāku izmantošanu ceļu industrijā.

1.7.4 HIDROFOBIE MĀLA MINERĀLI

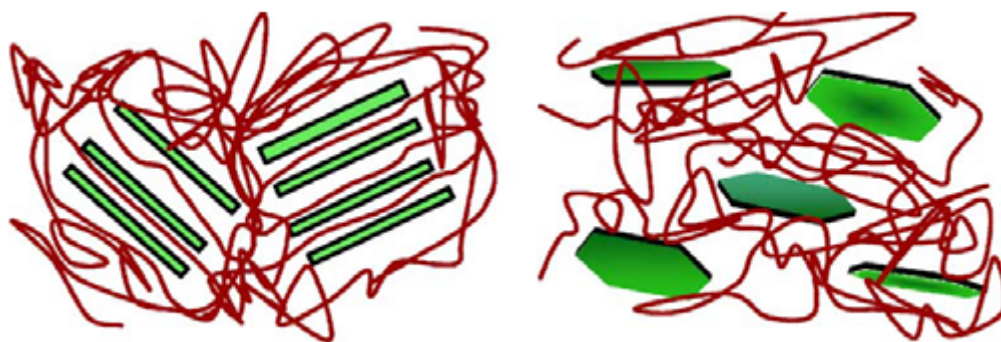
Hidrofobus māla minerālus (montmorilonīta māls) izmanto gan nemodificētam, gan modificētam bitumenam. Polimērmodificētā bitumenā šo vielu izmanto, lai uzlabotu novecošanās izturību, jo disperģētas māla plāksnītes kalpo kā aizsargbarjera oksīdam un UV. Tāpat šis paņēmieni uzlabo PMB uzglabāšanas stabilitāti, jo samazina blīvumu starpību starp polimēru un bitumenu (līdzsvarojošot virsmas spraigumu starp bitumenu un polimēru). Šim minerālam ir slāņaina struktūra, kurā katra atsevišķa slāņa biezums ir ap 1 nm (nanometru) (skat. 12. att.). Māla minerāla katrs slānis (plāksnīte) spēj disperģēties PMB struktūrā un nano līmenī mainīt virsmas īpašības (spraigumu) - hidrofilas (vielu piesaistošās virsmas) uz hidrofobām (vielu atgrūstošām virsmām). Māls PMB struktūrā var būt eksfoliēts vai interkalēts (skat. 13. att.).



12. att. Hidrofobu mālu (montmorilonīta māls) struktūra

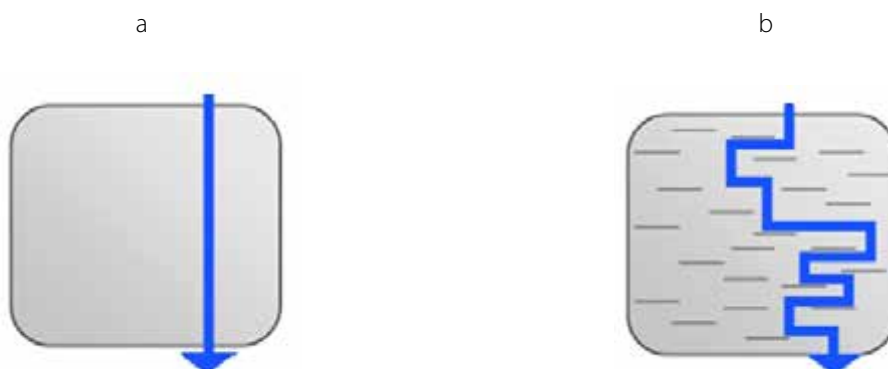
a

b



13. att. Hidrofobu mālu disperģēšana PMB struktūrā.
a) interkalēts; b) eksfoliēts

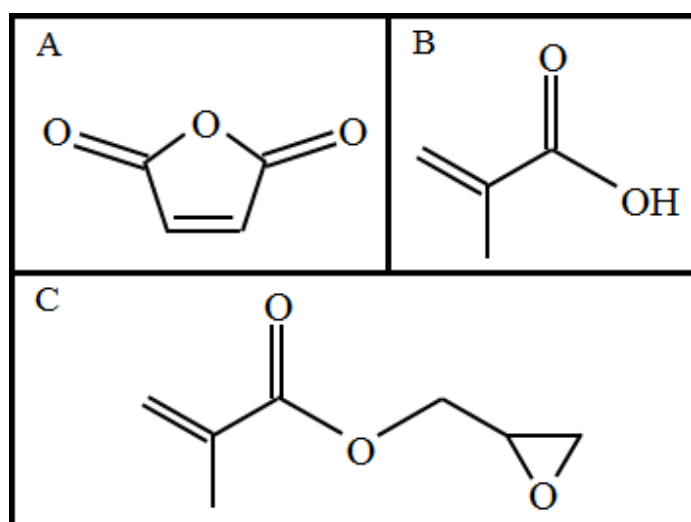
Hidrofobu mālu ievadišana uzlabo novecošanās izturību, jo disperģētās māla nano plāksnītes kavē skābekļa iekļūšanu PMB struktūrā (skat. 14. att.). Svarīgi atzīmēt, ka pārāk augsts hidrofobu māla minerālu saturs var ievērojami pasliktināt PMB elastības īpašības.



14. att. Skābekļa penetrācija
a) PMB bitumens ar SBS; b) PMB bitumens ar SBS un hidrofobu mālu

1.7.5 FUNKCIONALIZĀCIJA UN REAĢĒJOŠIE POLIMĒRI

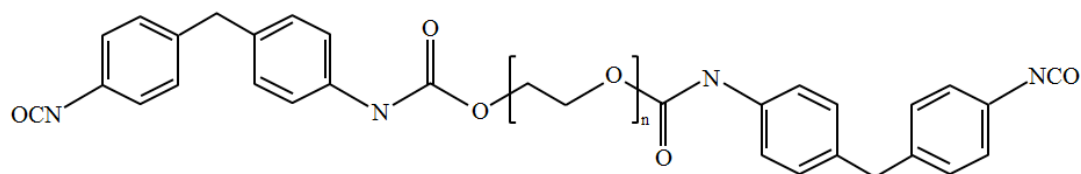
Funkcionalizācija ir speciālo funkcionālo grupu piedevu ķīmiska pievienošana, lai uzlabot tādas PMB īpašības, kā, piemēram, uzglabāšanas stabilitāte, novecošanas izturība, adhēzija ar minerālmateriāliem, rišu, noguruma un termoplaisu noturība. Šis ir viens no efektīvākajiem paņēmieniem, kā panākt PMB bitumena īpašību uzlabošanu. Veicot funkcionalizāciju, var ne tikai uzlabot PMB īpašības, bet arī radīt jaunus PMB, kā, piemēram, reaģējošos polimērus, kuri, ķīmiski reaģējot ar bitumena funkcionālām grupām, veido viendabīgu un stabilu struktūru. Ķīmisko piesātināšanu, veicot divkāršās (ogleklis-ogleklis) saites likvidāciju (no SBS iegūstot SEBS), var uzskatīt par funkcionalizācijas veidu. Pievienojot karboksilgrupas vai aminogrupas skābes, var uzlabot PMB ar SBS polimēru uzglabāšanas stabilitāti, nepasliktinot sākotnējās (pirms funkcionalizācijas) PMB īpašības. Tāpat veiksmīgs PMB struktūras funkcionalizācijas paņēmieni ir SBS savienošana ar maleīna anhidrīdu (MAH), metakrila skābi un glicidolu metakrilātu (GMA) (skat. 15. att.).



15. att. Struktūras
a) maleīna anhidrīds (MAH); b) metakrila skābe; c) glicidols metakrilāts (GMA)

Svarīgi atzīmēt, ka, veicot funkcionalizāciju, jāizvairās no pārmērīgas bitumena un polimēra mijiedarbības, lai nesagraut PMB divfāzu (polimērs-bitumens) struktūru. Tāpat reaktīvie etilēna polimēri, pārmērīgu starpķēžu ķīmisko reakciju rezultātā, var radīt gelāciju (gela veidošanos). Stablu PMB struktūru, izmantojot reaktīvo etilēna polimēru, var iegūt ar nelielu (līdz 2,5%) polimēra saturu. Veicot funkcionalizāciju, ne vienmēr

tiek saglabātas īpašības zemās ekspluatācijas temperatūrās, ko nodrošina nefunkcionalizēti PMB bitumēni. Kā piemēru var minēt polietilēnglikola (PEG) funkcionalizāciju ar 4,4 difenilmetāna ditizanātu (MDI) (skat. 16. att.). Šī polimēra un bitumēna īpašības ir ar uzlabotu uzglabāšanas stabilitāti, rišu noturību, bet zemu termoplaisu un noguruma plaisu izturību.



16. att. Struktūra: polietilēnglikols (PEG) funkcionalizēts ar 4,4 difenilmetāna ditizanātu (MDI)

1.7.6 KOPSAVILKUMS

Bitumēni ar zemu polimēra saturu (zem 4%) ir piemēroti ceļu bitumēnu modifikācijai. Zems polimēra saturs uzlabo PMB īpašības un, salīdzinājumā ar augsti modificētiem bitumēniem, nodrošina labu uzglabāšanas stabilitāti. Dažādiem modifikatoriem ir dažādas priekšrocības un trūkumi, tomēr SBS polimērs, savu īpašību un izmaksu dēļ, joprojām paliek populārākais bitumēna modifikators. Izejas bitumēnam jāsaturs pietiekami daudz vieglo frakciju, lai iegūtu savietojamu un stabilu SBS polimērmodificētu bitumēnu. Kā ārējo faktoru kvalitatīva PMB iegūšanai jāmin atbilstošu ražošanas apstākļu nodrošināšanu. Galvenais SBS modificēta bitumēna trūkums ir zemā novecošanas izturība temperatūras un UV ietekmē. Tiek izstrādātas vairākas metodes šo trūkumu novēršanai, tomēr, līdz to plašākai ieviešanai ceļu būvniecības industrijā, nepieciešama turpmāka šo metožu izpēte.

1.8. NOVECINĀTĀ BITUMĒNA ĪPAŠĪBU ATJAUNOŠANA

1.8.1. NOVECOŠANAS MEHĀNISMS

Naftas bitumēna struktūrai ir koloidāls raksturs, kurā asfaltēni ir dispersā fāzē, un maltēni ir dispersā vidē. Lielākajai daļai bitumēna saistvielām ir asfaltēnu micellas (*micelles*), kas atšķaidītas diezgan labi strukturētā dispersijas vidē. Asfaltēni dispersā vidē veido agregātus, bet nespēj izveidot nepārtrauktu tīklu. Izmaiņas bitumēna saistvielā laika gaitā ir atkarīgas no tā ķīmiskā sastāva izmaiņām. Kad bitumēns noveco daļa maltēnu vides transformējas asfaltēnu fāzē, kā rezultātā bitumēns iegūst augstāku asfaltēnu un zemāku maltēnu saturu. Ja ir pārāk mazs maltēnu saturs, lai disperģētu (izkliedētu) asfaltēnus, asfaltēni flokulēsies (veidojas lielāki asfaltēnu aglomerāti). Tas noved pie augstākas bitumēna viskozitātes un zemākas stiepjamības jeb duktilitātes (pasliktinās elastīgas īpašības), jo asfaltēnu micellas kļūst nemobilas, lai pārvietotos vienai gar otru pielikta spiediena ietekmē. Līdz ar to bitumēna saistvielas pretestība plaisu veidošanai vai sabrukumam samazinās.

Lai atjaunotu bitumēna reoloģiskās īpašības, novecojušo bitumēna saistvielu var sajaukt ar reciklēšanas līdzekli, kas, piemēram, var būt bitumēna mīkstinošs vai atjaunojošs līdzeklis. Ņemot vērā tādus svarīgus faktorus, kā zemā cena, pieejamība, kā arī nepieciešamība otrreizēji pārstrādāt materiālu vai vielu, bitumēna atjaunotāji parasti ir atkritumi. Publikācijās aprakstītas dažādas bitumēna atjaunojošās vielas: rafinēti tauki, atkritumu augu eļļa, cepamo eļļu atkritumi, mīksta bitumēna, motoreļļu atkritumi, emulsijas, terciārie amīni

u.c., kuru sastāvā ir augsts maltēnu saturs. Galvenā atšķirība ir veids, kā šie materiāli tiek pielietoti praksē (deva, temperatūra, utt.). Atjaunojošajiem līdzekļiem jāsatur augsts aromātisko oglekļa daļiņu daudzums, kurš nepieciešams, lai izkliedētu asfaltēnus (izjaukt aglomerātus). Tomēr šiem līdzekļiem jāsatur zems piesātināto oglekļa daļiņu daudzums, kuri ir nesavietojami (nesaderīgi) ar asfaltēniem.

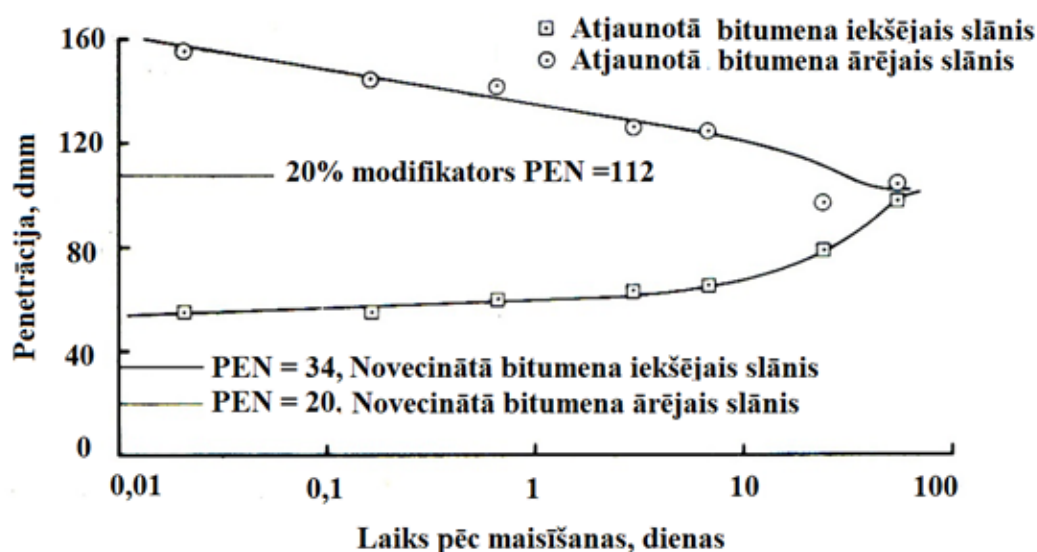
1.8.2. ATJAUNOJOŠĀS PIEDEVAS DIFŪZIJA NOVECOJUŠĀ BITUMENĀ

Atjaunošanas efektivitāte atkarīga no vienmērīgas atjaunojošās vielas izkliedēšanas novecojušā bitumenā, kā arī atjaunojošās vielas difūzijas novecojušā bitumenā, t.i., slānī kurš pārklāj pildvielas daļiņu. Pētījuma [16] autori nonāk pie secinājuma, ka vienmērīgu atjaunojošās vielas izkliedi novecinātā bitumenā var panākt ar mehānisku maisīšanu rūpnīcā.

Atjaunojošās piedevas difūzija novecinātā bitumenā notiek sekojoši [16,17]:

1. Atjaunojošā viela veido plānu zemas viskozitātes slāni apkārt ar novecināto bitumenu pārklāto šķembu;
2. Atjaunojošā piedeva iespiežas novecinātajā bitumenā (samazinās atjaunojošās piedevas zemas viskozitātes slānis apkārt šķembu daļiņai);
3. Iespiešana novecinātā bitumena dziļumā turpinās pat tad, kad uz šķembu daļiņas vairs nav palicis atjaunošanās piedevas slānis;
4. Pēc noteikta laika atjaunojamā bitumenā tiek sasniegts līdzsvars (skat. 17. att.).

Svarīgi atzīmēt, ka atjaunojamā bitumena (apkārt šķembu daļiņai) ārējā un iekšējā slāņa viskozitātes atšķiras. Pētījumā [16] parādīta penetrācijas izmaiņa iekšējam un ārējam novecojušā bitumena slānim pēc atjaunošanas piedevas pievienošanas kā funkcija no laika. 17. attēlā redzams, ka pēc noteikta laika abi slāņi sasniedz vienādu konsistenci (penetrācijas radītāju). Līdz ar to tika secināts, ka atjaunojošās piedevas difūzija novecinātā bitumenā notiek asfaltbetona ražošanas un ieklāšanas laikā, kā arī seguma ekspluatācijas laikā. Tomēr, ja difūzija netiek pabeigta maisīšanas un ieklāšanas laikā un turpinās ekspluatācijas laikā, nozīme, ka reciklējamā bitumena atjaunināšana nav pabeigta, kas var veicināt priekšlaicīgu rīšu, noguruma un termoplaisu veidošanos [18-20]. Pētījumā [21] secināts, ka difūzijas ātrumu nosaka atjaunojošās piedevas (maltēnu) viskozitāte nevis reciklējamā bitumena viskozitāte. Difūzijas ātrumu var paātrināt palielinot maisīšanas temperatūru vai/un pievienojot vieglo frakciju (maltēnu, eļļu) atšķaidītāju.



17. att. Atjauninātā bitumena penetrācijas izmaiņa laikā difūzijas rezultātā [16]

Ļoti perspektīvs un viegli realizējams bitumena atjaunošanas veids ir izmantot "svaigu" zemākas viskozitātes ceļa bitumenu kā reciklējāmā bitumena atjaunojošo piedevu. Izmantojot šo atjaunošanas veidu difūzijas ātrumam ir noteicošā loma. Šajā gadījumā difūzijas ātrums būs atkarīgs no bitumenu savietojamības, maisīšanas temperatūras, "svaiga" un reciklējamā bitumena ekspluatācijas īpašībām un to proporcijas maisījumā [22].

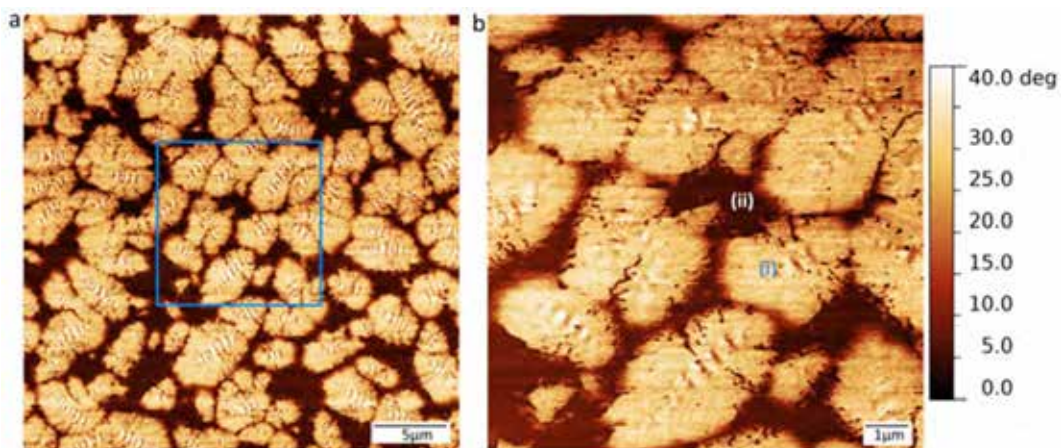
Pētījumā [16] rekomendē veikt atjaunojošās piedevas un "svaiga" bitumena iepriekš sajaukšanu, lai uzlabotu asfaltbetona maisījuma plaisu noturību. Tomēr, ar šo paņēmieni atjaunota bitumena viskozitāte būs zemāka nekā standarta klases bitumenam (piem., B70/100 vai B50/70) vai atjaunotam bitumenam, kurš iepriekš nav maisīts. Tāpēc svarīgi šo faktoru ieverot, lai radītu risu noturīgu asfaltbetona maisījumu.

1.8.3. ATJAUNINĀTĀ BITUMENA STRUKTŪRAS NOVĒRTĒJUMS

Esošās bitumena īpašību testēšanas standarta metodes neļauj novērtēt novecinātā un atjaunojamā bitumena struktūru (morfoloģiju). Lai bitumena atjaunošanas procesu padarītu efektīvāku, bitumena struktūru ir jāvizualizē. Vizualizēšanu var veikt izmantojot atomspēka mikroskopijas metodi (ATM), kura aprakstīta šī pētījuma 1. etapā. Pētījumā [23] veikta "svaiga", novecināta, un atjaunota bitumena (atjaunošanas piedeva BM1 un CM1, kuru ražotājs ir Latexfalt BV no Holandes (skat. 3. tab.)) mikrostruktūras izpēte.

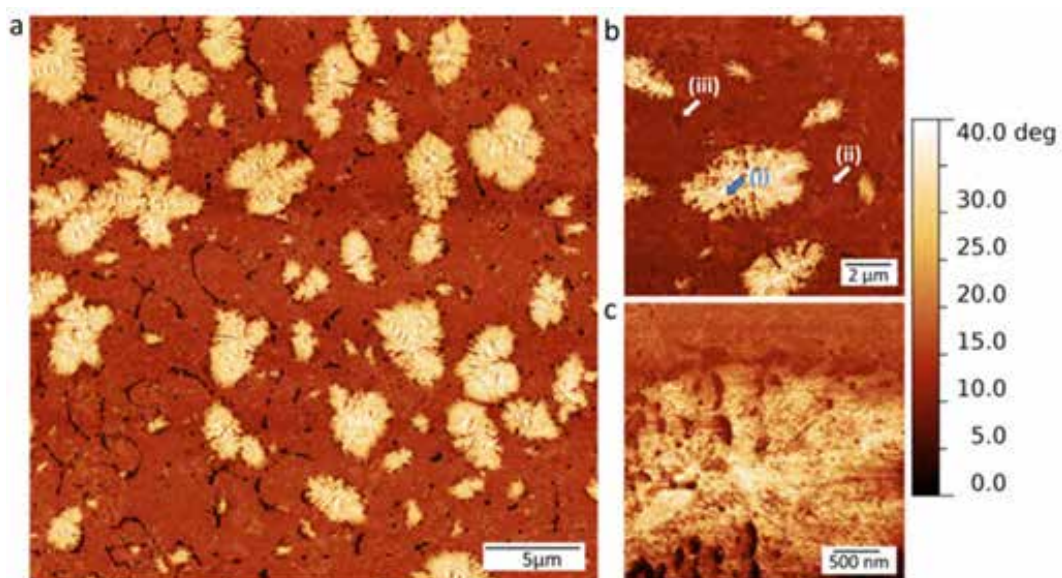
Tabula 3				
Bitumena un atjaunojošo piedevu raksturojums [23,24]				
Nosaukums	Penetrācija, 0,1mm	Viskozitāte 60°C, Pa·s	Tips	Piezīme
Ceļa bitumens B70/100	83	242,2	-	-
BM1	-	5,0	Atjaunojošā piedeva	Emulsijas veida
CM1	-	0,2	Atjaunojošā piedeva	Eļļu tipa, šķidra
P1	25	1067,9	Novecināts bitumens B70/100	Novecināts labora- torijas apstākļos
P1BM1_20	-	305,7	Atjaunināts bitumens P1	20% atjaunojošā viela BM1
P1BM1_10	-	110,4	Atjaunināts bitumens P1	10% atjaunojošā viela BM1
P1CM1_25	-	22,8	Atjaunināts bitumens P1	25% atjaunojošā viela CM1

Vizualizējot "svaigā" bitumena B70/100 struktūru, var novērot, ka šim bitumenam ir izteikta divu fāžu (i un ii) struktūra (skat. 18. att.). Fāze (i) sastāv no gludiem, eliptiskiem domēniem ("bišu" fāze). Šī fāze ir izkliedēta nepārtrauktajā vidē jeb matricas fāzē (ii). Abām fāzēm ir atšķirīgas materiāla īpašības, to norāda ATM "tapping" režīmā uzņemtie attēli (kontrasts starp fāzēm un fāžu nobīde). Fāze (i) ir cieta, bet matrica (ii) ir mīksta. Eliptiski domēni uzrāda augstuma svārstības un virsmas grubuļainumu domēna vidū (garenass virzienā). Domēna garums svārstās no 2 līdz 6µm. Domēni iegremdēti 2-5 nm attiecībā pret nepārtrauktās fāzes (ii) vidējo augstumu.



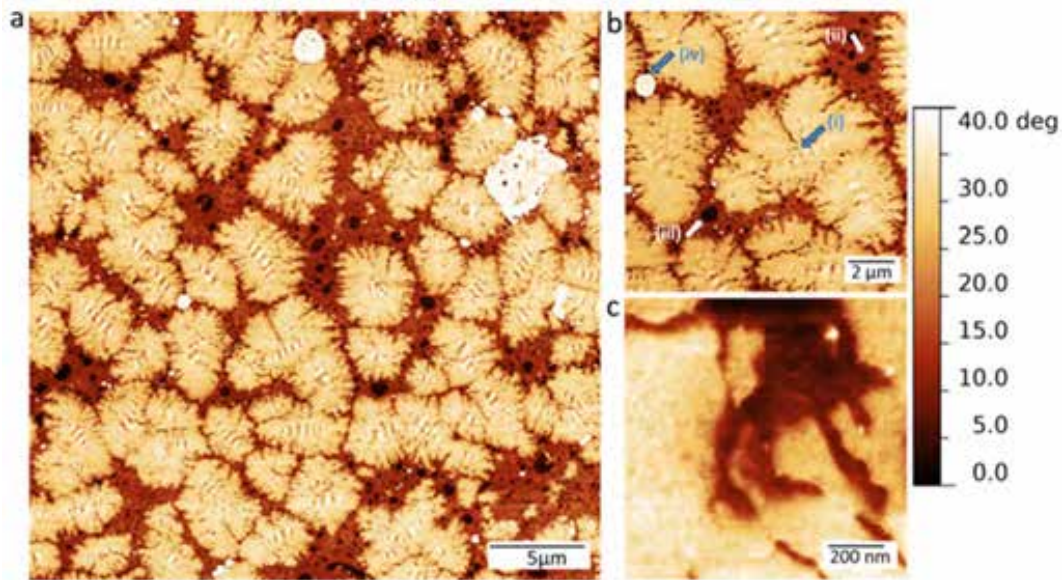
18. att. "Svaiga" bitumena B70/100 struktūra [23]

19. attēlā parādīta novecināta bitumena struktūra, kura ievērojami atšķiras no "svaiga" bitumena struktūras. No AFM attēliem var redzēt trīs atšķirīgas mikrostruktūras fāzes (i, ii un iii) (skat. 19. att.). Fāze (i) sastāv no eliptiskiem domēniem, kuri izkliedēti matricā jeb fāzē (ii) ar zemāku, salīdzinājumā ar (i), fāžu nobīdi. Bez fāzes (i) matricā izkliedēta fāze (iii), kura nebija novērota "svaigā" bitumenā. Tā ir tumšo plankumu veidā ar viszemāko fāžu nobīdi un tā ir mīkstākā fāze. Šī trešā fāze ir bitumena oksidācijas šķidrums produkts, bez fizikālām un ķīmiskām saitēm ar citām fāzēm. Novecinātā bitumena struktūrā, salīdzinājumā ar "svaiga" bitumena struktūru, domēnu un matricas robežvirsmas nav gluda (domēniem rievota virsma). Domēni (fāze (i)) iegremdēti 5-8 nm attiecībā pret nepārtrauktās fāzes (ii) vidējo augstumu, bet fāze (iii) iegremdēta 3-5 nm.



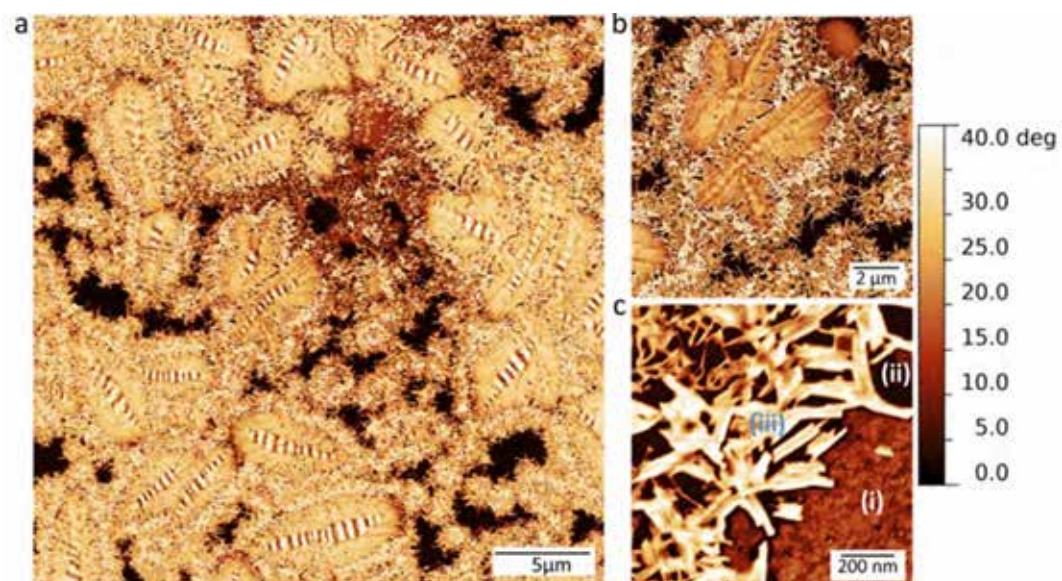
19. att. Novecināta bitumena B70/100 struktūra [23]

20. attēlā parādīta novecinātā bitumena B70/100 atjauninātā ar 20% BM1 emulsijas veida atjaunošanas piedevas struktūra. Struktūra ir līdzīga "svaiga" bitumena struktūrai, tomēr būtiskākā atšķirība ir tāda, ka šai struktūrai var atšķirt četras fāzes (i, ii, iii un iv) (skat. 20. att.). Šai struktūrai dominējošā fāze ir eliptiskie domēni. Oksidētā bitumena fāze (iii) ir eliptiskas formas. Šai struktūrai ir konstatēta ceturtā fāze (iv) ar augstāku fāzes nobīdi jeb lielāku cietību un tai ir gandrīz riņķveida forma. Jaunās fāzes izmērs ir no 15200 nm līdz 4 μm. Domēna garums svārstās no 2.2 līdz 6.7 μm un tiem (līdzīgi, kā "svaigam") raksturīga augstuma svārstības un virsmas grubuļainums (domēna vidū).

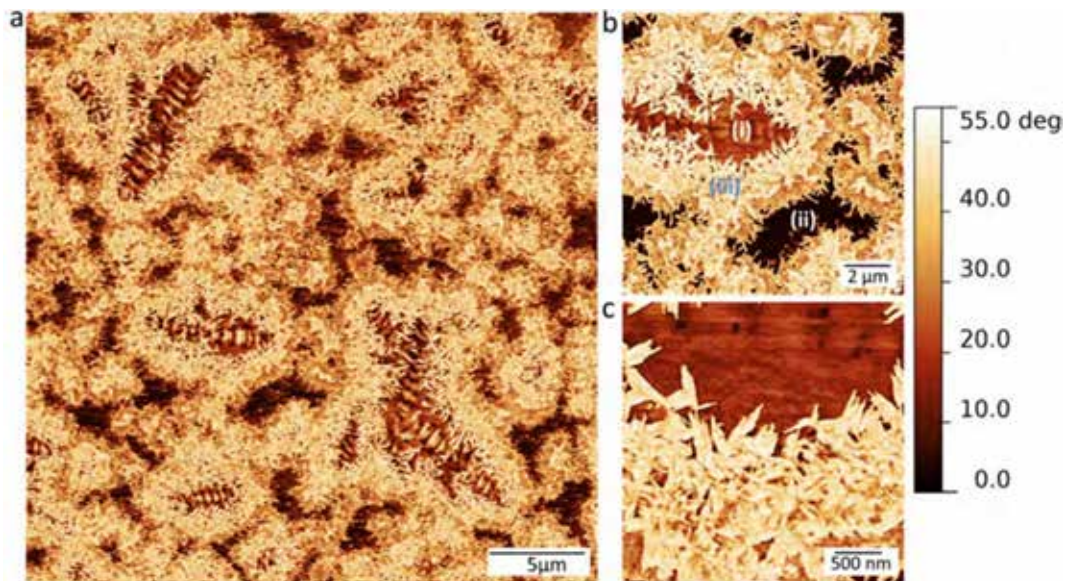


20. att. Novecināta bitumena B70/100 struktūra, kas atjauninātā ar 20% BM1 emulsijas veida atjaunošanas piedevas [23]

21. attēlā parādīta novecināta bitumena B70/100 struktūra, kas atjaunināta ar 10% CM1 eļļu tipa atjaunošanas piedevu. Šai mikrostrukturai ir pilnīgi jauna morfoloģija. Dominējošā domēnu fāze, līdzīgi kā iepriekšējās struktūrās, izkļiedēta nepārtrauktā matricas fāzē, tomēr parādās jauna adatu veida fāze. Adatu platums no 20 līdz 90nm, bet garums 50 līdz 250nm un labi strukturētas. Domēna garums svārstās no 2.2 līdz 8.7 μm. Salīdzinot šo struktūru ar novecināta bitumena struktūru, var secināt, kā šāda tipa atjaunojošā piedeva papildina eliptisko domēnu fāzi un mīkstina novecojušo bitumenu, darbojoties kā lubrikants, starp oriģinālām novecinātā bitumena fāzēm. Šīs piedevas pievienošana padara novecināto bitumenu mīkstāku par "svaigu" bitumenu. Mīkstopšanu var kontrolēt ar pievienotās piedevas daudzumu. Palielinot CM1 eļļu tipa atjaunošanas piedevu līdz 25% par mikrostrukturā dominējošo fāzi kļūst adatu veida fāze (skat. 22. att.).



21. att. Novecināta bitumena B70/100 struktūra, kas atjauninātā ar 10% CM1 eļļu tipa atjaunošanas piedevu [23]



22. att. Novecināta bitumena B70/100 struktūra, kas atjauninātā ar 25% CM1 eļļu tipa atjaunošanas piedevu [23]

4. tabulā dots kvantitatīvs bitumena mikrostruktūru novērtējums

Tabula 4					
Kvalitatīvs mikrostruktūras novērtējums "svaigam", novecinātām un atjauninātiem bitumeniem					
Mikrostruktūras pazīme	Novecināts bitumens	"Svaigs" bitumens	Atjaunināts		
			BM1 20%	CM1 10%	CM1 25%
Fāžu skaits	3	2	4	3	3
Dominējošā fāze	Matrica	Eliptiskie domēni	Eliptiskie domēni	Eliptiskie domēni	Adatu veida tīkla fāze
Domēnu fāzes izskats	Izolēti domēni	Izolēti domēni	Labi disperģēti. Domēnu grupēšana	Domēni ierobežotu ar tīkla fāzi	Domēni ierobežotu ar tīkla fāzi
Domēnu grubiņainums	+	+	+	+	+
Domēnu gruveši (Domain debris)	+	-	+	-	-
Trešā fāze	Riņķveida un loka formas				
ieslēgumi matricā	-	Apaļas formas ieslēgumi matricā. Plaši izkliedētas	Adatu veida tīkls	Adatu veida tīkls	
Ceturrtā fāze	-	-	Cieta, apaļas formas fāze	-	-

Tabula 4

Mikrostruktūras atgūšana pēc atjaunināšanas	-	-	Tuva "svaiga" bitumena struktūrai	Lielāki domēni nekā "svaigam bitumenam" Starpfāžu (starp domēniem un matricu) adatveidīga tīkla fāze, kura pie lielāka atjaunojošās piedevas daudzuma kļūst dominējoša	
---	---	---	-----------------------------------	--	--

1.8.4. KOPSAVILKUMS

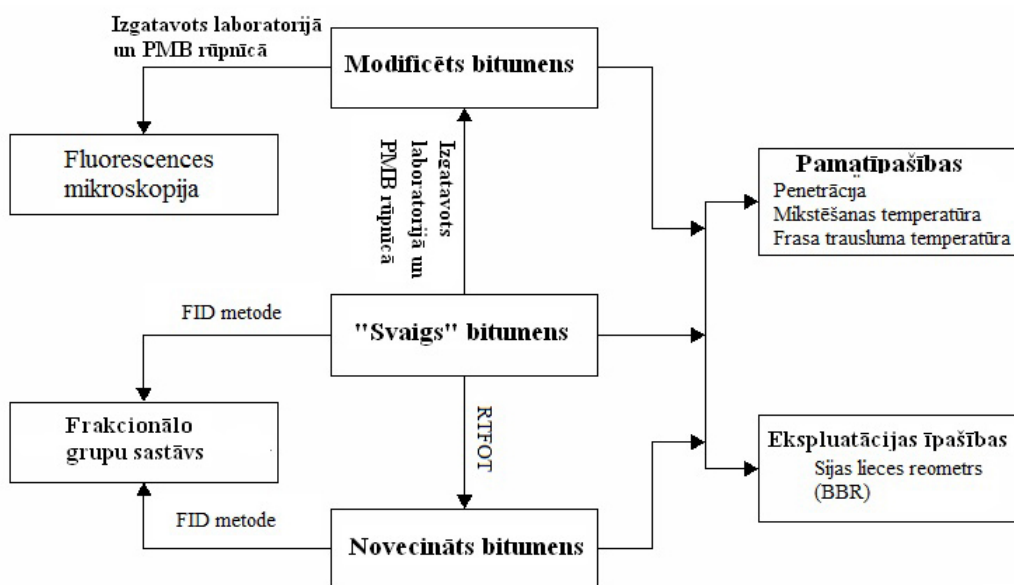
Pētījumi pierāda, ka ar novecojuša bitumena atjaunošanās līdzekļiem var sasniegt vēlamās ekspluatācijas īpašības. Tomēr atjaunojošo vielu darbības mehānismi ir atšķirīgi. ATM rezultāti rāda, ka laboratorijā novecinātu bitumenu atjaunojot ar emulsijas veida atjaunojošu vielu Latexfalt BV BM1 novecinātam bitumenam var iegūt mikrostruktūru un īpašības līdzīgas "svaigam" bitumenam. Savukārt cits atjaunošanas līdzeklis (Latexfalt BV CM1) rāda pavisam jaunu struktūru (morfoloģiju). Abas atjaunojošās vielas atbilstoši veiktajiem pētījumiem [8,9] uzrāda reoloģisko īpašību uzlabojumu – viskozitātes samazināšanu (DSR testa rezultāti līdzīgi "svaigam" bitumenam). Apvienojot reoloģisko īpašību un mikrostruktūras novērtēšanas metodes var ievērojami labāk saprast bitumena atjaunošanas mehānismu un īpašības. Tas var palīdzēt izvēlēties efektīvāku bitumena atjaunošanās vielu un optimizēt to daudzumu.

Veicot novecināta bitumena atjaunošanu asfaltbetona ar RAP ražošanas laikā **jānovērtē atjaunojošās piedevas difūzijas laiks**, kas nepieciešams, lai sasniegtu reciklējāmā bitumena viendabīgu struktūru. Ja reciklējāmā bitumena atjaunināšana (difūzija) nav pabeigta, asfaltbetons ar RAP var uzrādīt priekšlaicīgu rīšu, noguruma un termoplaisu veidošanos [18-20]. Pētījumā [21] secināts, ka **difūzijas ātrumu nosaka atjaunojošās piedevas (maltēnu) viskozitāte nevis reciklējāmā bitumena viskozitāte**. Difūzijas ātrumu var paātrināt palielinot maisīšanas temperatūru vai/un pievienojot vieglo frakciju (maltēnu, eļļu) atšķaldītāju.

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2.1 EKSPERIMENTA PLĀNS

Lai noteiktu bitumena funkcionālo grupu un polimēra ietekmi uz PMB īpašībām, ņemot vērā teorētiskajā daļā analizēto informāciju, tika sastādīts eksperimenta plāns (skat. 23. att.).



23. att. Eksperimenta plāns

Lai pētījuma vajadzībām iegūtu izejas bitumenu un PMB paraugus, eksperimentāla daļa veikta sadarbojoties ar vietējiem uzņēmumiem, kuri nesēn uzsāka PMB ražošanu Latvijā. Izejas bitumenu un PMB paraugu eksperimentālās pārbaudes veiktas Rīgas Tehniskajā universitātē, Viļņas Gedimina tehniskās universitātes Ceļu izpētes institūtā, VAS LVC AKC laboratorijā un Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centrā.

Pētījuma veikšanai tika izvēlēti trīs izejas bitumēni no diviem ražotājiem (B 70/100-1, B 70/100-2, B 100/150-1), SBS polimērs, ka arī PMB piedevas. Tā kā dažu PMB izgatavošanai izmantots viena tipa, bet dažādu piegādes partiju bitumēns, izejas bitumēni šajā pētījumā apzīmēti sekoji - B 70/100-1.1, B 70/100-1.2, B 70/100-1.3, B 70/100-2 un B 100/150-1.

2.2. BITUMENA NOVECOŠANA

Lai simulēt izejas bitumena īslaicīgu novecošanos un novērtētu funkcionālo grupu sastāva izmaiņas, bitumiem B 70/100-2 un B 100/150-1 atbilstoši LVS EN 12607-1:2015 (Bitumens un bitumena saistvielas. Cietējumpretestības noteikšana karstuma un gaisa ietekmē. 1.daļa: RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) metode) veikts tests.

2.2.1 METODIKA

Izejas bitumena paraugi ņemti atbilstoši LVS EN 58:2013 L (Bitumens un bitumena saistvielas - Bitumena saistvielu paraugu ņemšana) un sagatavoti atbilstoši LVS EN 12594:2015 (Bitumens un bitumena saistvielas. Testēšanas paraugu sagatavošana). Pirms novecināšanas testa 35 gramu bitumena ielieti speciālā stikla konteinerā, kuru novieto krāsnī ar rotējošiem plauktiem. Šie apstākļi ļauj bitumenam vienmērīgi novecoties 163 °C temperatūrā. Testēšanas laikā krāsnī tiek nodrošināta gaisa cirkulācija, radot apstākļus pietuvinātus bitumena novecošanai asfaltbetona ražošanas laikā. Bitumena vecināšana ilga 85 minūtes. Pēc tam bitumens tika izņemts no krāsns, atdzesēts un nosvērts (nosaka masas zudumu).

2.3. BITUMENA FRAKCIONĀLO GRUPU SASTĀVS

Pamatā bitumens var tikt iedalīts divās lielās ķīmiskajās grupās – asfaltēnos un maltēnos. Maltēnus tālāk var iedalīt sveķos, aromātiskajos un piesātinātajos ogļūdeņražos.

Ir izstrādāti vairāki paņēmieni, ar kuru palīdzību bitumenu sastāvdaļas var sadalīt SARA (Saturate, Aromatic, Resin and Asphaltene) grupās – piesātinātās un aromātiskās eļļas, sveķi, asfaltēni, kā arī asfaltogēnās skābes. Visbiežāk tiek pielietota hromatogrāfija, kas balstīta uz vielu atšķirībām ķīmiskajā reaģētspējā un polaritātē.

Asfaltēni ir sarežģīti ogļūdeņraži ar augstu polaritāti un tendenci savstarpēji iedarboties un veidot saites. Tiem ir diezgan liela molekulārā masa un to daudzumam ir liela ietekme uz bitumena reoloģiskajām īpašībām. Palielinot asfaltēna saturu, var iegūt cietāku bitumenu ar mazāku penetrāciju, augstāku mīkstapšanas temperatūru un līdz ar to lielāku viskozitāti.

Sveķiem ir augsta polaritāte, tāpēc tie ir ļoti adhezīvi. Sveķi bitumenā pilda dispersanta funkciju un nodrošina tā elastību, plastiskumu, stiepjamību un cementējošās īpašības.

Eļļām piemīt maza polaritāte. Tās nodrošina bitumena sala izturību un šķīdri ķermeņa īpašības.

Asfaltogēnās skābes ir virsmas aktīvā viela, kas veicina bitumena saiti ar akmens un citiem materiāliem [13].

Šajā pētījumā liesmas jonizācijas detektors (Flame Ionization Detector (FID)), „Iatroscan MK-6s” izmantots SARA (Saturate, Aromatic, Resin and Asphaltene) testam - funkcionālo grupu satura noteikšanai gan “svaigam”, gan novecinātam bitumenam. PMB bitumiem SARA tests netika veikts, jo polimēra klātbūtne var radīt būtisku kļūdu testēšanas rezultātos. SARA testēšana veikta Viļņas Gedimīna tehniskās universitātēs Ceļu izpētes institūtā.

2.3.1 METODIKA

2.3.1.1 PARAUGA SAGATAVOŠANA

Bitumena paraugi ņemti saskaņā ar LVS EN 58 un sagatavoti atbilstoši LVS EN 12594 standartam. Mazs daudzums karsta bitumena (aptuveni $0,05 \pm 0,001$ g) tiek ievietots mēģenē un nosvērts. Paraugam ar pipetes palīdzību kolbā tiek pievienots šķīdinātājs 100 % toluēns, kura daudzums tiek noteikts atkarībā no bitumena masas – 1 % no bitumena masas (piemēram, ja bitumena masa ir 0,05 g, jāpievieno 5 ml 100 % toluēna). Kratot vai maisot kolbu, bitumenu izšķīdina 100 % toluēnā (skat. 24. att.).



24. att. Izšķīdināts bitumena paraugs

Izmantojot adatu, paraugs jāuzklāj uz hromatogrāfa stieņiem, kā tas parādīts 25. attēlā. Pirms parauga uzklāšanas uz hromatogrāfa stieņiem tas 2 līdz 3 stundas jāuzglabā tumšā vietā.



25. att. Parauga uzklāšana uz hromatogrāfa stieņiem

Kad bitumens ir uzklāts uz hromatogrāfa stieņiem, tos ievieto tvertnē, kurā atrodas šķīdinātājs 100% n-heptāns (skat. 26. att.). Kad hromatogrāfa stieņi absorbē 90 līdz 95 % šķīdinātāja, tos izņem no tvertnes un uz 2 līdz 3 minūtēm ievieto krāsnī, kuras temperatūra ir 110 °C (skat. 27. att.), vai 5 līdz 8 minūtes atstāj istabas temperatūrā, lai nodrošinātu to, ka šķīdinātājs ir pilnībā iztvaikojis. Pēc hromatogrāfa stieņu izņemšanas no krāsns tiem jāļauj atdzist aptuveni 5 minūtes.



26. att. Hromatogrāfa stieņi 100 % n-heptānā



27. att. Hromatogrāfa stieņu ievietošana krāsnī

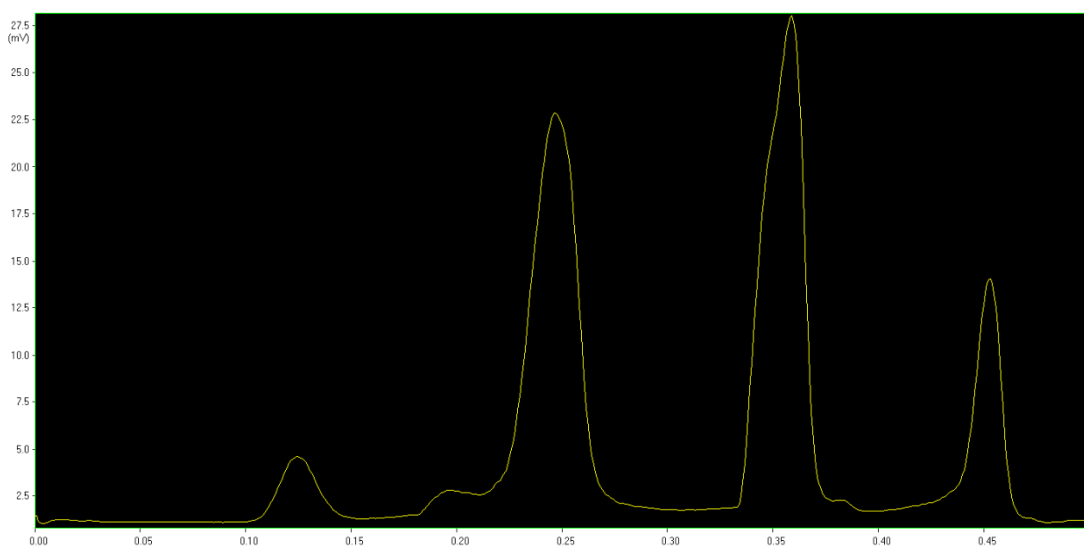
Pēc tam procedūra jāatkārto, hromatogrāfa stieņus ievieojot tvertnē ar 100% toluēnu, līdz tie absorbē 50 līdz 55 % šķīdinātāja, un tvertnē ar 95 % dihlormetāna un 5 % metanola šķīdumu, līdz tie absorbē 20 līdz 25 % šķīduma. Kad hromatogrāfijas stieņi ir absorbējuši visus trīs šķīdinātājus, tos ievieto hromatogrāfā (skat. 28. att.) un veic bitumena frakciju noteikšanu.



28. att. Paraugs sagatavots hromatogrāfijai

2.3.1.2 REZULTĀTU NOLASĪŠANA

Rezultātu nolasišanu veic datorprogramma, kas uzrāda tādus grafikus, kā parādīts 29. attēlā. Nolasot laukumus no šiem grafikiem ir iespējams noteikt asfaltēnu, sveķu, eļļu un asfaltogēno skābju procentuālo sastāvu bitumenā.



29. att. Hromatogrāfijas rezultāti – bitumens sadalīts funkcionālās grupās

2.4. REZULTĀTI

2.4.1 SARA TESTS

Bitumenu B 70/100-1.1, B 70/100-2, B 70/100-2 novecināts, B 100/150-1 un B 100/150-1 novecināts SARA testu rezultāti doti 5. – 9. tabulās. Katrs bitumens tika testēts uz 9 līdz 10 hromatogrāfijas stieņiem, lai iegūtu precīzākus rezultātus.

Tabula 5

B 70/100-1.1 SARA testa rezultāti											
	Mērījums										Vidēji
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Asfaltogēnās skābes, %	5.02	5.12	5.06	4.60	4.98	4.87	4.89	4.80	4.59	4.66	4.86
Eļļas, %	41.80	45.86	41.45	44.14	41.37	40.13	35.02	44.40	48.03	42.04	42.42
Sveķi, %	35.89	33.67	37.40	36.60	38.45	39.99	44.87	38.89	34.29	33.02	37.31
Asfaltēni, %	17.28	15.36	16.10	14.65	15.20	15.01	15.22	11.91	13.09	20.28	15.41

Tabula 6

B 70/100-2 SARA testa rezultāti											
	Mērījums										Vidēji
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Asfaltogēnās skābes, %	5.27	5.28	5.48	5.35	5.92	5.17	5.10	5.06	5.36	5.86	5.38
Eļļas, %	36.96	33.72	32.41	31.97	31.12	33.16	32.69	35.44	31.01	37.89	33.64
Sveķi, %	37.98	40.43	42.45	43.68	45.42	42.98	43.09	45.44	47.03	36.15	42.46
Asfaltēni, %	19.79	20.57	19.66	19.02	17.56	18.69	19.12	14.06	16.61	20.09	18.52

Tabula 7

B70/100-2 novecināts SARA testa rezultāti										
	Mērījums									Vidēji
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Asfaltogēnās skābes, %	6.18	6.19	6.05	6.64	6.08	5.38	5.17	5.39	5.68	5.86
Eļļas, %	27.98	25.47	20.65	18.50	20.38	21.22	26.87	27.52	30.20	24.31
Sveķi, %	45.58	49.14	53.04	55.01	55.61	53.68	54.06	49.97	41.01	50.79
Asfaltēni, %	20.27	19.21	20.27	19.85	17.93	19.72	13.90	17.12	23.11	19.04

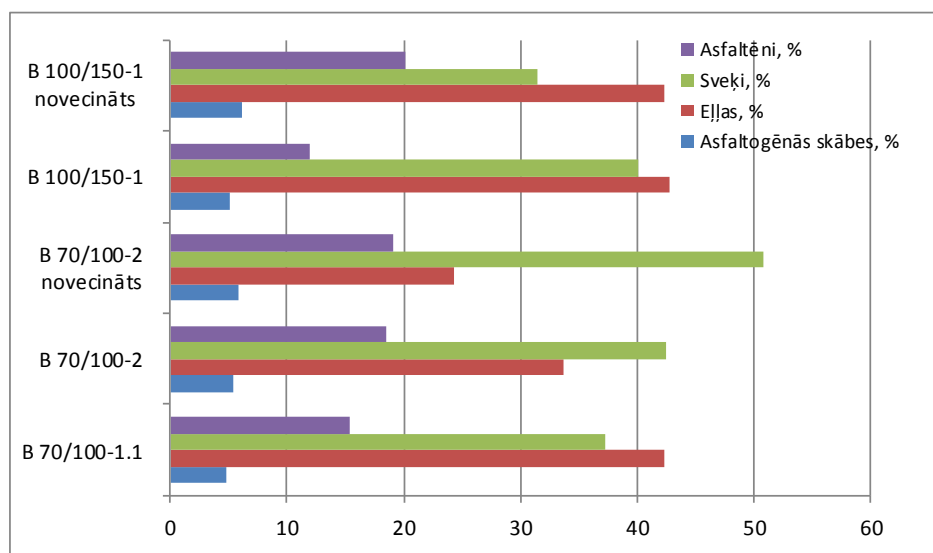
Tabula 8

B100/150-1 SARA testa rezultāti											
	Mērījums										Vidēji
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Asfaltogēnās skābes, %	5.23	4.98	5.20	4.97	4.75	4.97	4.59	4.54	5.34	5.99	5.06
Eļļas, %	47.87	45.28	41.89	41.52	40.56	41.93	40.32	44.02	40.19	44.19	42.78
Sveķi, %	34.42	37.00	40.08	40.83	42.09	41.878	43.53	42.99	43.81	35.14	40.18
Asfaltēni, %	12.47	12.73	12.83	12.69	12.61	11.22	11.56	8.44	10.66	14.69	11.99

Tabula 9

B100/150-1 novecināts SARA testa rezultāti											
	Mērījums									Vidēji	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Asfaltogēnās skābes, %	5.69	5.91	6.25	6.18	6.53	6.45	6.09	5.92	6.04	6.12	
Eļļas, %	47.04	47.75	44.25	43.81	45.78	41.12	38.03	43.88	29.52	42.35	
Sveķi, %	27.21	26.29	29.88	31.94	29.69	32.74	34.04	30.62	40.50	31.43	
Asfaltēni, %	20.05	20.05	19.63	18.07	17.99	19.69	21.85	19.59	23.94	20.10	

SARA testa rezultātu kopsavilkums dots 30. attēlā.



30. att. Bitumenu frakcionālais sastāvs

2.4.2 GASTEĻA INDEKSS

Gasteļa indekss (*Gaestel index*) I_c parāda bitumena koloidālās sistēmas stabilitāti. Bitumena koloidālās sistēmas klasifikācija pēc Gasteļa indeksa un iegūtie rezultāti ir doti 10. tabulā.

Tabula 10

Bitumena stabilitāte			
Bitumens	I_c		
	Stabila sistēma	Ciets bitumens	Mīksts bitumens
	0,22 – 0,5	> 0,5	< 0,22
B 70/100-1.1	0,25	-	-
B 70/100-2	0,31	-	-
B 70/100-2 novecināts	0,33	-	-
B 100/150-1	-	-	0,21
B 100/150-1 novecināts	0,36	-	-

2.4.3 REZULTĀTU ANALĪZE

SARA testa rezultāti rāda, ka testētie bitumēni uzrāda atšķirīgus funkcionālo grupu sastāvus, kuri ir atkarīgi no bitumēna klases, bitumēna piegādes partijas, ražotāja un no tā, vai bitumens ir bijis novecināts.

Zemākas penetrācijas klases jeb cietākos bitumēnos ir vairāk asfaltēnu nekā mīkstos bitumēnos. Šo faktoru jāņem vērā izvēloties izejas bitumēnu modifikācijai (skat. 1. nodaļa). Pētījumā izmantotajos izejas bitumēnos ir pietiekoši vieglo frakciju, lai veiktu modifikāciju ar SBS polimēru.

Bitumens B100/150-1 pēc novecināšanas ievērojami zaudēja sveķus un tajā ievērojami palielinājās asfaltēnu daudzums. Savukārt bitumēnam B 70/100-2 konstatēts zemāks eļļu saturs, kurš novecināšanas rezultātā ievērojami samazinājās.

Visi bitumēni, izņemot B 100/150-1 bitumēnu, atbilst stabilai sistēmai saskaņā ar Gasteļa indeksu. B 100/150-1 bitumēnam novecināšanas rezultātā ievērojami mainījās Gasteļa indekss un sistēma nostabilizējās, bet B 70/100-2 bitumēna Gasteļa indekss novecināšanas rezultātā mainījās minimāli.

2.5. BITUMĒNA MODIFIKĀCIJA

Bitumēna modifikācija veikta PMB ražotnē un laboratorijā ar mērķi no dažādiem izejmateriāliem (mainot izejas bitumēnu un SBS piedevu) iegūt 6 vienas PMB klases bitumēnus. PMB izgatavošana laboratorijā veikta izmantojot Silverstone L5T mikseri. Papildus 2 PMB maisījumi tika izgatavoti rūpnīcā, lai salīdzinātu un pārbaudītu laboratorijā un rūpnīcā izgatavotu PMB kvalitāti. Modifikācija veikta izmantojot divu ražotāju SBS polimērus (SBS-1 un SBS-2) un piedevas – sveķus (R) un divus plastifikatorus (P-1 un P-2). Izgatavoto PMB maisījumu receptes dotas 11. tabulā.

Tabula 11

PMB sastāvi
B 70/100-1.1 + 2.5% SBS-1
B 70/100-2 + 2.5% SBS-1
B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1
B 100/150-1 + 4.0% SBS-2
B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1
B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (PMB rūpnīca)
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 (PMB rūpnīca)

2.5.1 METODIKA

Modificētā bitumena mērķa klase ir PMB 45/80-65. Modifikācijas process laboratorijas apstākļos un rūpnīcā ir sekojošs:

1) Modifikācija laboratorijā

Bitumenu uzsilda līdz 185°C un maisīšanas laikā pievieno SBS polimēru kā parādīts 31. attēlā. Bitumenu ar SBS maisa 3 stundas ar maisīšanas ātrumu 6500RPM. Nopolimēra piedevas pievieno 10 minūtes pirms maisīšanas beigām. Pēdējiem diviem bitumeniem (B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 un B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1) izvēlēta zemāka maisīšanas temperatūra -175°C un ātrums 6100RPM, jo iepriekš izvēlētājā maisīšanas režīmā veidojās daudz gaisa burbuļu, kas var ietekmēt PMB īpašības.



31. att. PMB bitumena izgatavošana laboratorijā

2) Modifikācija rūpnīcā

Bitumenu uzsilda līdz 185°C iesūknē svēršanas rezervuārā, un pievieno SBS polimēru. Lai iegūtu viendabīgu maisījumu, bitumens un SBS polimērs tiek samaisīts. Šis process ilgst līdz 30 min. Pēc tam šo maisījumu disperģē - sūknē caur 160kW augstas bīdes dzirnavām uz otru rezervuāru. Malšanas process, pēc kura bitumenu iesūknē uzglabāšanas rezervuārā, ilgst 3 stundas. Nopolimēra piedevas pievieno kopā ar SBS polimēru.

2.5.2 REZULTĀTI

Lai salīdzinātu PMB sastāvu viendabīgumu, paraugam B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1, kurš bija izgatavots gan laboratorijā, gan rūpnīcā, izmantojot fluorescētās mikroskopijas metodi, veikta struktūras novērtēšana. Testēšana veikta Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centrā. Fluorescētās mikroskopijas metodes pamatā ir fluorescento objektu noteikšana ar gaismas optisko mikroskopu. Bitumenam nepiemīt fluorescējošās īpašības, bet polimērām, kurš modifikācijas rezultātā piesātinās ar vieglajām frakcijām, šī īpašības piemīt, kas padara šo metodi piemērotu PMB viendabīguma novērtēšanai.

1) Paraugu sagatavošana

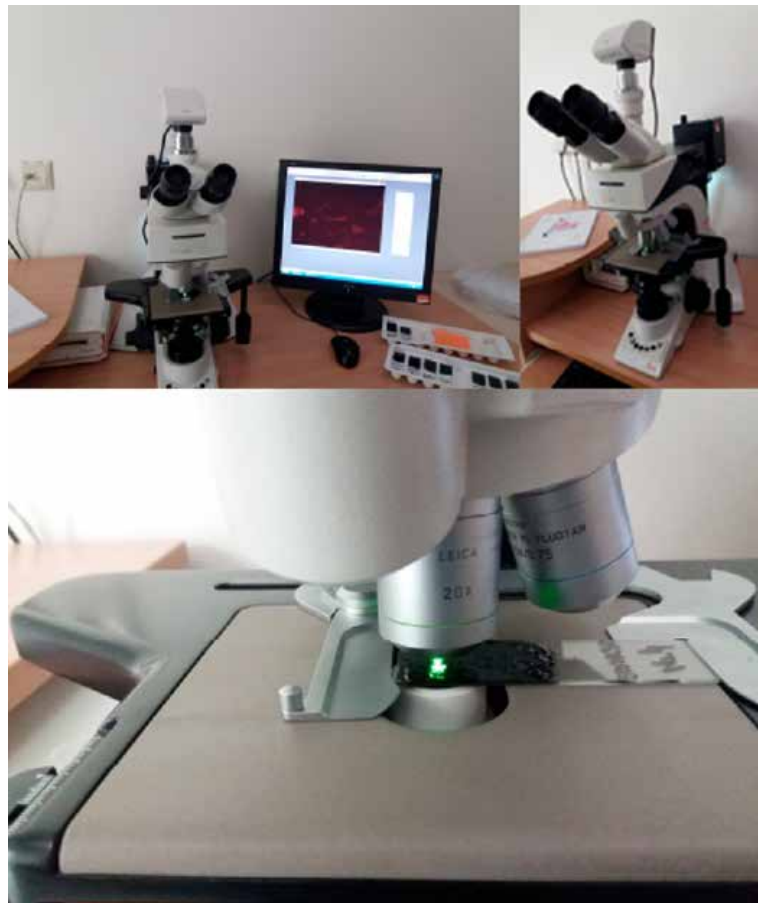
Uz mikroskopa priekšmetstikliņa 1mm plānā slānī tika uzklāts PMB bitumena paraugs (skat. 32. att.)



32. att. Bitumena paraugi Fluorescences mikroskopijas testiem

2) Paraugu testēšana

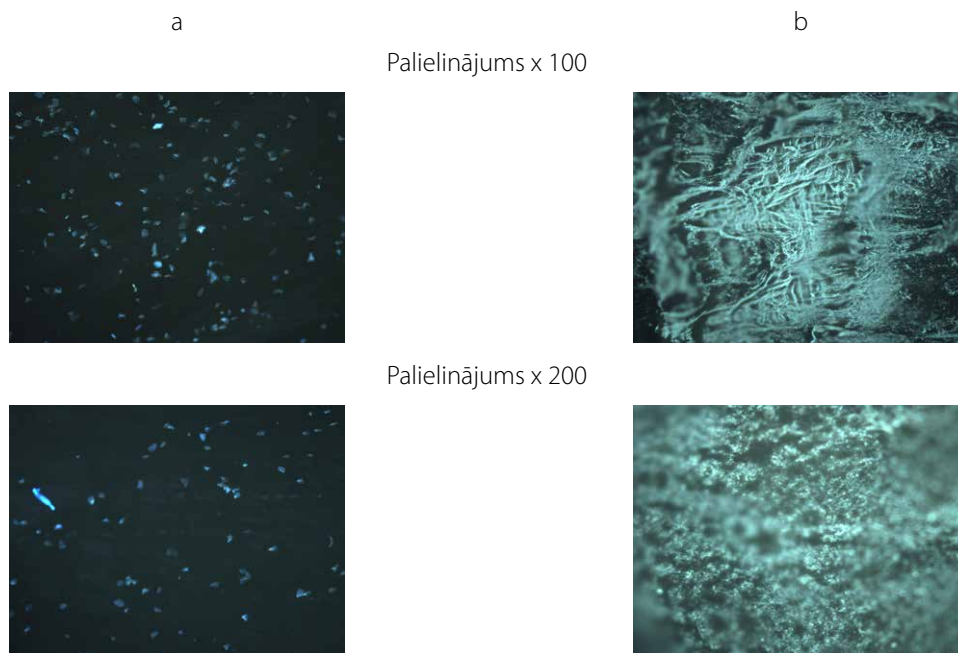
Paraugu testēšana veikta ar fluorescences mikroskopu Leica (viļņu garums 390–459 palielinājums x100 līdz x400). Testa laikā mainīts mikroskopa palielinājums un datorizēti uzņemti attēli (skat. 33. att.).



33 att. Fluorescences mikroskopijas bitumena struktūras izpētei

3) Rezultāti

Rezultāti apkopoti 34. - 36.. attēlos, kuros redzama krāsā struktūras atšķirība starp PMB paraugu B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 izgatavotu laboratorijā un rūpnīcā. Laboratorijas maisītājs ar propellera un spārnu tipa uzgaļiem nesasmalcina SBS daļiņas, bet izkļiede tās izejas bitumenā. Šai struktūrai raksturīga bitumena nepārtraukta fāze ar neizšķīdušām SBS daļiņām (skat. 34. a) att.). Savukārt jaudīgs rūpnīcas maisītājs un dispergators sasmalcina un efektīvi homogenizē SBS daļiņas PMB maisījumā. Šai struktūrai, neskatoties uz zemu SBS saturu - 2,5 % - raksturīga SBS polimēra nepārtraukta fāze (skat. 34. b) att.). Šai struktūrai iegūta savienojama sistēma, kurai vajadzētu uzrādīt ievērojami labākas ekspluatācijas īpašības.

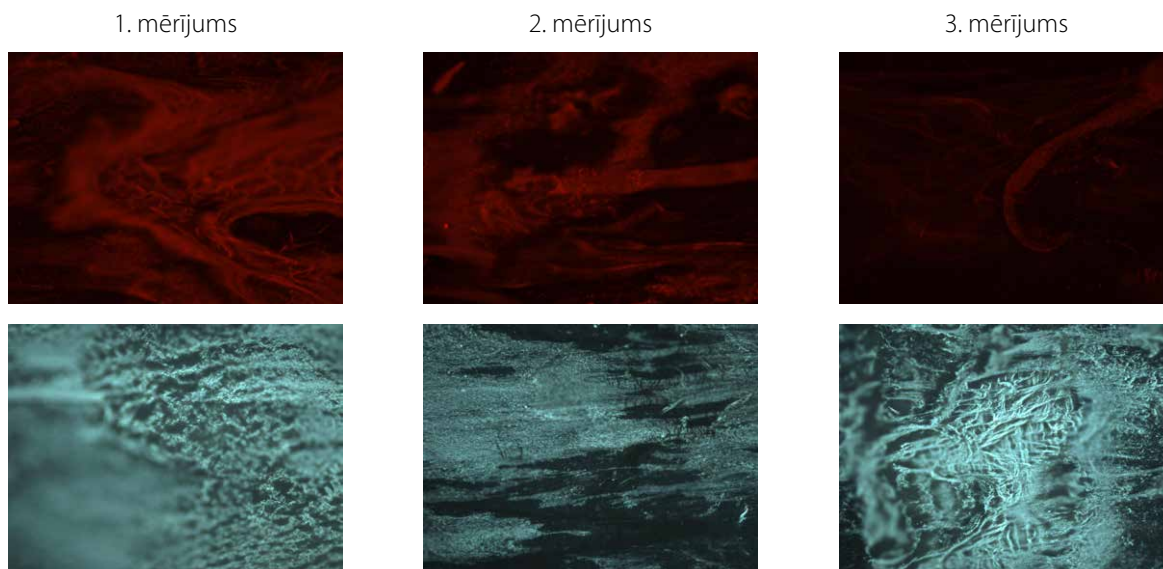


34. att. Rezultāti B70/100 + 2,5%SBS (R30)
a) PMB izgatavots laboratorijā; b) PMB izgatavots rūpnīcā

35. un 36. attēls uzņemts dažādās vietās uz mikroskopa priekšmetstikliņa. Rezultāti liecina, ka SBS nav vienmērīgi izkliedēts visā paraugā gan maisot laboratorijā, gan rūpnīcā.



35. att. Bitumena B70/100 + 2,5%SBS (R30) izgatavota laboratorijā fluorescences mikroskopijas mērījumi ar palielinājumu x 100.



36. att. Bitumena B70/100 + 2,5%SBS (R30) izgatavota rūpnīcā fluorescences mikroskopijas mērijumi ar dažādiem filtriem un palielinājumu x 100.

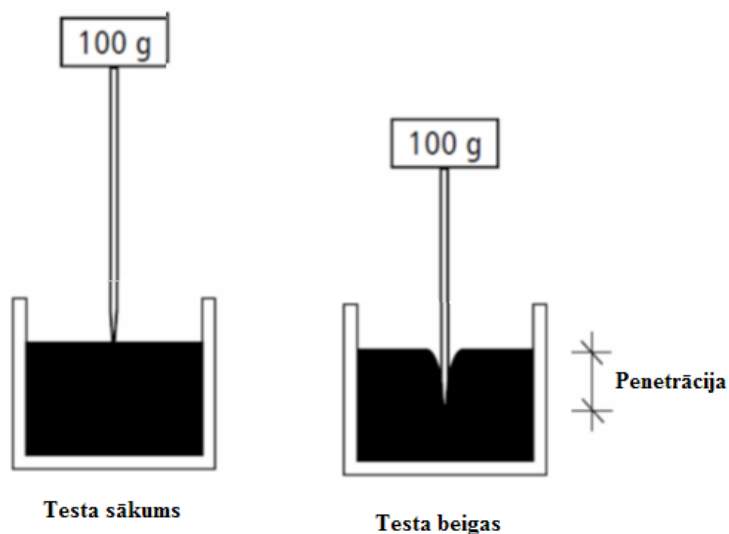
2.6 BITUMENU PAMATĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA

Pamatīpašības visiem izejas un PMB bitumeniem noteiktas PMB ražotāja, kā arī VAS LVC AKC laboratorijā. Testētas pamatīpašības iekļauj adatas penetrāciju 25°C, mīkstēšanas temperatūru un Frasa trausluma temperatūru.

2.6.1 METODIKA

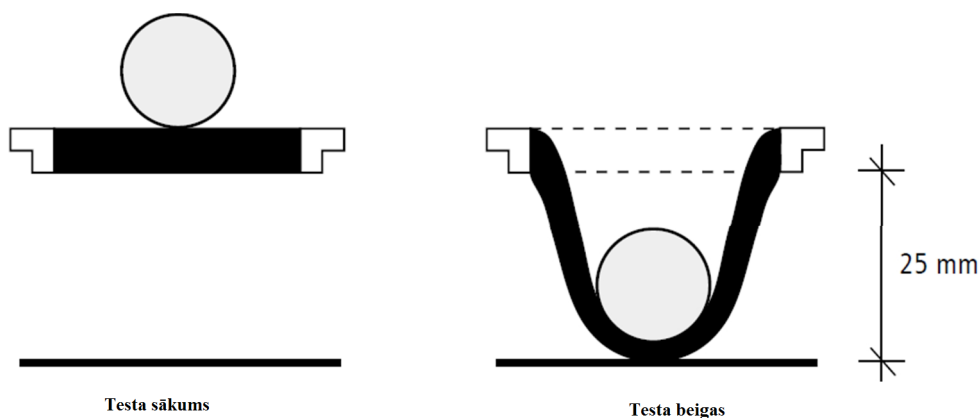
Bitumena paraugi ņemti saskaņā ar LVS EN 58 (Bitumens un bitumena saistvielas - Bitumena saistvielu paraugu ņemšana) un sagatavoti atbilstoši LVS EN 12594 (Bitumens un bitumena saistvielas. Testēšanas paraugu sagatavošana) standartam.

Penetrācijas tests 25°C temperatūrā veikts atbilstoši LVS EN 1426:2015 (Bitumens un bitumena saistvielas. Adatas penetrācijas noteikšana). Šis tests netiešā veidā nosaka bitumena viskozitāti, 25°C temperatūrā 5 sekundes paraugā iegremdējot ar 100g noslogotu standarta adatu. Testēšanas princips dots 37. attēlā [15].



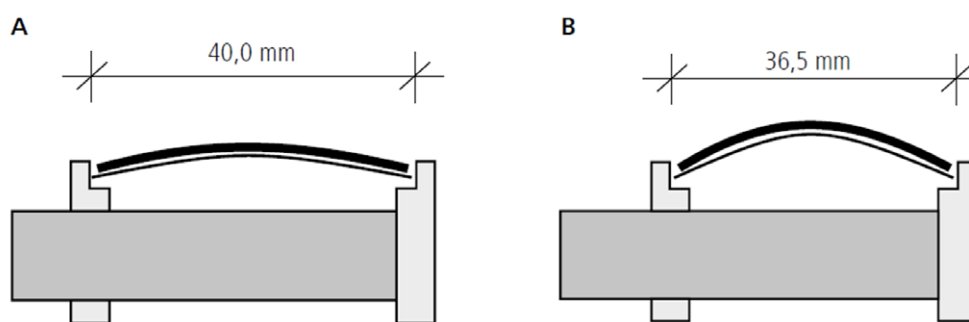
37. att. Adats penetrācijas testa princips [15]

Bitumena mīkstināšanas temperatūra noteikta ar "Lode un Gredzens" metodi atbilstoši LVS EN 1427 (Bitumens un bitumena saistvielas. Mīkstināšanas temperatūras noteikšana. Gredzena un lodes metode). Mīkstināšanas temperatūra raksturo bitumena īpašības augstās ekspluatācijas temperatūrās un norāda viskoelastības augšējo robežu [15]. Metodes pamatā ir bitumena ievietošana metāla gredzenos un sildīšana ūdenī vai glicerīnā. Slodzes radišanai virs bitumena paraugiem speciālos statīvos novietotas metāla lodes. Mīkstināšanas temperatūru $^{\circ}\text{C}$ nosaka, kā vidējo temperatūru starp diviem mērījumiem brīdī, kad cauri bitumena paraugam izspiedušās lodes vertikāli pārvietojušās par $25 \pm 0,4\text{mm}$. Testēšanas princips parādīts 38. attēlā.



38. att. Lode un Gredzena testa metodes princips [15]

Bitumena trausluma temperatūra noteikta ar Frasa metodi atbilstoši LVS EN 12593:2015 standartam (Bitumens un bitumena saistvielas. Frasa trausluma temperatūras noteikšana). Bitumena paraugu uzklāj 0.5 mm plāna slānī uz tērauda plāksnes un pakļauj mehāniskai liekšanai. Temperatūru apkārt paraugam samazina ar konstantu ātrumu 1°C minūtē. Rezultātu izsaka kā temperatūru $^{\circ}\text{C}$ brīdī, kad uz parauga izveidojas pirmā plaisa. Testēšanas princips parādīts 39. attēlā.



39. att. Frasa trausluma testa princips.

A) Plātne ar bitumenu pirms liekšanas; B) Plātne ar bitumenu pēc liekšanas [15]

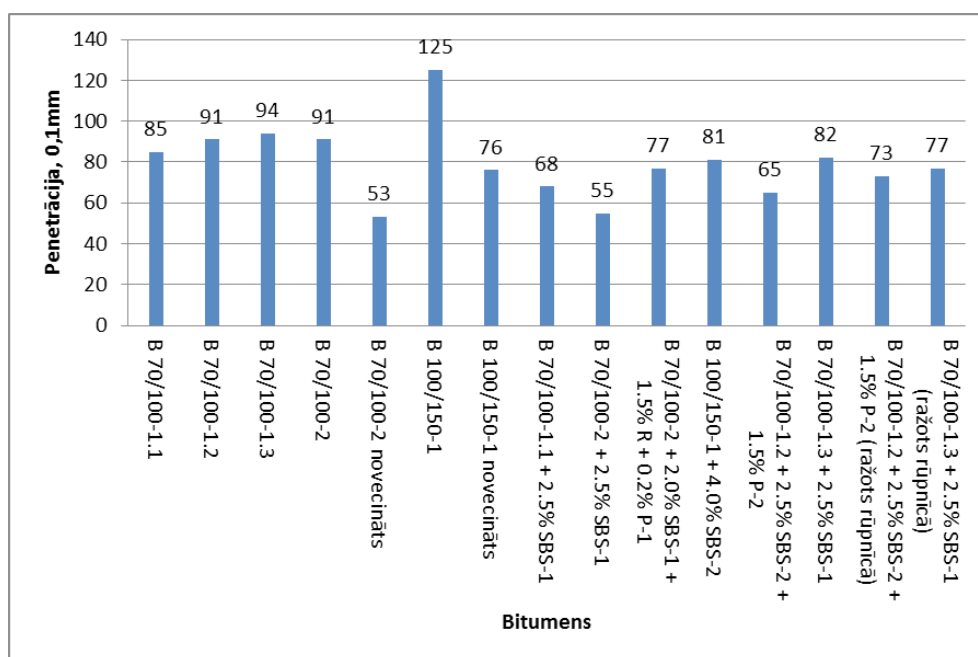
2.6.2 REZULTĀTI

Bitumena pamatīpašību rezultāti apkopoti 12. tabulā

Tabula 12			
Bitumena pamatīpašības			
Bitumens	Penetrācija 25°C, 0,1mm	Mikstēšanas temperatūra, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C
B 70/100-1.1	85	45,2	-12
B 70/100-1.2	91	46,8	-
B 70/100-1.3	94	46,1	-
B 70/100-2	91	44,8	-18
B 70/100-2 novēcināts	53	49,8	-
B 100/150-1	125	41,8	-21
B 100/150-1 novēcināts	76	47,0	-
Bitumens	Penetrācija 25°C, 0,1mm	Mikstēšanas temperatūra, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C
B 70/100-1.1 + 2.5% SBS-1	68	51,8	-11
B 70/100-2 + 2.5% SBS-1	55	59,4	-12
B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1	77	61,3	-15
B 100/150-1 + 4.0% SBS-2	81	58,9	-
B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2	65	58	-
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1	82	52,9	-
B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (ražots rūpnīcā)	73	55,1	-
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 (ražots rūpnīcā)	77	50,7	-

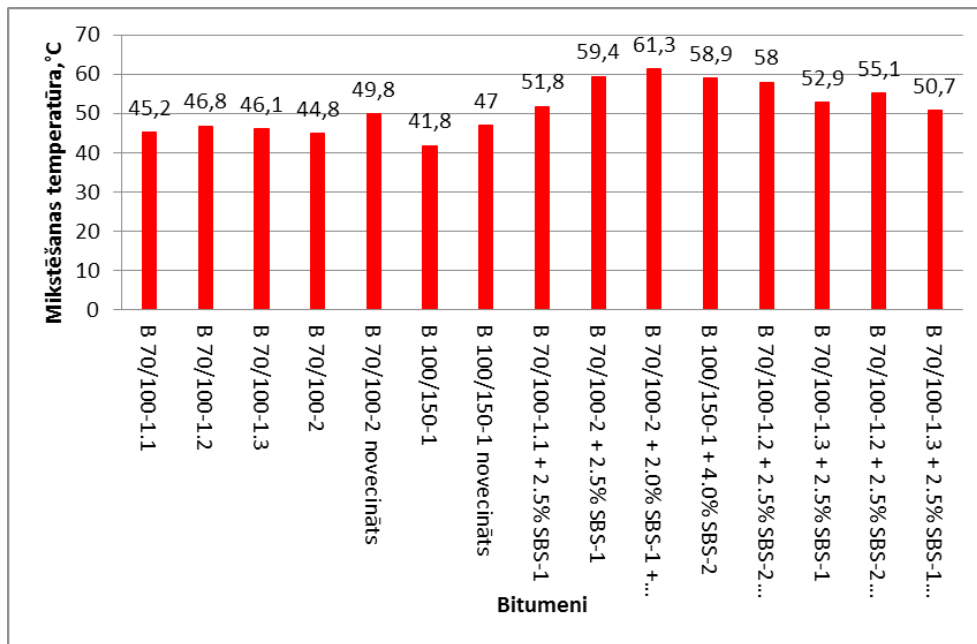
2.6.3 REZULTĀTU ANALĪZE

PMB bitumenu īpašības tieši atkarīgas no izejas bitumena īpašībām. Visi PMB bitumeni, izņemot B 100/150-1 + 4.0% SBS-2 un B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1, kuri nedaudz pārsniedz augšējo robežu 80x0,1mm, pēc penetrācijas rādītāja atbilst mērķa klasei PMB 45/80-65 (skat. 40. att.). Bitumena B 70/100-2 uzrādītā paliekošā penetrācija pēc RTFOT novecošanas ir 58% no sākotnējās vērtības, bet B 100/150-1 61%, kas nozīmē, ka abi izejas bitumeni uzrāda līdzīgas īslaicīgas novecošanas īpašības.



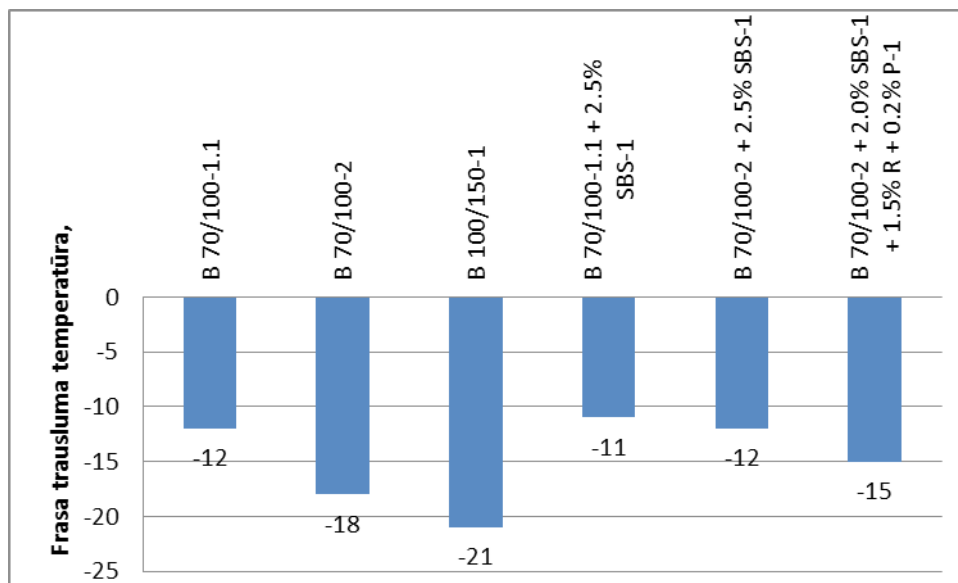
40. att. Izejas bitumenu un PMB penetrācija 25°C temperatūrā.

Visi PMB bitumeni uzrāda augstāku mīkstēšanas temperatūru salīdzinājumā ar izejas bitumeniem, tomēr pēc mīkstēšanas rādītāja PMB bitumeni neatbilst mērķa klasei PMB 45/80-65 (skat. 41. att.). Bitumeni B 70/100-2 + 2.5% SBS-1, B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1, B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 un B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (ražots rūpnīcā) atbilst PMB 45/80-55 klasei.



41. att. Izejas bitumenu un PMB mikstēšanas temperatūra

Analizējot Frasa trausluma temperatūras rezultātus, konstatēts, ka tikai B 70/100-2, B 100/150-1 un B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1 atbilst "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām - $\leq -15^{\circ}\text{C}$ (skat. 42.att.). Šajā pētījumā izejas un PMB bitumenu noteiktas arī ekspluatācijas īpašību klases atbilstoši PG (*Performance Grade*) klasifikācijai.



42. att. Izejas bitumenu un PMB Frasa trausluma temperatūra

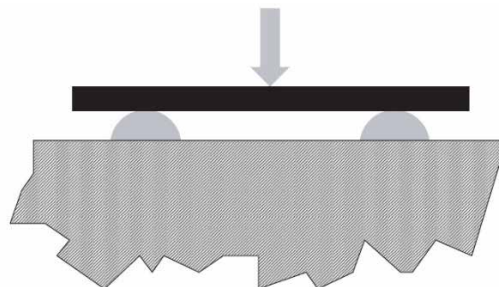
2.7 BITUMENU REOLOGISKO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA AR BBR METODI

BBR (*Bending Beam Rheometer*) tests veikts visiem bitumeniem, izņemot 70/100-1.2 un B 70/100-1.3, atbilstoši LVS EN 14771:2012 (Bitumens un bitumena saistvielas. Lieces šļūdes cietības noteikšana ar sijas lieces reometru (BBR)) standartam. Testēšana veikta Viļņas Gedimina tehniskajā universitātē Ceļu izpētes institūtā, izmantojot sijas lieces reometru „COESFELD Materialtest” ar dzesēšanas kameru „Huber Ministat 240-NR”.

2.7.1 BBR METODIKA

BBR (*Bending Beam Rheometer*) jeb sijas lieces reometrs tiek lietots, lai noteiktu bitumena sijas viduspunkta izlieci, trīs punktu liecē. Bitumena sijas viduspunktam noteiktu laiku tiek pielikta nemainīga slodze un noteikta izliece kā laika funkcija. Lai kontrolētu testēšanas temperatūru, tiek izmantota zemas temperatūras šķidrums vannas. Parauga stingums (maks. 300MPa) noteiktos sloģošanos laikos tiek aprēķināts pēc lieces spriegumiem un deformācijas. Analizējot BBR testa laikā iegūtos datus, tiek iegūts vēl viens lielums – m-vērtība – stinguma samazināšanās ātrums (min. 0.3). [11 -12]

BBR testa mērķis ir noteikt vai bitumens zemā temperatūrā nekļūst pārāk stings un trausls. Testu parasti veic sekojošās temperatūrās: -36, -30, -24, -18, -12, -6 un 0 °C. Klasificējot bitumenu, testu veic par 10 °C augstākā temperatūrā nekā zemākā klasifikācijas temperatūra. Piemēram, PG 64-22 bitumenam BBR tests tiktu veikts -12 °C. Maksimālais BBR testā pieļaujamais stingums ir 300 MPa 60 sekundēs un minimālā m-vērtība ir 0,3 tādā pašā sloģošana laikā. 43. attēlā parādīta BBR testa skice. [8]



43. att. BBR testa skice [11]

Paraugi jāņem saskaņā ar LVS EN 58 un jāgatavo saskaņā ar LVS EN 12594. Paraugi tiek sagatavoti speciālās veidnēs ar iekšējiem izmēriem $6,4 \pm 0,1$ mm x $12,7 \pm 0,1$ mm x 127 ± 5 mm. Veidņu iekšpuse tiek pārklāta ar līdzekli, kas neļauj bitumenam pielipt pie veidnes (skat. 44. att.).



44. att. Veidnes sagatavošana BBR testam

Karsts bitumens tiek ieliets sagatavotajās veidnēs, kas atrodas istabas temperatūrā. Bitumens veidnē jālej ar nepārtrauktu kustību no viena līdz otram veidnes galam, iepildot bitumenu nedaudz vairāk, kā nepieciešams, lai nodrošinātu to, ka veidnes ir pilnībā aizpildītas (skat. 45. att.).



45. att. Ar bitumenu piepildītas veidnes

Bitumenam jāļauj atdzist istabas temperatūrā 45 līdz 60 minūtes. Pēc atdzišanas liekais bitumens jānogriež ar karstu nazi vai uzkaršētu lāpstiņu (skat. 46. att.). Pirms testēšanas bitumens jāuzglabā istabas temperatūrā, bet testēšana jāveic ne vēlāk kā 4 stundas pēc bitumena ieliešanas veidnēs.



46. att. Paraugi pēc liekā bitumena nogriešanas

Pirms bitumena parauga izņemšanas no veidnes to ieteicams ne ilgāk kā 5 minūtes atdzesēt aukstuma kamerā (var tikt izmantots ledusskapis) vai šķidrums vannā, lai paraugs kļūtu stingāks un to varētu izņemt no veidnes, to nesabojājot. Nekādā gadījumā nedrīkst paraugu pakļaut temperatūrai, kas ir zemāka par testēšanas temperatūru.

Pēc parauga izņemšanas no veidnes tas nekavējoties jāievieto testēšanas vannā un 60 ± 2 minūtes pirms testēšanas jānogatavina testēšanas temperatūrā (skat. 47. att.). Paraugi jānovieto uz balstiem tā, lai parauga mazākā dimensija būtu parauga augstums (skat. 48. att.).



47. att. Parauga nogatavināšana



48. att. Paraugs novietots uz balstiem

Kad tiek aktivizēta automātiskā testēšanas sistēma, ar paraugu notiek sekojošais:

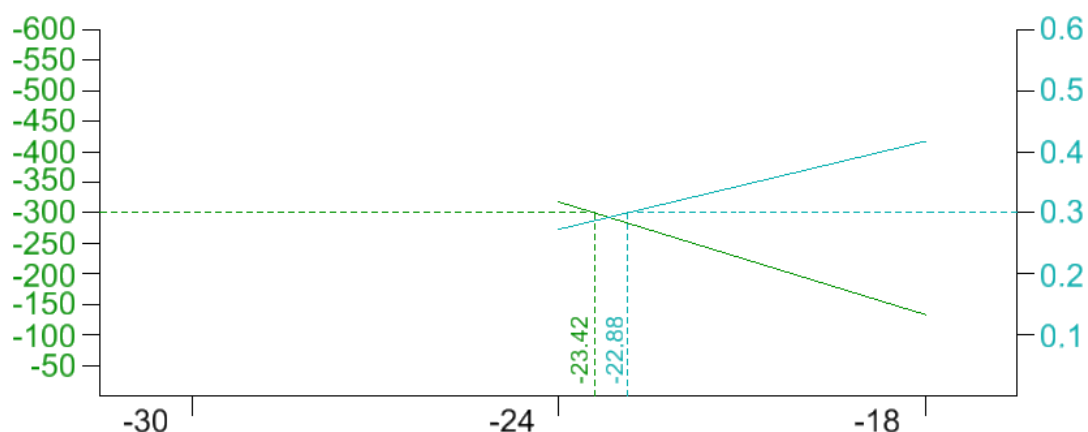
- Pielikta 980 ± 50 mN liela nostādīšanas slodze $1,0 \pm 0,1$ s garumā;
- Slodze samazināta uz 25 mN līdz 45 mN lielu kontakta slodzi, ko pieliek $20 \pm 0,1$ s garumā, lai ļautu paraugam atgūties;
- Pielikta 930 mN līdz 1030 mN liela testēšanas slodze un 240 s garumā noteikta paraugam pieliktā testēšanas slodze un parauga deformācija;
- Samazināta slodze uz 25 mN līdz 45 mN.

Pēc tam paraugs tiek noņemts no balstiem, un iekārta sagatavota nākamā parauga testēšana.

Rezultātu nolasišanai veic datorprogramma. Stingums tiek uzrādīts MPa ar 3 cipariem aiz komata, un m-vērtība tiek uzrādīta ar 3 cipariem aiz komata. Lai noteiktu bitumena šļūdes stingumu un m-vērtību, tiek izmantotas vērtības, ko paraugs ir uzrādījis sloģošanas 60 sekundē.

1) B 70/100-1.1

Tabula 13				
Bitumena B 70/100-1.1 BBR rezultāti				
Mērijuma numurs	-18 °C		-24 °C	
	E_{st. Stiffn.}, MPa	m-value	E_{st. Stiffn.}, MPa	m-value
1	123.667	0.417	330.328	0.280
2	138.496	0.426	305.659	0.265
3	138.222	0.426	-	-
Vidējā vērtība:	133.462	0.423	317.994	0.273
Atkārtojamība:	+/- 12.012	+/- 0.017	+/- 28.619	+/- 0.011
	121.450	0.406	289.374	0.262
	145.473	0.440	346.613	0.283
Krit. temp.:	-32.88 °C			



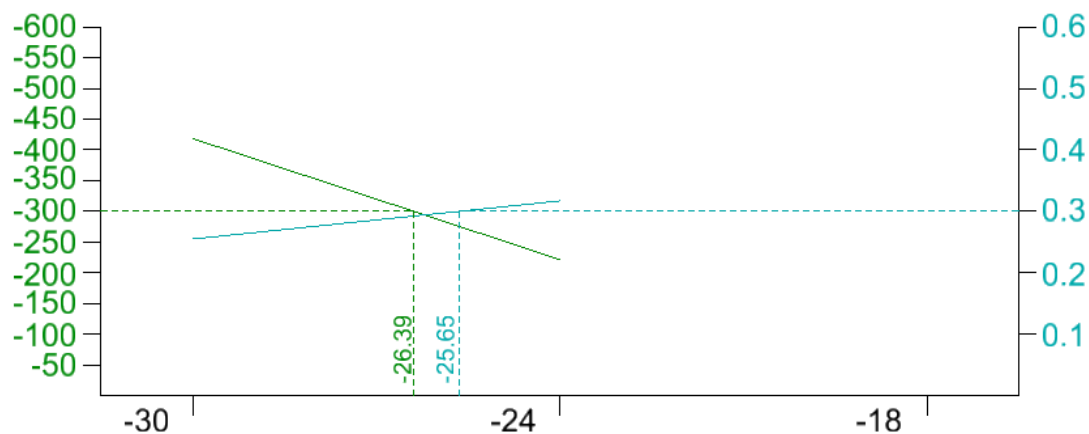
49. att. Bitumena B 70/100-1.1 kritiskās temperatūras noteikšana

2) B 70/100-2

Tabula 14

Bitumena B 70/100-2 BBR rezultāti

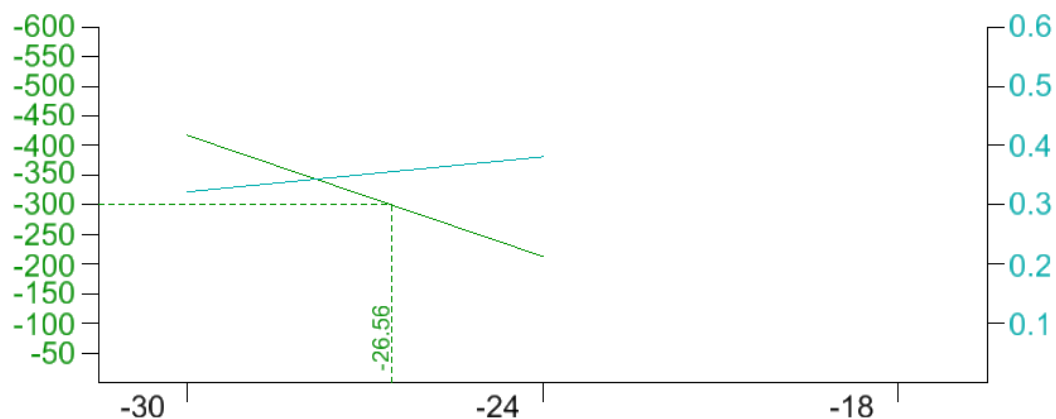
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	222.878	0.314	393.255	0.248
2	221.034	0.310	443.668	0.262
3	240.367	0.326	354.650	0.266
4	213.000	0.311	-	-
5	209.869	0.322	-	-
Vidējā vērtība:	221.430	0.317	397.191	0.259
Atkārtotamība:	+/- 19.929	+/- 0.013	+/- 35.747	+/- 0.010
	201.501	0.304	361.444	0.248
	241.358	0.329	432.938	0.269
Krit. temp.:	-35.65 °C			



50. att. Bitumena B 70/100-2 kritiskās temperatūras noteikšana

3) B 70/100-2 novecināts

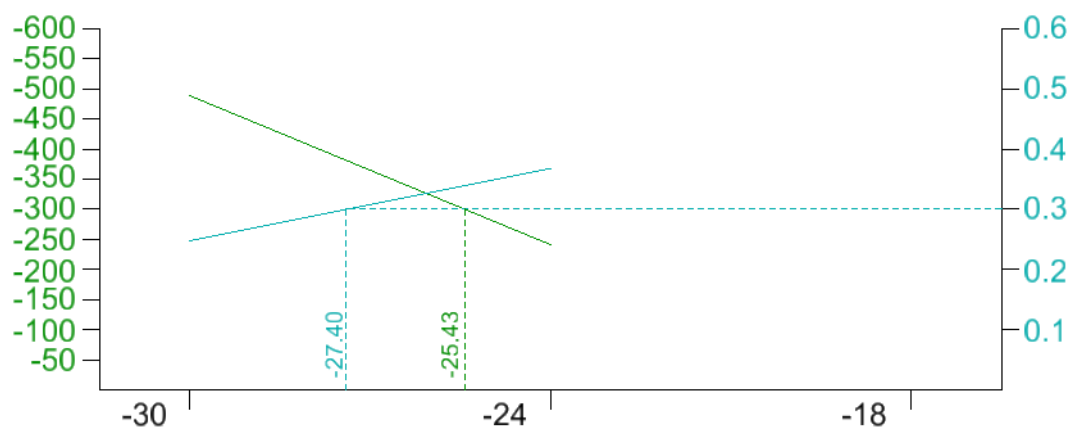
Tabula 15				
Novecināta bitumena B 70/100-2 BBR rezultāti				
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value
1	194.236	0.388	379.696	0.328
2	212.102	0.384	425.456	0.319
3	225.411	0.378	446.284	0.320
4	223.500	0.375	-	-
5	209.423	0.379	-	-
Vidēja vērtība:	212.934	0.381	417.145	0.322
Atkārtojamība:	+/- 19.164	+/- 0.015	+/- 37.543	+/- 0.013
	193.770	0.366	379.602	0.309
	232.098	0.396	454.688	0.335
Krit. temp.:	-36.56 °C			



51. att. Novecinātā bitumena B 70/100-2 kritiskās temperatūras noteikšana

4) Bitumens B 100/150-1

Tabula 16				
Bitumena B 100/150-1 BBR rezultāti				
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value
1	236.127	0.372	497.605	0.252
2	246.266	0.363	479.250	0.243
Vidēja vērtība:	241.197	0.368	488.428	0.248
Atkārtojamība:	+/- 21.708	+/- 0.015	+/- 43.958	+/- 0.010
	219.489	0.353	444.469	0.238
	262.904	0.382	532.386	0.257
Krit. temp.:	-35.43 °C			



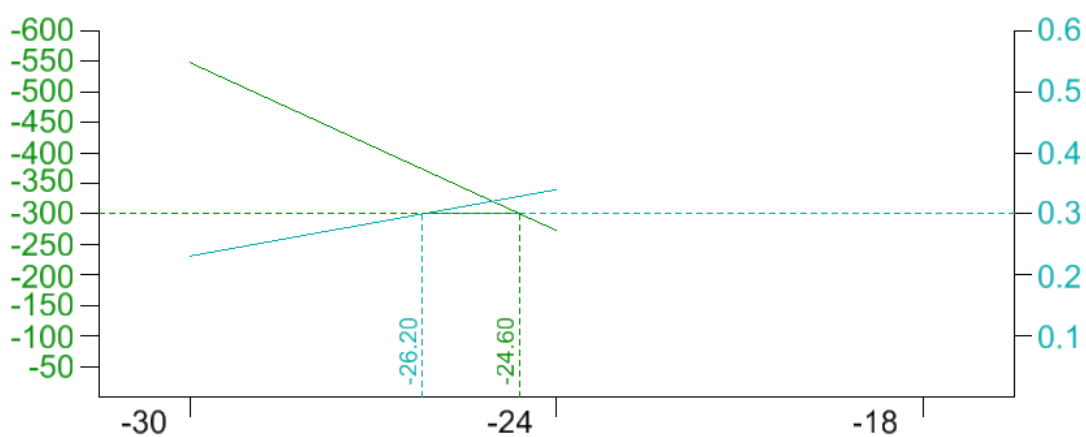
52. att. Bitumena B 100/150-1 kritiskās temperatūras noteikšana

5) Bitumens B 100/150-1 novacināts

Tabula 17

Novecināta bitumena B 100/150-1 BBR rezultāti

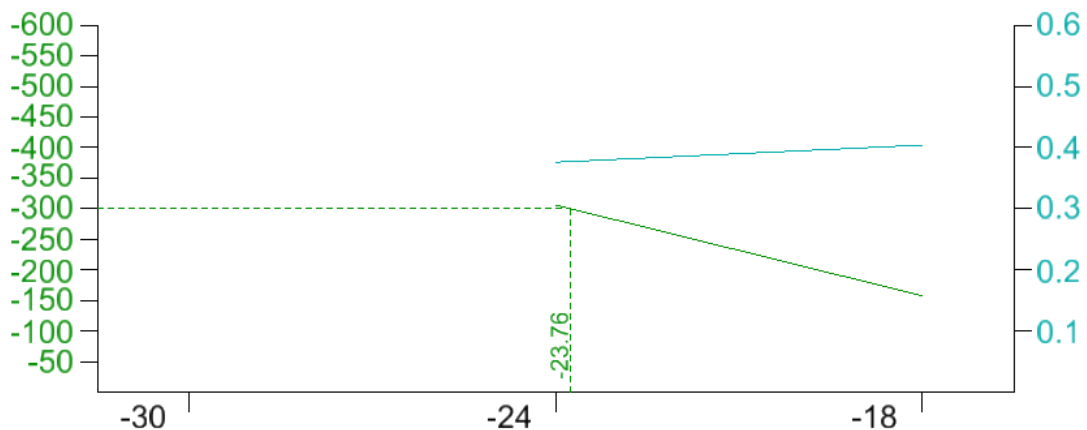
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	263.570	0.341	543.909	0.235
2	283.278	0.336	539.355	0.233
3	271.410	0.344	590.022	0.227
4	-	-	516.647	0.227
Vidējā vērtība:	272.753	0.340	547.483	0.231
Atkārtojamība:	+/- 24.548	+/- 0.014	+/- 49.273	+/- 0.009
	248.205	0.327	498.210	0.221
	297.300	0.354	596.757	0.240
Krit. temp.:	-34.60 °C			



53. att. Novecinātā bitumena B 100/150-1 kritiskās temperatūras noteikšana

6) B 70/100-1 + 2.5% SBS-1

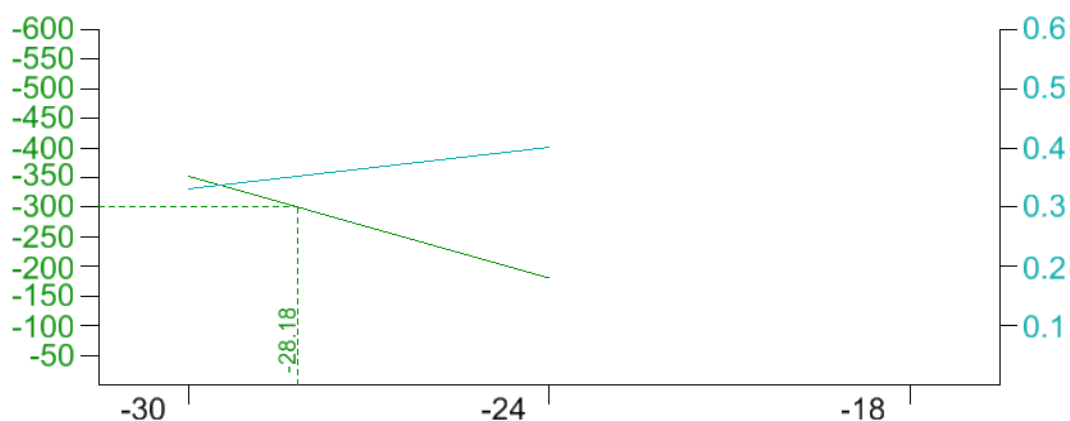
Tabula 18				
Bitumens B 70/100-1 + 2.5% SBS-1 BBR rezultāti				
Mērījuma numurs	-18 °C		-24 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	150.760	0.405	300.994	0.369
2	156.860	0.402	307.780	0.384
3	165.155	0.404	308.905	0.374
Vidējā vērtība:	157.592	0.404	305.893	0.376
Atkārtojamība:	+/- 14.183	+/- 0.016	+/- 27.530	+/- 0.015
	143.408	0.388	278.363	0.361
	171.775	0.420	333.423	0.391
Krit. temp.:	-33.76 °C			



54. att. Bitumena B 70/100-1 + 2.5% SBS-1 kritiskās temperatūras noteikšana

7) B 70/100-2 + 2.5% SBS-1

Tabula 19				
Bitumens B 70/100-2 + 2.5% SBS-1 BBR rezultāti				
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	170.574	0.389	349.175	0.329
2	181.467	0.408	336.325	0.342
3	188.715	0.405	370.846	0.319
4	-	-	351.868	0.334
Vidējā vērtība:	180.252	0.401	352.054	0.331
Atkārtojamība:	+/- 16.223	+/- 0.016	+/- 31.685	+/- 0.013
	164.029	0.385	320.369	0.318
	196.475	0.417	383.738	0.344
Krit. temp.:	-38.18 °C			



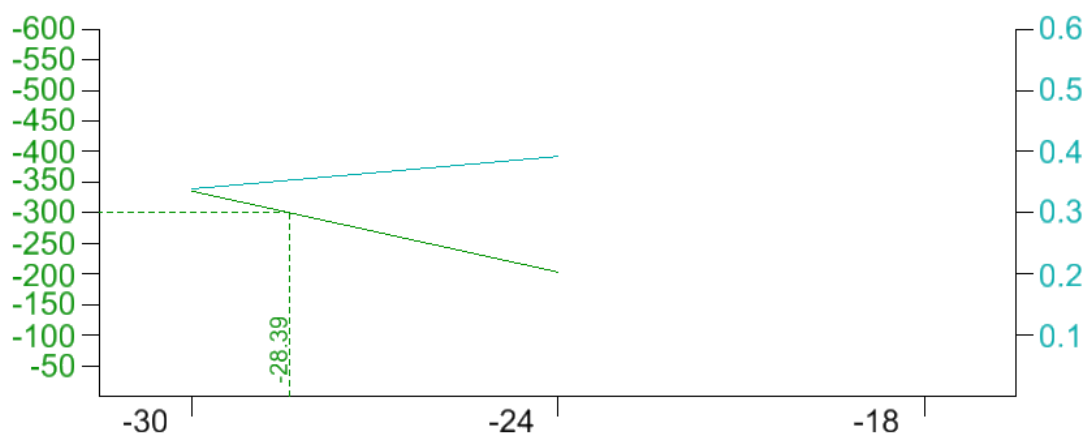
55. att. Bitumena B 70/100-2 + 2.5% SBS-1 kritiskās temperatūras noteikšana

8) B 100/150-1 + 4.0% SBS-2

Tabula 20

Bitumens B 100/150-1 + 4.0% SBS-2 BBR rezultāti

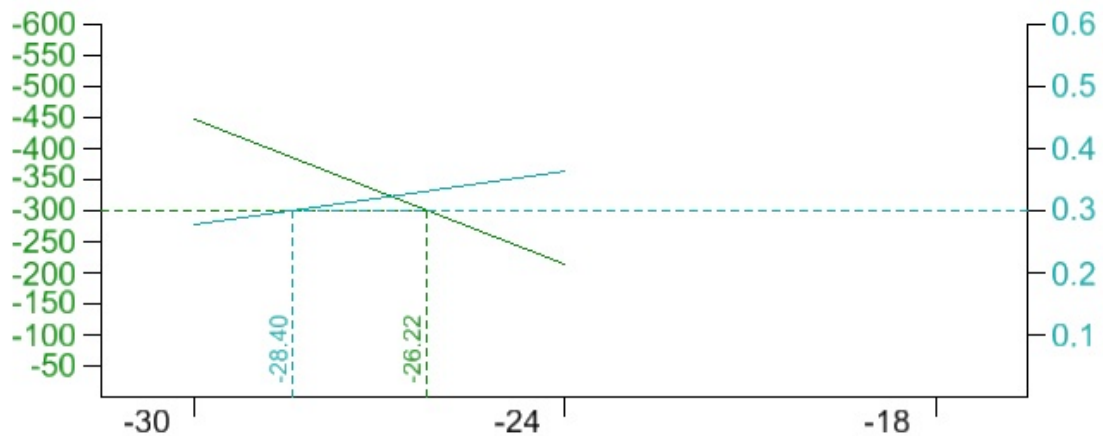
Mērījuma numurs	-24 °C		-30 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	190.355	0.390	346.374	0.331
2	207.937	0.397	324.515	0.347
3	199.015	0.388	-	-
4	214.835	0.393	-	-
Vidējā vērtība:	203.036	0.392	335.445	0.339
Atkārtojamība:	+/- 18.273	+/- 0.016	+/- 30.190	+/- 0.014
	184.762	0.376	305.254	0.325
	221.309	0.408	365.635	0.353
Krit. temp.:	-38.39 °C			



56. att. Bitumena B 100/150-1 + 4.0% SBS-2 kritiskās temperatūras noteikšana

9) B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1

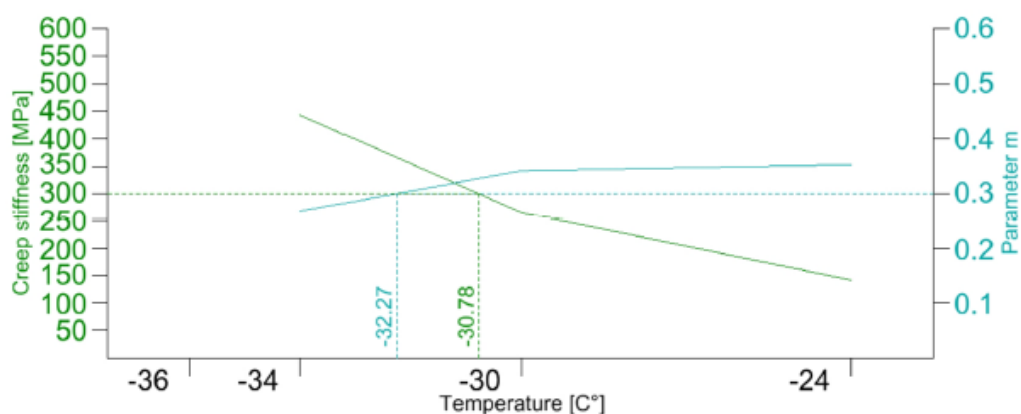
Tabula 21				
B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1 BBR rezultāti				
Mērijuma numurs	-30 °C		-24 °C	
	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value
1	460.586	0.273	213.173	0.363
2	434.629	0.280	-	-
Vidējā vērtība:	447.08	0.277	213.173	0.363
Atkārtojamība:	+/- 40.285	+/- 0.011	+/- 19.186	+/- 0.015
	407.323	0.265	193.987	0.348
	487.892	0.288	232.359	0.378
Krit. temp.:	-36.22 °C			



57 att. Bitumena B 70/100-2 + 2.0% SBS-1 + 1.5% R + 0.2% P-1 kritiskās temperatūras noteikšana

10) B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2

Tabula 22						
B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 BBR rezultāti						
Mērijuma numurs	-34 °C		-30 °C		-24 °C	
	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value	$E_{st. Stiffn.}, MPa$	m-value
1	468.575	0.258	247.692	0.342	144.376	0.350
2	417.830	0.277	278.099	0.343	137.995	0.343
3	-	-	270.342	0.340	134.017	0.354
4	-	-	-	-	140.413	0.357
5	-	-	-	-	151.396	0.362
Vidējā vērtība:	443.203	0.268	265.378	0.342	141.639	0.353
Atkārtojamība:	+/- 39.888	+/- 0.011	+/- 23.884	+/- 0.014	+/- 12.748	+/- 0.014
	403.314	0.257	241.494	0.328	128.892	0.339
	483.091	0.278	289.262	0.355	154.387	0.367
Krit. temp.:	-40.78 °C					



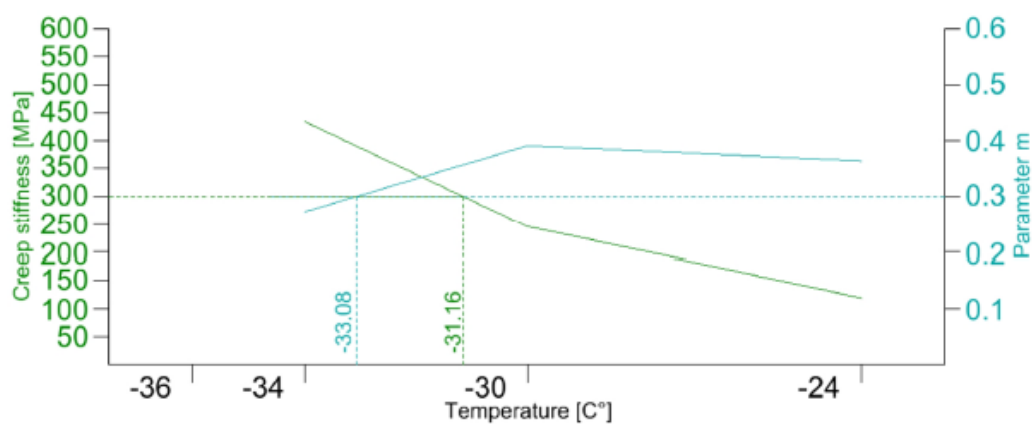
58 att. Bitumena B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 kritiskās temperatūras noteikšana

11) B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (PMB rūpnīca)

Tabula 23

B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (PMB rūpnīca) BBR rezultāti

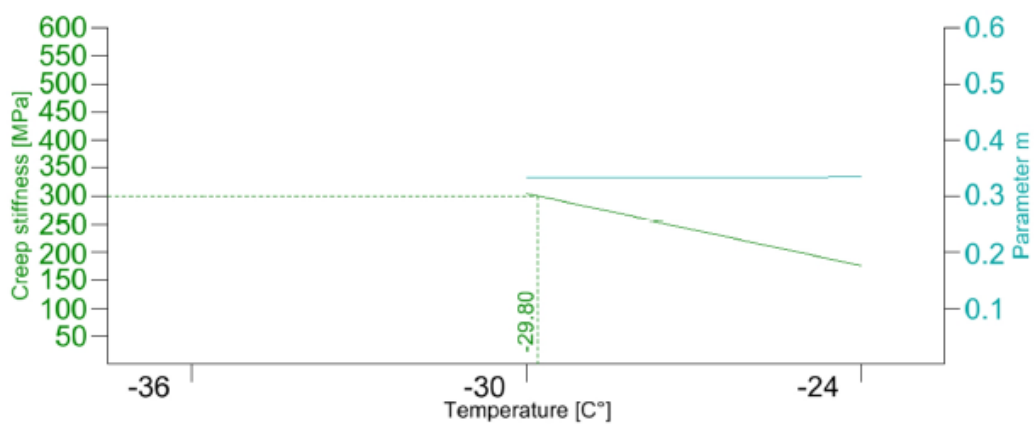
Mērījuma numurs	-34 °C		-30 °C		-24 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	442.927	0.281	241.058	0.384	123.675	0.369
2	419.346	0.268	254.863	0.395	118.151	0.361
3	438.887	0.269	240.124	0.393	121.397	0.369
4	-	-	-	-	114.173	0.355
Vidējā vērtība:	433.720	0.273	245.348	0.391	119.349	0.364
Atkārtojamība:	+/- 39.035	+/- 0.011	+/- 22.081	+/- 0.016	+/- 10.741	+/- 0.015
	394.685	0.262	223.267	0.375	108.608	0.349
	472.755	0.284	267.430	0.406	130.090	0.378
Krit. temp.:	-41.16 °C					



59 att. Bitumena B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 (PMB rūpnīca) kritiskās temperatūras noteikšana

12) B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1

Tabula 24				
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 BBR rezultāti				
Mērijuma numurs	-30 °C		-24 °C	
	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value	$E_{st. Stiffn.}$, MPa	m-value
1	300.144	0.336	168.162	0.334
2	305.892	0.324	178.706	0.339
3	306.768	0.339	178.924	0.325
4	-	-	179.833	0.339
Vidējā vērtība:	304.268	0.333	176.406	0.334
Atkārtotamība:	+/- 27.384	+/- 0.013	+/- 15.877	+/- 0.013
	276.884	0.320	160.530	0.321
	331.652	0.346	192.283	0.348
Krit. temp.:	-39.80 °C			



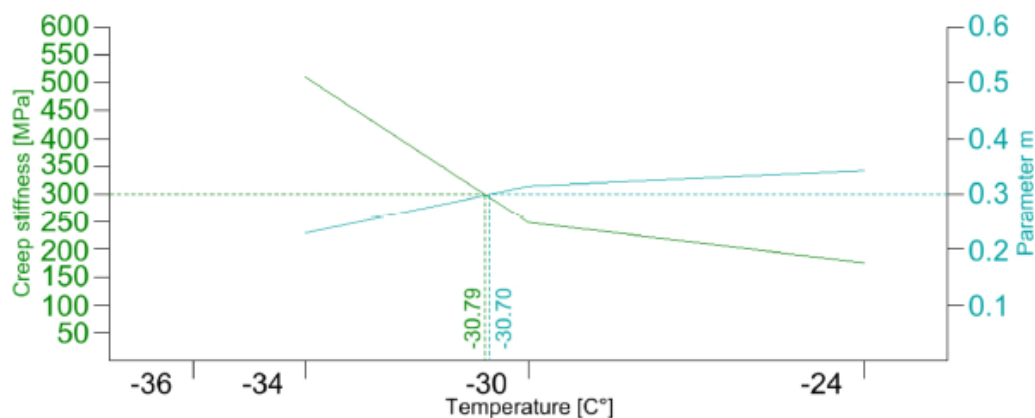
60 att. Bitumena B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 kritiskās temperatūras noteikšana

13) B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1

Tabula 25

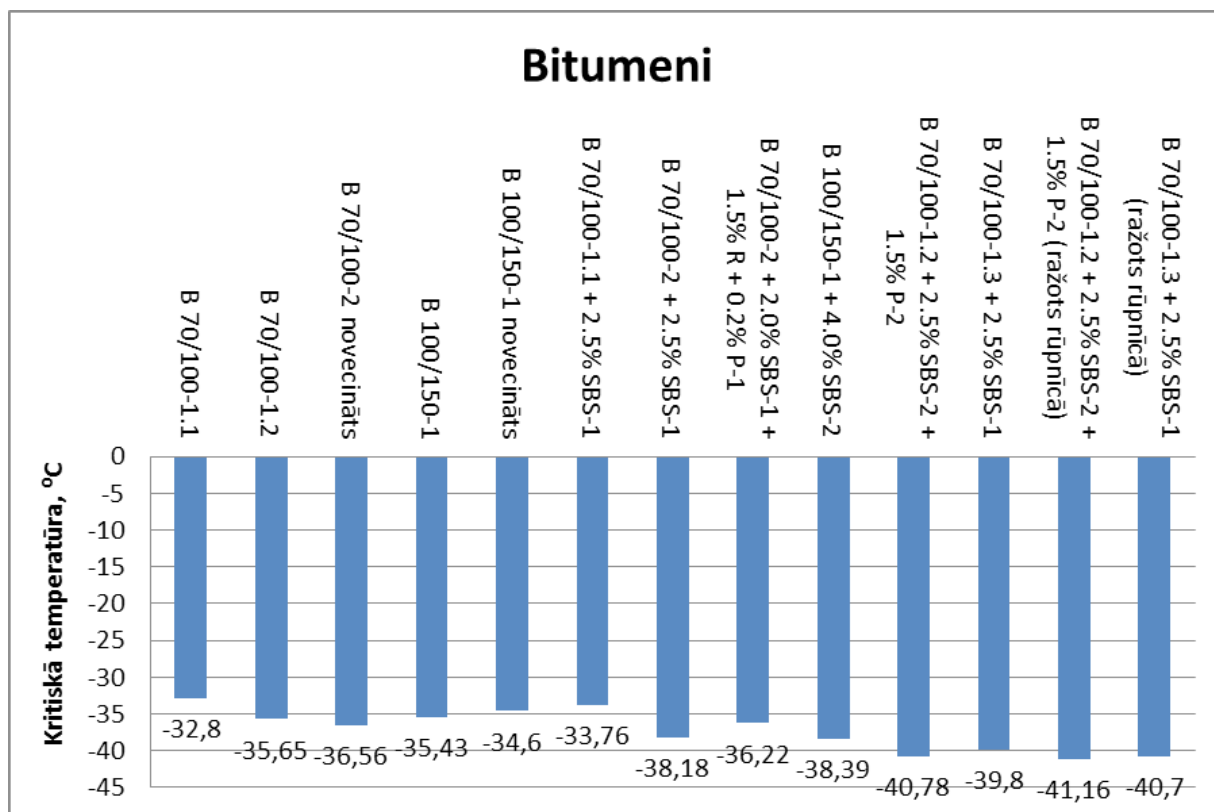
B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 (PMB rūpnīca) BBR rezultāti

Mērījuma numurs	-34 °C		-30 °C		-24 °C	
	E _{st. Stiffn.} , MPa	m-value	E _{st. Stiffn.} , MPa	m-value	E _{st. Stiffn.} , MPa	m-value
1	506.784	0.226	257.215	0.304	182.149	0.342
2	506.773	0.224	239.890	0.326	168.334	0.334
3	516.647	0.237	-	-	181.833	0.347
4	-	-	-	-	182.547	0.343
5	-	-	-	-	161.562	0.351
Vidējā vērtība:	510.068	0.229	248.553	0.315	175.285	0.343
Atkārtojamība:	+/- 45.906	+/- 0.009	+/- 22.370	+/- 0.013	+/- 15.776	+/- 0.014
	464.162	0.220	226.183	0.302	159.509	0.330
	555.974	0.238	270.922	0.328	191.061	0.357
Krit. temp.:	-40.70 °C					



61 att. Bitumena B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 kritiskās temperatūras noteikšana

62. attēlā dots iegūto rezultātu apkopojums.



62. att. Bitumenu kritiskās temperatūras

2.7.2 REZULTĀTU ANALĪZE

Testētie bitumeni uzrāda atšķirīgas kritiskās temperatūras (kritiskā temperatūra T(S)60 ir temperatūra, kurā bitumena stingums ir vienāds ar 300 MPa), kas ir atkarīgas no bitumena klases, ražotāja, piegādes partijas, pievienota modifikatora un modifikācijas tehnoloģijas. SBS modificēts bitumens B 70/100-1.1 uzrāda augstāku kritisko temperatūru - ievērojami augstāku par SBS modificētu B 70/100-2, kas nozīmē, ka tiem ir zemākā noturība pret zemām ekspluatācijas temperatūrām. Bitumeni 70/100-1.2 un B 70/100-1.3, salīdzinājumā ar B 70/100-1.1, uzrādīja zemāku kritisko temperatūru, kas pierāda, ka bitumena īpašības ir atkarīgas no piegādes partijas. Bitumens B 70/100-2 (ražotājs Nr.2) uzrādīja ievērojami labākās īpašības zemās temperatūrās nekā cita ražotāja izejas bitumens, kā arī nezaudē salizturības īpašības pēc īslaicīgas novecošanas, jo novecošanās rezultātā zaudē mazāk vieglo frakciju nekā bitumens B 100/150-1. Konstatēts, ka zemāka SBS daudzuma – 2,0% - pievienošana kombinācijā ar sveķiem (R) un plastifikatoru P-1, salīdzinājumā ar 2,5% modifikatora pievienošanu bez piedevām, nedeva gaidīto ekonomisko un ekspluatācijas īpašību uzlabojumu, pieņemot, ka izejas bitumenam ir pietiekami daudz vieglo frakciju, lai absorbētu SBS. Lielāka SBS daudzuma – 4% - pievienošana izejas bitumenam B 100/150-1 uzrāda nozīmīgu kritiskās temperatūras samazinājumu, tomēr tas ievērojami sadārdzina bitumenu un var negatīvi ietekmēt PMB stabilitāti. SBS modificēti izejas bitumeni B 70/100-1.2 un B 70/100-1.3 uzrādīja zemāku kritisko temperatūru, nekā B 70/100-1.1, kas varētu būt saistīts ar izejas bitumenu kvalitāti, kā arī PMB maisījuma izgatavošanas tehnoloģiju. PMB bitumeni izgatavoti rūpnīcā, salīdzinājumā ar laboratorijā izgatavotajiem, uzrāda zemākās kritiskās temperatūras. Bitumens B 70/100- 1.2 + 2.5% SBS-2 1.5% P-2 (izgatavots rūpnīcā) uzrādīja viszemāko kritisko temperatūru - -41,16°C. PMB bitumenu B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 un B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 atšķirīgas kritiskās temperatūras norāda, ka izejas bitumena kvalitāte, SBS tips un ražotājs, kā arī piedeva (plastifikators) ietekmē PMB sastāva īpašības. Lai plašāk izpētītu šo faktoru ietekmi, nepieciešami tālāki pētījumi.

Ņemot vērā testēšanas laikā iegūtos rezultātus un 26. tabulā dotās minimālās asfaltbetona temperatūras 0°C, var secināt, ka saskaņā ar PG sistēmas klasifikāciju testētie bitumēni ir atbilstoši lietošanai visā Latvijas teritorijā zemās ekspluatācijas temperatūrās.

Tabula 26

Minimālās asfaltbetona temperatūras lielākajās Latvijas pilsētās [14]

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Platuma grādi	Maksimālā asfaltbetona temperatūra, °C	Minimālā asfaltbetona temperatūra, °C
Ainaži	57.87	43.79	-25.68
Alūksne	57.42	45.58	-26.74
Bauska	53.92	48.18	-27.90
Daugavpils	55.87	46.87	-28.64
Dobele	51.50	48.37	-24.60
Gulbene	57.17	46.46	-26.62
Jelgava	56.65	45.84	-28.29
Kolka	57.74	41.72	-17.15
Liepāja	56.50	42.78	-20.54
Madona	56.85	46.48	-28.38
Mērsrags	57.33	43.97	-24.31
Pāvilosta	56.89	43.54	-22.49
Priekuļi	57.31	45.75	-25.32
Rēzekne	56.50	46.11	-26.86
Rīga	56.95	45.46	-23.02
Rucava	56.16	43.84	-21.46
Rūjiena	57.90	45.90	-26.36
Saldus	56.67	44.91	-25.47
Skrīveri	56.64	47.21	-27.45
Skulte	57.32	44.41	-25.23
Stende	57.15	44.79	-24.08
Ventspils	57.38	42.22	-19.32
Zilāni	56.51	47.15	-27.38
Zosēni	57.14	45.86	-29.57

2.8 POLIMERMODIFICĒTO BITUMENU SALĪDZINĀJUMS PĒC STRUKTŪRAS ATKARĪBĀ NO IZMANTOTĀM LABORATORIJAS IEKĀRTAM, POLIMĒRU PROCENTUĀLĀ DAUDZUMA, TEMPERATŪRAS UN MAISIŠANAS INTENSITĀTES

2.8.1 PARAUGU IZGATAVOŠANA UN TESTĒŠANA

Pētījumā tika izmantoti 18 B70/100 bitumena paraugi, kuri tika modificēti izmantojot dažādu SBS polimēra procentuālo saturu (2%, 3%, 4%, 8%). Modifikācija veikta izmantojot lielo un mazo laboratorijas maisītāja - dispergatora galvu. Maisīšana veikta dažādās temperatūrās (robežās no 170 līdz 196 °C) un ar dažādiem maisīšanas ātrumiem (no 1800 līdz 7000 apg./min) 27. tabulā apkopoti PMB izgatavošanai izmantoti izejmateriāli, iekārtas tips un izgatavošanas apstākļi. Tālāk paraugiem tika noteikts struktūras veids, izmantojot fluorescences mikroskopu ar x100 un x200 palielinājumu. Paraugi tika klasificēti izmantojot LVS EN 13632:2010 Latvijā adaptēto standartu "Bitumens un bitumena saistvielas. Polimēra dispersijas vizualizēšana ar polimēru modificētā bitumenā" klasifikāciju un to apzīmējumus (skat. 28. tab. un 63. att.).

Tabula 27							
PMB bitumenu izgatavošanas apstākļi un klasifikācija atbilstoši LVS EN 13632 standartam							
Recepte.							
Nr	Maisītāja galva	Bituma marka	SBS saturs, %	Temperatūra, °C	RPM	Aptuveni atbilstošas figūras Nr. pēc LVS 13632	Klasifikācija atbilstoši LVS 13632
Nr1	Lielā galva	B70/100	2	185-190	5100	A.3	B/H/S/r
Nr2	Mazā galva		2	185-188	7000	A.12	X/H/S/o
Nr3	Mazā galva		4	183-185	7000	A.3	B/I/S/s
Nr4	Mazā galva		8	192-196	7000	A.3	B/H/S/s
Nr5	Mazā galva		2	170-175	7000	A.3	B/H/S/r
Nr6	Mazā galva		4	170-175	7000	A.5	B/I/SL/rs
Nr7	Mazā galva	B70/100	8	175-185	7000	A.3	B/H/S/rs
Nr8	Mazā galva		8	185-190	7000	A.5	B/I/L/so
Nr9	Lielā galva		2	185-190	1800-2300	A.3	B/H/S/r
Nr13	Lielā galva		2	180-187	2800-3000	A.3	B/H/S/r
Nr14	Lielā galva		4	185-189	3200-3300	A.4	B/H/SM/r
Nr15	Lielā galva		8	185-189	3000-3100	A.2	B/I/SL/r
Nr16	Lielā galva		2	182-187	3000	A.5	B/H/S/rs
Nr17	Lielā galva		3	185-188	3400	A.3	B/H/S/r
Nr20	Mazā galva		3	180-185	7000	A.5	B/H/S/rs

Tabula 28

Struktūras klasifikācija atbilstoši LVS EN 13632

Fāzes raksturlielums	Apzīmējums	Fāzes raksturojums
Nepārtrauktas fāzes tips	P	Nepārtraukta polimēra fāze
	B	Nepārtraukta bitumena fāze
	X	Nepārtraukta bitumena un polimēra fāze
Fāzes apraksts	H	Viendabīga
	I	Nevienmērīga
Fāzes izmērs	S	Mazā (< 10µm)
	M	Vidējā (<100 µm)
	L	Lielā (> 100 µm)
Fāzes forma	r	Apaļa
	s	Gareniska
	o	Cita

2.8.2 REZULTĀTU ANALĪZE

Pētot paraugus noteiktas vairākas sakarības starp PMB paraugu struktūru un paraugu sagatavošanas veidiem:

- PMB bitumena struktūra ir atkarīga no laboratorijas maisītāja maisīšanas galvas. Ar lielo maisīšanas galvu ir lielāka iespēja iegūt viendabīgāku struktūru, salīdzinot ar mazo maisīšanas galvu (izņemot nosacījumu, ka mazā galva strādā ar maksimālo intensitāti).
- Izgatavojot PMB ar SBS saturu 2-3%, izmantojot lielo maisīšanas galvu, neatkarīgi no rotēšanas ātruma un temperatūras, tiek iegūta dominējošā un homogēnā bitumena fāzes ar apļveidīgiem polimēra pūšļiem, kas nepārsniedz diametrā 10 µm. Izmantojot mazo maisīšanas galvu, šādu rezultātu var sasniegt tikai pie maksimāliem apgriezieniem neatkarīgi no temperatūras.
- PMB maisījumi ar 8% SBS polimēru uzrāda nevienmērīgu struktūru ar daudzveidīgām polimēra formām.
- PMB maisījumi ar 2% SBS polimēru uzrāda vienmērīgāku un viendabīgāku struktūru salīdzinājumā ar PMB ar 8% SBS polimēru.
- Viendabīgu PMB maisījumu ar 8% polimēra piedevu var iegūt palielinot temperatūru maisīšanas procesā virs 190 °C, pie nosacījuma, ka tiek izmantota mazā maisīšanas galva ar 7000 apgriezieniem minūtē. Pie pārējiem nosacījumiem temperatūra būtiski neietekmē PMB struktūru, ja tā ir robežās no 170 līdz 196 °C.

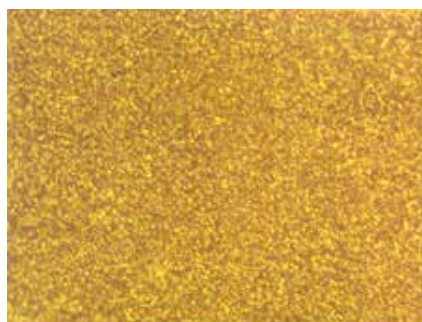


Figure A.3 — B/H/S/r



Pauga Nr. 1



Figure A.12 — P/H/S/o



Paraugs Nr. 2

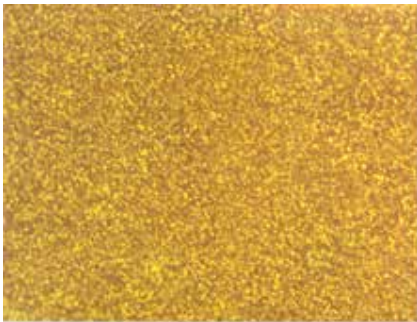
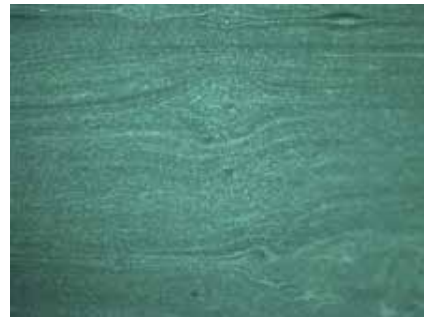


Figure A.3 — B/H/S/r



Paraugs Nr. 3

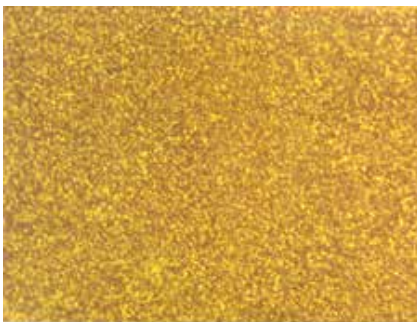


Figure A.3 — B/H/S/r



Paraugs Nr. 4

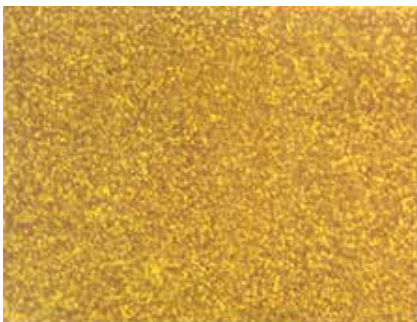


Figure A.3 — B/H/S/r



Paraugs Nr. 5

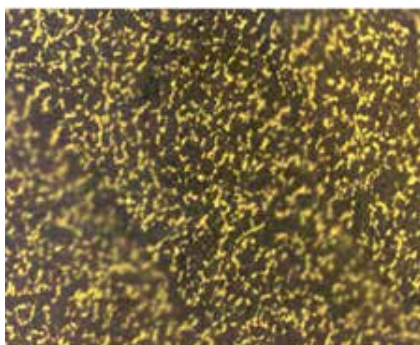


Figure A.5 — B//L/o

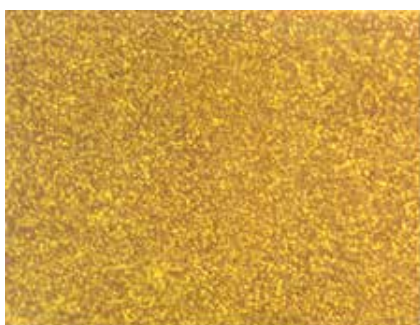


Figure A.3 — B//S/r

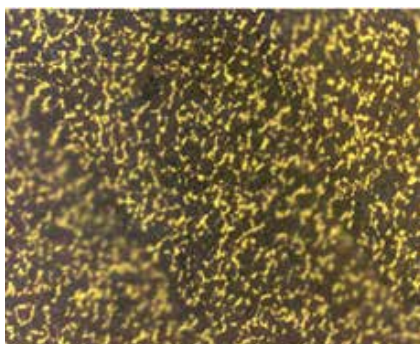


Figure A.5 — B//L/o

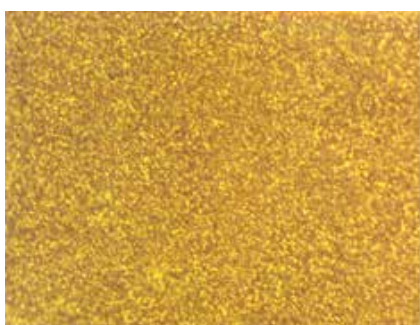


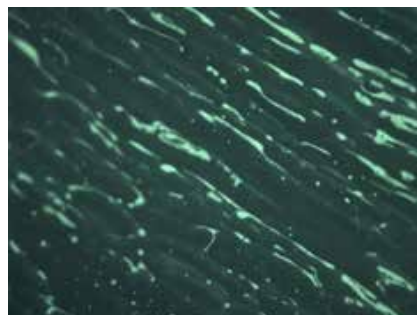
Figure A.3 — B//S/r



Paraugs Nr. 6



Paraugs Nr. 7



Paraugs Nr. 8



Paraugs Nr. 9

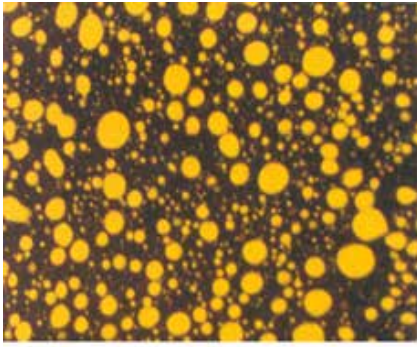
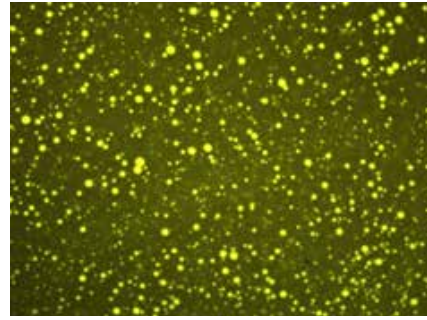


Figure A.4 — B/H/SL/r



Paraugs Nr. 10

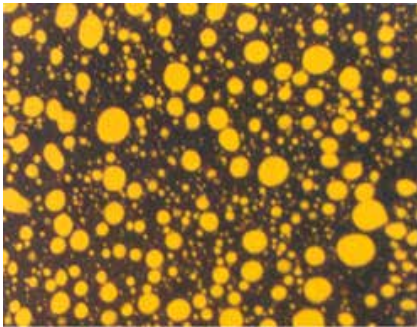
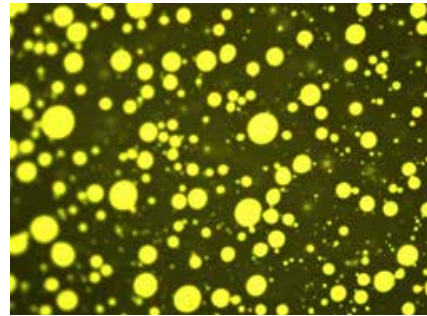


Figure A.4 — B/H/SL/r



Paraugs Nr. 11

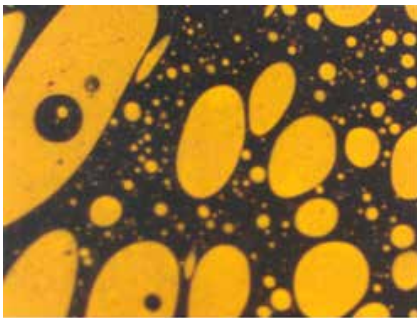
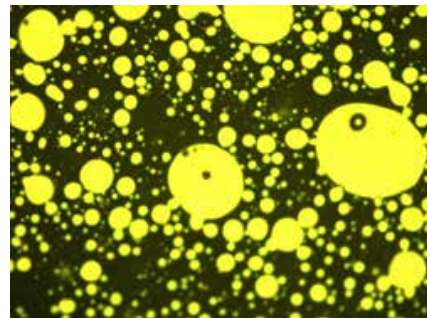


Figure A.2 — B//SL/r



Paraugs Nr. 12

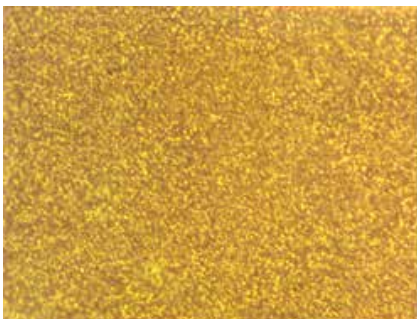


Figure A.3 — B/H/S/r



Paraugs Nr. 13

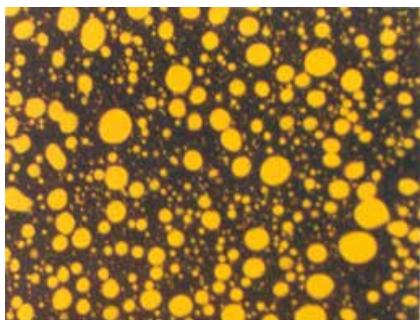
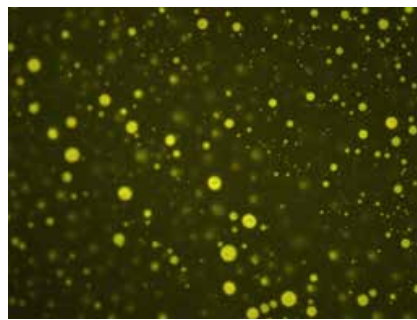


Figure A.4 — B/H/SL/r



Paraugs Nr. 14

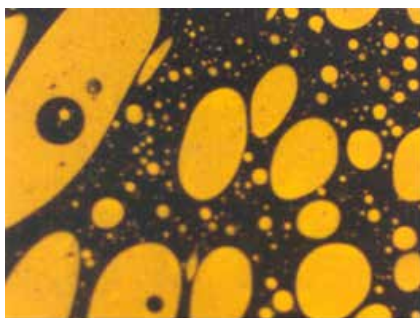
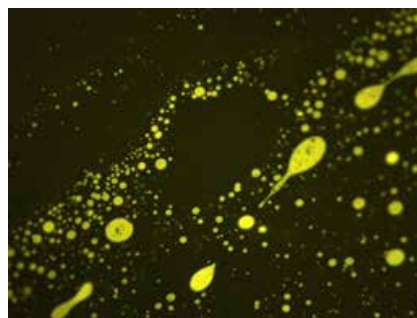


Figure A.2 — B//SL/r



Paraugs Nr. 15

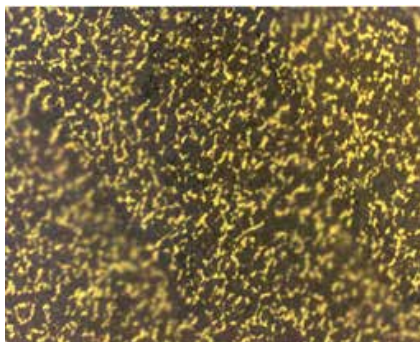
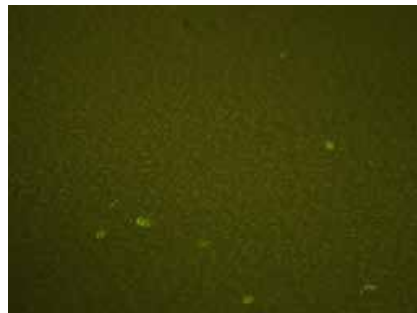


Figure A.5 — B//L/o



Paraugs Nr. 16

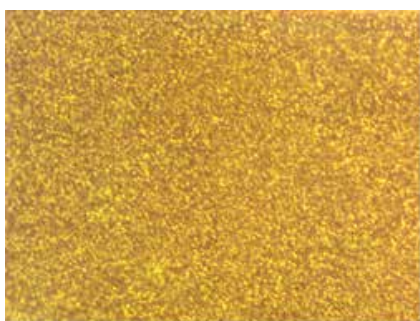


Figure A.3 — B/H/S/r



Paraugs Nr. 17

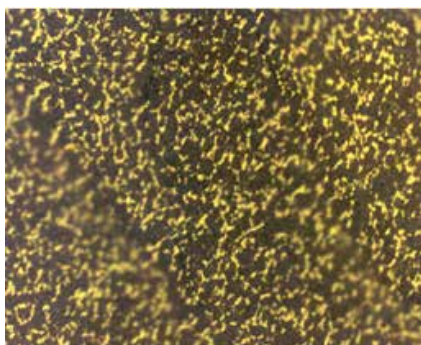
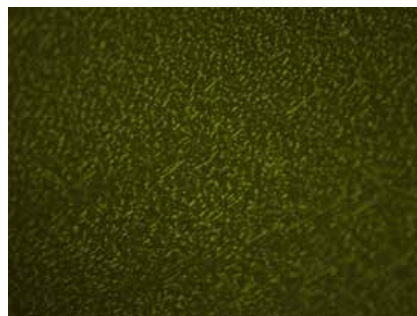


Figure A.5 — B//L/o



Paraugs Nr. 20

63. att. Ar fluorescences mikroskopu noteiktas PMB struktūru klasifikācija atbilstoši LVS EN 13632

3. BITUMENA MASTIKAS ĪPAŠĪBU IZPĒTE

3.1. IEVADS

Aizpildītāja izcelsme var būt dabiska, mākslīga, kā arī tas var veidoties kā blakusprodukts (piem. vieglie pelni no angļu *fly ash*, turpmāk tekstā pelni). Aizpildītājs, iedarbojoties fizikālā vai fizikāli-ķīmiskā līmenī, maina (regulē) bitumena īpašības. Pirmajā gadījumā (fizikālās īpašības), līdzīgi kā rupjam minerālmateriālam, aizpildītājam ir svarīga granulometrija, daļiņu forma un tekstūra. Savukārt fizikāli – ķīmiskā līmenī aizpildītājam ir nozīmīgas virsmas īpašības (virsmas spraugums), kuras ietekmē cietās daļiņas un šķidrās vielas (bitumena) mijiedarbību.

Aizpildītājam ir nozīmīga ietekme uz bitumena, bitumena mastikas un asfaltbetona īpašībām:

- 1) Ja aizpildītāja daļiņas ir lielākas par bitumena kārtas (slāņa) biezumu, tad aizpildītājs aizpilda tukšumus starp rupjām pildvielām daļiņām, kā arī kopā ar bitumenu veido mastiku.
- 2) Ja aizpildītāja daļiņu lielums ir mazāks par bitumena kārtas (slāņa) biezumu, tad aizpildītājam ir plastifikatora loma (pārāk augsts bitumena daudzums asfaltbetonā), kas var veicināt paātrinātu rišu veidošanos.
- 3) Aizpildītājs, absorbējot bitumenu, padara to stingrāku, tomēr pārāk augsts aizpildītāja saturs var veicināt paātrinātu plaisu veidošanos.
- 4) Dažādas izcelsmes aizpildītāji iedarbojas uz bitumenu atšķirīgi.
- 5) Aizpildītāja-bitumena proporcija tieši mērā ietekmē asfaltbetona viegliestrādājamību un ekspluatācijas īpašības.

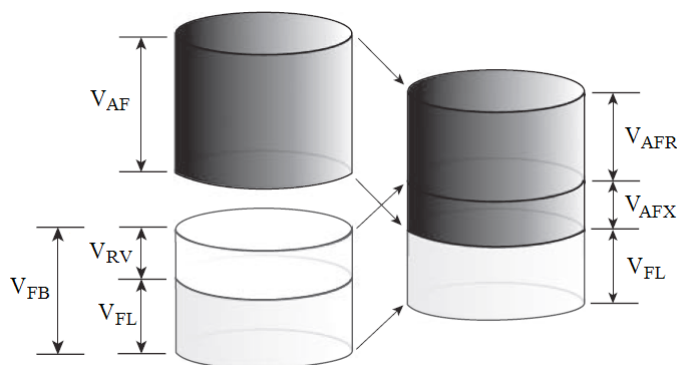
Katram aizpildītājam ir noteikts (vai jānosaka) daļiņu robežlielums (frakcija) no kura tas sāk darboties kā aizpildītājs, nevis plastifikators. Sausa sablīveta aizpildītāja porainībai pēc Rigdena (RV) jābūt no 28% līdz 45%. Ja RV vērtība ir zemāka par 28%, tad mastikā ir pārāk augsts bitumena saturs, savukārt, ja RV vērtība ir virs 45%, tad asfaltbetona struktūrā nav pietiekoši bitumena – struktūra ir ļoti stinga, kas var veicināt plaisu veidošanos asfaltbetonā.

Četri pamatnosacījumi, lai iegūt bitumena mastiku ar atbilstošām īpašībām:

- 1) Aizpildītājs neveido nevēlamu ķīmisko reakciju ar bitumenu.
- 2) Bitumenam un aizpildītājam ir hidrofīlas virsmas, kuras nodrošina labu adhēzijas saiti.
- 3) Nav augsts aizpildītāja daļiņu porainības radītājs (augstās adsorbcijas spējas var veicināt nevēlami augstu stingumu).
- 4) Aizpildītājam jābūt blīvam un ar noteikto granulometrisko sastāvu.

Rigdens, kura vārdā nosaukts svarīgākais bitumena mastikas tests, pirmais aprakstīja bitumena-aizpildītāja sistēmu (skat. 64. att.). Šī teorija pazīstama ar nosaukumu Rigdena porainība (RV). Teorijas pamatā ir tas, ka katrs konkrēts aizpildītājs ir spējīgs saistīt noteiktu bitumena daudzumu. Šis daudzums ir vienāds ar

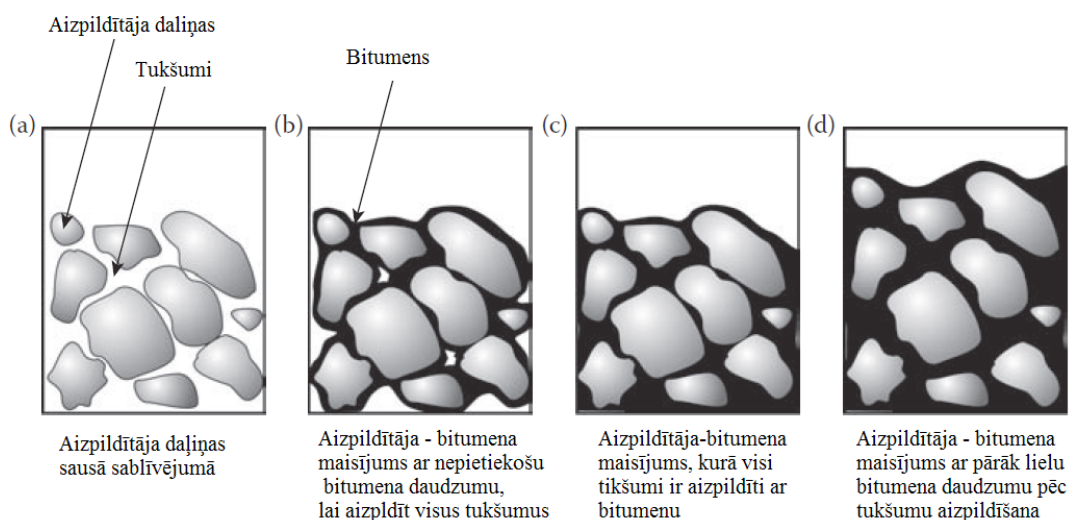
aizpildītāja porainību sablīvētā stāvoklī. Pārējais mastikas bitumens ir nesaistīts – brīvais bitumens. Spēja saistīt bitumenu ir svarīgs aizpildītāja stiegrošanas potenciāla radītājs. RV rādītāju nosaka tilpuma procentos. Rigdens uzsvēra, ka mastikas viskozitāte ir neatkarīga no atsevišķu komponentu – bitumena un mastikas – īpašībām, bet raksturo bitumens–aizpildītājs sistēmas konsistenci.



64. att. Brīvais un saistītais bitumens bitumens–aizpildītājs sistēmā.

V_{FL} – aizpildītāja tilpums, V_{AF} – bitumena tilpums, V_{AFR} – brīvā bitumena tilpums,
 V_{FB} – aizpildītāja tilpumbūvums (kopā ar porām), V_{AFX} – saistītā bitumena tilpums,
 V_{RV} – aizpildītāja poru tilpums (RV vērtība).

Aizpildītāja daudzumam mastikā jābūt ne mazākam par 30%. Ja aizpildītāja saturs ir zem 30%, tad daļiņas ir suspendētas bitumenā un neveido karkasu. 65. attēlā parādīta aizpildītāja–bitumena sistēma, bitumena daudzumam pakāpeniski pieaugot.



65. att. Dažādas aizpildītāja aizpildījuma pakāpes, izmantojot bitumenu

Balstoties uz Rigdena hipotēzi, augstāka RV vērtība nozīmē augstāku saistītā bitumena saturu (mazāku brīvā bitumena daudzumu) un stingumu. RV metode ir standartizēta un to nosaka atbilstoši LVS EN 1097-4. Atbilstoši vairāku valstu tehniskiem noteikumiem, aizpildītāja RV vērtībai jābūt no 28% – 45%. Pētījumā šī metode tika izmantota bitumena mastikas viegliestrādājamības (sablīvējamības) novērtēšanai.

3.2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

3.2.1. MASTIKAS PARAUGU IZGATAVOŠANA

Mastikas paraugi tika izgatavoti izmantojot sekojošu procedūru:

- 1) Krāsni karsē aizpildītāju līdz 160 ± 5 °C.
- 2) Krāsni karsē bitumenu 50/70 līdz 160 ± 5 °C.
- 3) Paraugus izņem ārā no krāsns un ievieto metāla traukā un maisa līdz izveidojas homogēna mastika
Paraugu savienošanas laikā nedrīkst rasties aizpildītāja zudumi.
- 4) Ieliek atpakaļ krāsni un maisa līdz pazūd burbuļi. Pēc tam paraugus atdzesē.

3.2.2. AIZPILDĪTĀJA ĪPAŠĪBAS

29. tabulā norādītas eksperimentā lietoto aizpildītāju izcelsme

Tabula 29		
Izcelsme	Valsts	Karjers
Dolomīts	Latvija	"Kranciems"
Kaļķakmens	Zviedrija, Gotlande	"Stuck"
Pelni	Latvija	"Fortum"

30. tabulā norādītas eksperimentā lietoto aizpildītāju īpašības. Tradicionālo aizpildītāju (dolomīta un kaļķakmens milti) īpašības atbilst "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām. Netradicionālā aizpildītāja (vieglie pelni) granulometriskais sastāvs neatbilst "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām, kā arī tā RV vērtība pārsniedz rekomendēto 28% - 45% robežu.

Tabula 30							
Īpašības	Standarts	Aizpildītāja veids				Prasības "Ceļu specifikācijas 2017"	
		Kaļķakmens	Dolomīts	Kaļķakm + dol.	Pelni (Fly ash)		
Metilēnzilais tests	LVS EN 933-9	3,3	5	4,1	1,66	MBF10	≤10
Daļiņu blīvums	LVS EN 1097-7	2,85	2,75	2,8		Deklarē	
Rigdena poras	LVS EN 1097-4	29	28	30	51	VNR	-
Ūdens saturs	LVS EN 1097-5	<0,1	0,1	0,1	0,1	-	≤1
Karbonāta saturs	LVS EN 196-21	97,5	91,7	95		CC90	≥90
Granulometrija 1000 μm 200 μm 125 μm 63 μm	LVS EN 933-10					min	max
		100	100	100	100	100	100
		100	100	100	86,7	100	100
		91,1	96,4	93,9	70,8	85	100
		73,4	83,5	76	49,3	70	100

Tabulā 31 apkopta aizpildītāju dispersitāte balstoties uz īpatnējās virsmas rādītāju. Rezultāti rāda, ka dolomīta miltiem ir augstākais īpatnējās virsmas rādītājs (augstāka dispersitāte).

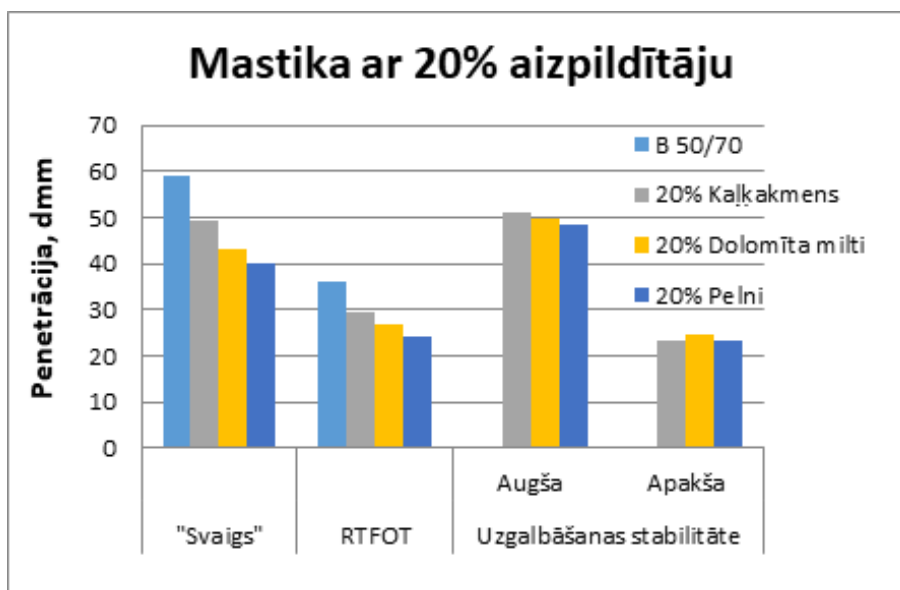
Tabula 31	
Aizpildītāju īpatnēja virsma	
Aizpildītājs	Īpatnējā virsma, m²/g
Kaļķakmens	2.474
Dolomīta milti	4.123
Pelni	2.456

Tabulā 32 apkopts aizpildītāju ķīmiskais sastāvs.

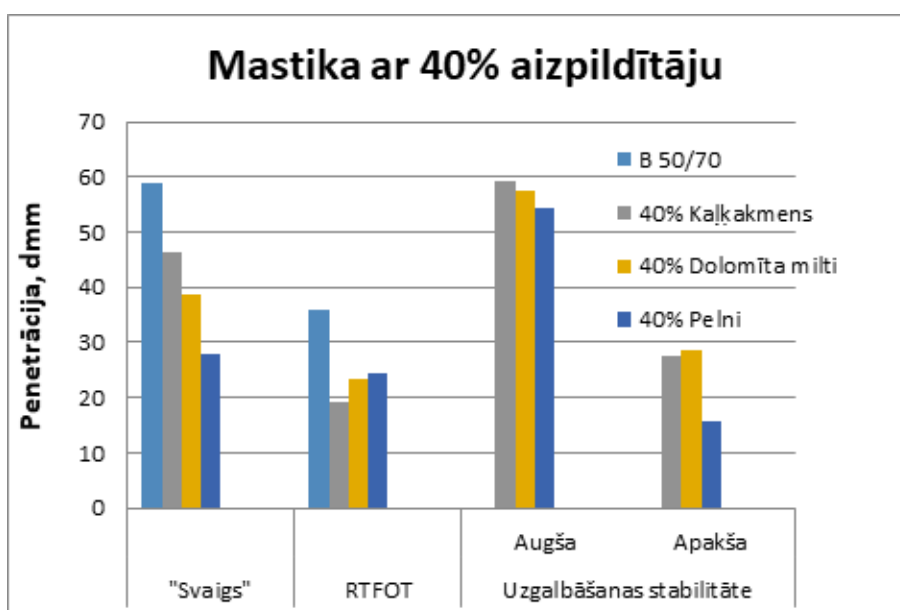
Tabula 32			
Oksīdu saturs			
Komponente	Saturs, %		
	Pelni	Dolomīta milti	Kaļķakmens
SiO ₂	43.14	5.34	-
SiO ₂ aktīvais	3.50	-	-
CaO	24.68	29.43	51.81
MgO	2.11	18.91	-
Fe ₂ O ₃	1,15	0.66	-
K ₂ O	4,35	-	-
Na ₂ O	1.22	-	-
Al ₂ O ₃	5.03	0.82	-

3.2.3. BITUMENA MASTIKAS PAMATĪPAŠĪBAS

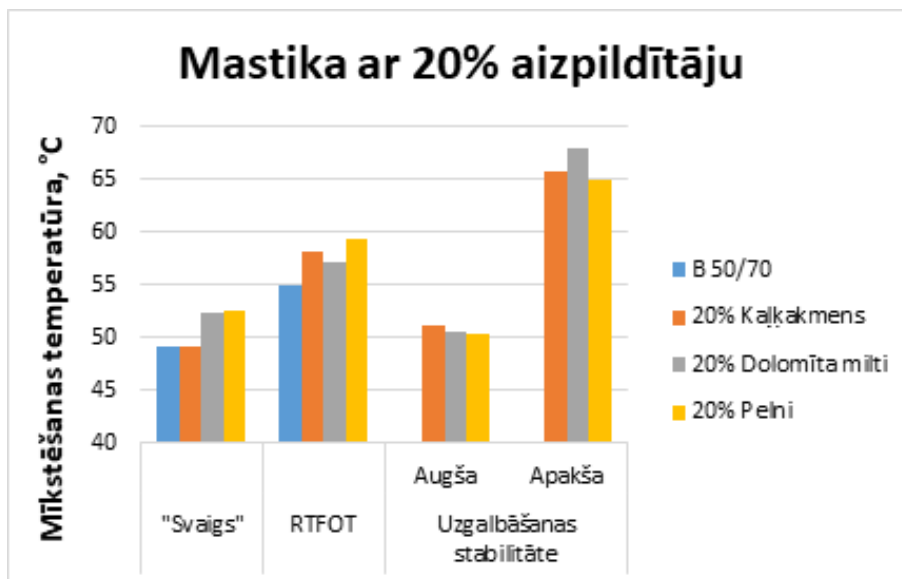
Bitumena mastiku ar 20% un 40% aizpildītāju pamatīpašību raksturojums parādīts 66. - 69. attēlā. Rezultāti rāda, ka mastika ar pelniem uzrāda zemāko penetrācijas rādītāju un augstāko mīkstēšanas temperatūru. Līdz ar to, salīdzinājumā ar tradicionālajiem aizpildītājiem, un, balstoties uz pamatīpašību rezultātiem, pelni visvairāk stiegro (padara stingrāku) bitumena mastiku vidējās un augstās ekspluatācijas temperatūrās. Mastiku homogenitātes (uzglabāšanas stabilitāti) rezultāti rāda, ka visu mastiku struktūra ir nestabila un tai raksturīga noslāņošanās. Homogenitātes novērtēšanai mastikām tika izmantota polimērmodificēta bitumena uzglabāšanas stabilitātes metodika.



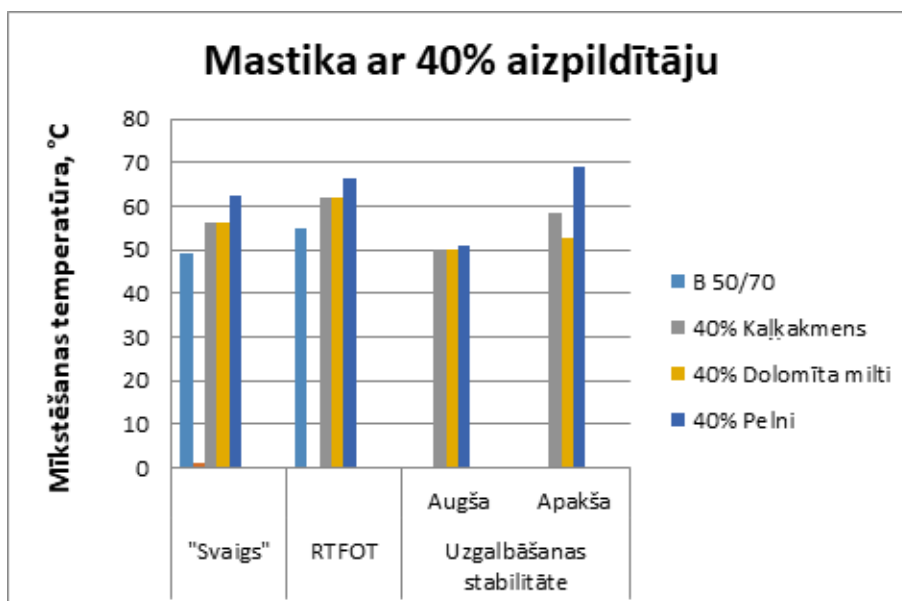
66. att. Penetrācijas tests bitumena mastikām ar 20% aizpildītāju



67. att. Penetrācijas tests bitumena mastikām ar 40% aizpildītāju

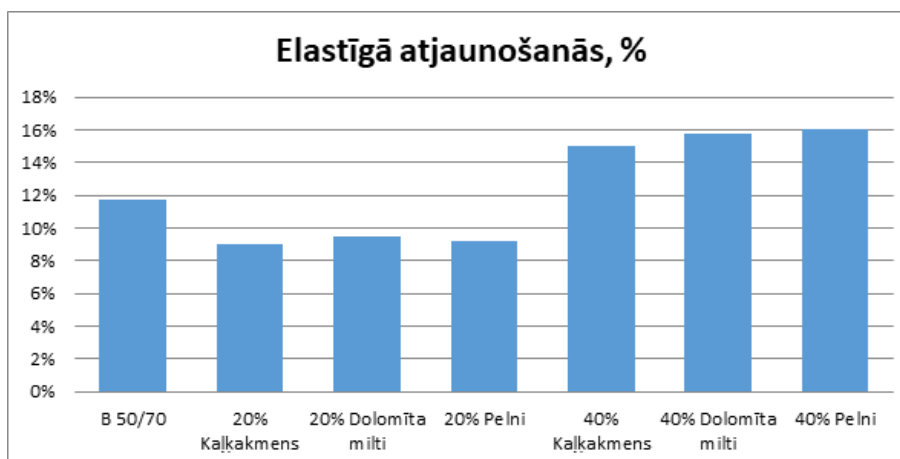


68. att. Mīkstēšanas temperatūras tests bitumena mastikām ar 20% aizpildītāju



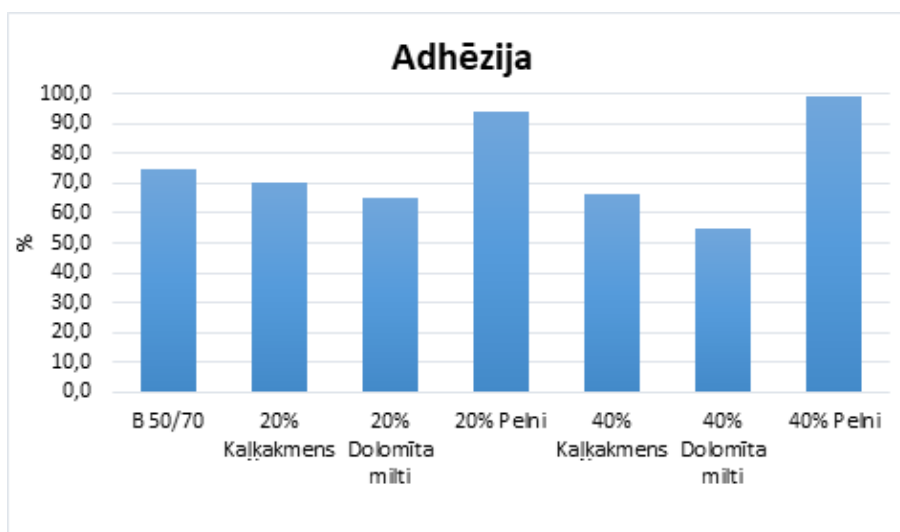
69. att. Mīkstēšanas temperatūras tests bitumena mastikām ar 40% aizpildītāju

Analizējot aizpildītāju ietekmi uz mastikas elastīgajām īpašībām, konstatēts, ka visi šajā pētījumā 20% daudzumā izmantotie aizpildītāji, salīdzinot ar izejas bitumenu B50/70, pasliktina bitumena mastikas elastīgās īpašības (skat. 70. att.). Tomēr palielinoties aizpildītāja daudzumam līdz 40% visas mastikas, salīdzinājumā ar izejas bitumenu B50/70, uzrāda nedaudz labāku elastīgo atjaunošanos.



70. att. Elastīgās atjaunošanās rezultāti

Novērtējot izejas bitumena B50/70 un mastiku adhēziju ar granīta šķembām, konstatēts, ka mastikas ar 20% un 40% dolomīta un kaļķakmens milti nedaudz pasliktina adhēziju salīdzinājumā ar izejas bitumenu (B50/70 – 75%, 20% dolomīts – 65%, 20% kaļķakmens – 70%, 40% dolomīts – 55%, 20% kaļķakmens – 65%) (skat. 71. att.). Savukārt pelni uzlabo adhēzijas īpašības (20% pelni– 94%, 20% pelni– 99%).



71. att. Adhēzijas rezultāti

3.2.4 BITUMENA MASTIKAS REOLOĢISKĀS ĪPAŠĪBAS AR DSR METODI

Bitumena un bitumena mastiku reoloģiskās īpašības noteiktas atbilstoši LVS EN 14470 standartam ar dinamiskās bīdes rotācijas reometru (*DSR – Dynamic Shear Rheometer*), nosakot stinguma moduli (G^*) un fāzes leņķi (δ). Testēšanai izmantots 25mm diametra un 1mm augstuma rotācijas cilindrs, lai testēšanu veiktu temperatūras intervālā no 46°C līdz 82°C. Paraugs tika pakļauts cikliskai bīdei ar frekvenci 1.59Hz. Kā izejas bitumenu un mastiku atbilstības kritērijs atbilstoši *Superpave* specifikācijām izmantota $G^*/\sin \delta$ sakarība. Šī sakarība noteikta gan "svaigam", gan ar RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test* atbilstoši LVS EN 12607-1) metodi novēcinātām bitumenam. Lai "svaigs" bitumens vai mastika būtu noturīgi pret rišu veidošanos, parametram $G^*/\sin \delta$ jābūt lielākam par 1kPa. Savukārt ar RTFOT metodi novēcinātām bitumenam parametram $G^*/\sin \delta$ jābūt lielākam par 2.2kPa. 33. – 46. tabulās apkopoti bitumena B50/70 un mastiku testēšanas rezultāti.

Rezultāti rāda, ka "svaigā" un novēcinātā bitumena rišu noturības klase atbilstoši PG (*Performance grade*) sistēmai ir +64°C. Mastika ar 20% kaļķakmens un dolomīta miltiem ir vienu klasi augstāka, salīdzinājumā ar

izejas bitumenu - +70°C. Savukārt mastikai ar 40% aizpildītāju (visiem šajā pētījuma izmantotajiem) rišu noturības klase ir +76°C.

Tabula 33			
Bitumena B50/70 reoloģiskās īpašības ar DSR metodi			
Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	5794,8	83,6	5,2
64	1685,7	86,4	1,7
70	765,6	87,3	0,8
76	397,0	88,3	0,4
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 34			
Ar RTFOT metodi novēcināta bitumena B50/70 reoloģiskās īpašības ar DSR metodi			
Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	7635,4	82,6	7,7
64	2996,1	83,1	3,0
70	1285,7	85,7	1,3
76	615,6	88,2	0,6
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 35			
Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 20% kaļķakmens aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi			
Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	7644,1	80,3	7,25
64	2434,5	85,4	2,39
70	1208,3	87,8	1,12
76	435,6	88,2	0,44
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 36			
Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 20% dolomīta aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi			
Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	6242,2	82,4	6,07
64	2606,0	85,5	2,56
70	1234,9	87,4	1,21
76	598,3	88,3	0,59
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 37

Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 20% pelnu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	8011,6	79,3	7,35
64	2821,2	84,5	2,75
70	1374,2	86,4	1,33
76	689,3	87,7	0,67
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 38

Mastikas no ar RTFOT metodi novecināta bitumena B50/70 + 20% kaļķakmens aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	8102,5	80,3	8,16
64	4228,9	81,7	4,47
70	2083,2	84,4	2,0
76	1898,9	84,2	1,91
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 39

Mastikas no ar RTFOT metodi novecināta bitumena B50/70 + 20% dolomīta aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	13287,5	78,3	13,49
64	5115,2	82,5	5,09
70	2461,6	83,6	2,38
76	1197,9	85,2	1,2
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 40

Mastikas no ar RTFOT metodi novecināta bitumena B50/70 + 20% pelnu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	8542,2	80,4	8,85
64	3624,5	85,1	3,65
70	1866,2	87,0	1,87
76	904,2	88,8	0,9
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 41

**Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 40%
kaļķakmens aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi**

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	4933,3	82,5	5,0
64	2284,9	83,0	2,32
70	1100,5	86,6	1,1
76	-	-	-
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 42

**Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 40%
dolomīta miltu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi**

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	10229,7	79,95	10,85
64	4727,6	82,2	4,83
70	2188,4	85,6	2,2
76	1066,1	88,7	1,07
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 43

**Mastikas no "svaigā" bitumena B50/70 + 40%
pelnu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi**

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	29531,9	69,2	22,75
64	11187,6	81,9	11,49
70	4113,2	81,4	4,31
76	1998,9	85,8	2,01
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 44

**Mastikas no ar RTFOT metodi novēcināta bitumena B50/70 + 40%
kaļķakmens aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi**

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	22974,8	73,8	26,53
64	10114,8	73,8	10,61
70	5193,3	81,8	5,14
76	2260,9	83,1	2,35
	- atbilst		- neatbilst

Tabula 45

Mastikas no ar RTFOT metodi novecināta bitumena B50/70 + 40% dolomīta miltu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	33445,1	69,3	30,36
64	12868,5	75,2	10,3
70	5139,8	84,1	4,96
76	2375,9	85,4	2,32
	- atbilst		- neatbilst

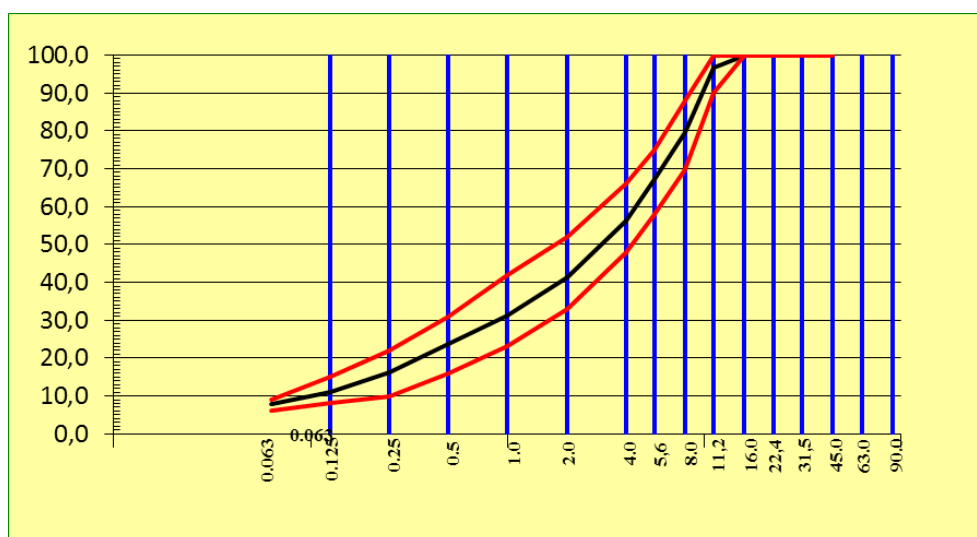
Tabula 46

Mastikas no ar RTFOT metodi novecināta bitumena B50/70 + 40% pelnu aizpildītāju reoloģiskās īpašības ar DSR metodi

Temperatūra, °C	Stinguma modulis (G*), Pa	Fāzes leņķis (δ)	Rišu noturības parametrs G*/sin δ, kPa
58	26363,4	67,1	26,31
64	11030,8	70,8	11,06
70	5094,3	79,4	5,1
76	2629,2	85,7	2,56
	- atbilst		- neatbilst

3.2.5. ASFALTBETONA SASTĀVI

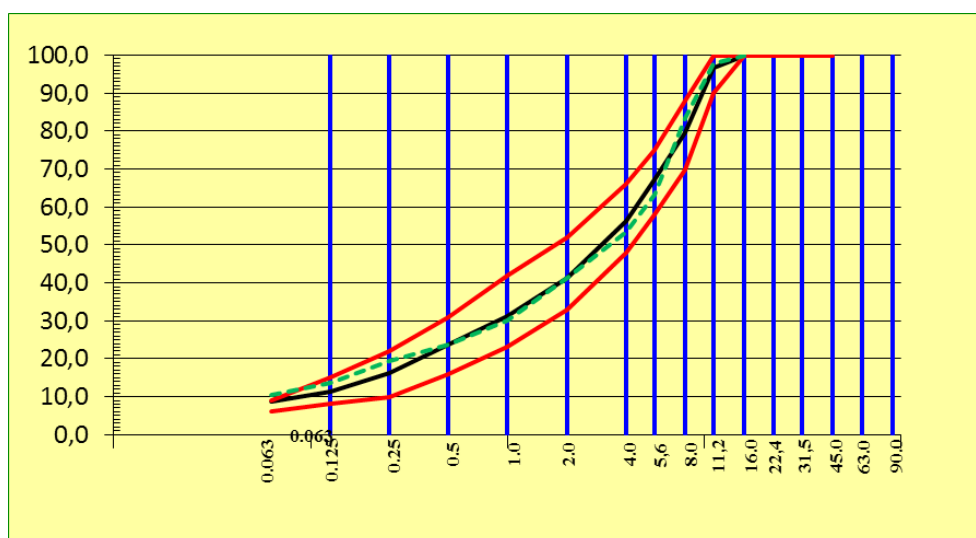
72. attēlā parādīts AC11 surf asfaltbetona ar kaļķakmens aizpildītāju granulometriskais sastāvs un atbilstība "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām.



Max %	9	15	22	31	42	52	66	75	88	100	100
Min %	6	8	10	16	23	33	48	58	70	90	100
Fakt., %	8,0	11,1	16,2	23,8	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100,0

72. att. AC11 surf asfaltbetona ar kaļķakmens aizpildītāju granulometriskais sastāvs

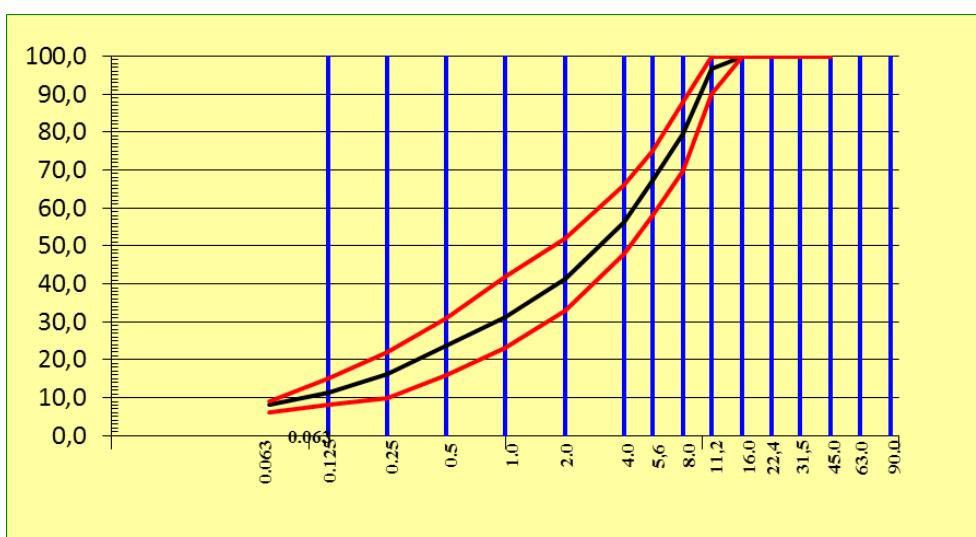
73. attēlā parādīts AC11surf asfaltbetona ar dolomīta aizpildītāju granulometriskais sastāvs un atbilstība "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām.



Max %	9	15	22	31	42	52	66	75	88	100	100
Min %	6	8	10	16	23	33	48	58	70	90	100
Fakt., %	8,6	11,4	16,3	23,8	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100,0

73. att. AC11surf asfaltbetona ar dolomīta aizpildītāju granulometriskais sastāvs

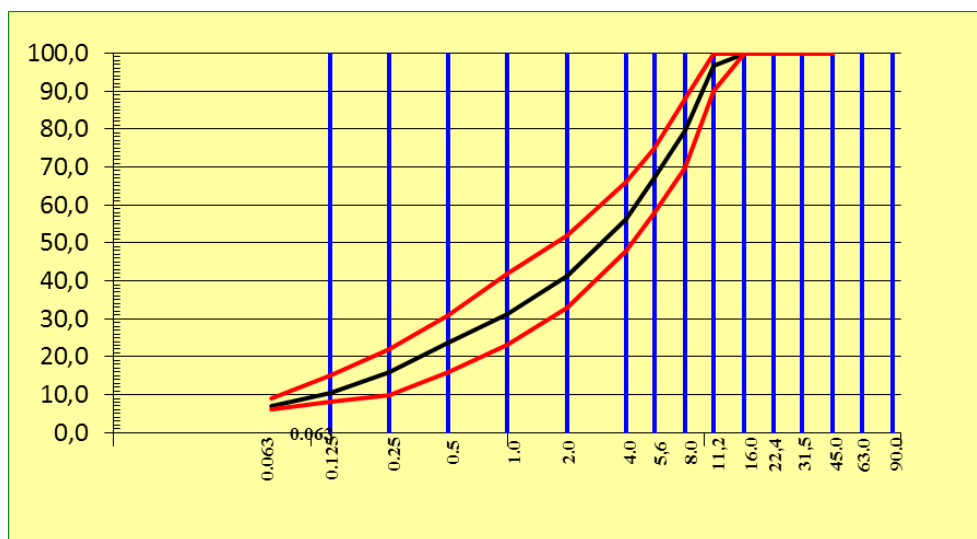
74. attēlā parādīts AC11surf asfaltbetona ar 50% dolomīta miltu 50% kaļķakmens miltu aizpildītājiem granulometriskais sastāvs un atbilstība "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām.



Max %	9	15	22	31	42	52	66	75	88	100	100
Min %	6	8	10	16	23	33	48	58	70	90	100
Fakt., %	8,3	11,3	16,3	23,8	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100,0

74. att. AC11surf asfaltbetona ar 50% dolomīta miltu 50% kaļķakmens miltu aizpildītājiem granulometriskais sastāvs

75. attēlā parādīts AC11 surf asfaltbetona ar vieglo pelnu aizpildītāju granulometriskais sastāvs un atbilstība "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām.



Max %	9	15	22	31	42	52	66	75	88	100	100
Min %	6	8	10	16	23	33	48	58	70	90	100
Fakt., %	7,1	10,4	15,8	23,7	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100,0

75. att. AC11 surf asfaltbetona ar vieglo pelnu aizpildītāju granulometriskais sastāvs

3.2.6. ASFALTBETONA SASTĀVU PAMATĪPAŠĪBAS

47. tabulā dotas izstrādāto asfaltbetona sastāvu pamatīpašības un atbilstības novērtējums "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām. Ar netradicionālo pelnu aizpildītāju pārsniegta sablīvējuma augšējā robeža – 4% (fakt. 5,6).

Tabula 47

AC 11 surf 50/70		Max blīvums	Tilpumbļivums	Poru saturs	Ar bit. Aizpildītās poras	Bitumena saturs	Granulometrija (Caurisjāto daļiņu % sastāvs)											
							Sieti, mm											
							0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	
Aizpildītāja veids	Dolomīts	Projekta rez. Laboratorijas rez.	2,512	2,428	3,3	78,9	5,23	8,2	10,7	15	21,1	27,2	35,4	49,5	63	75,1	96,9	100
			2,512				5,4	8	11,1	16,2	23,8	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100
	Dolomīts + kalņak. 50/50	Projekta rez. Laboratorijas rez.	2,514	2,434	3,2	79,9	5,29	9	11,2	15,1	21,2	27,6	36,3	50,1	63,7	75,8	95,1	100
			2,506				5,4	7,1	10,4	15,8	23,7	31,2	41,3	56,4	67,3	79,6	96,7	100
	Specifikāciju prasība projektēšanai	Pelni	Projekta rez. Laboratorijas rez.	2,506	2,365	5,6	68,5	5,26	7,4	9,8	14,4	20,8	27,4	36,3	51,8	65,5	78,7	97,5
					1,5			6			16	23	33	48	58	70	90	100
				4		> 5.4	9			31	42	52	66	75	88	100	100	

3.2.7 REZULTĀTU ANALĪZE

Analizējot mastikas pamatīpašības un reoloģiskās īpašības, konstatēts, ka visi šajā pētījumā izmantotie aizpildītāji 20% daudzumā, salīdzinot ar izejas bitumenu B50/70, pasliktina bitumena mastikas elastīgās īpašības. Tomēr palielinoties aizpildītāja daudzumam līdz 40% visu mastiku elastīgās īpašības uzlabojas, pārsniedzot izejas bitumena elastīgo atjaunošanos. Eksperimentāli noteikts, ka bitumena mastika ar pelniem uzrāda zemāko penetrācijas radītāju un augstāko mīkstēšanas temperatūru. Mastiku homogenitātes (uzglabāšanas stabilitāte) rezultāti rāda, ka visu mastiku struktūra ir nestabila un tai raksturīga noslāņošanās. Tomēr svarīgi atzīmēt, ka homogenitātes novērtēšana veikta izmantojot PMB uzglabāšanas stabilitātes testu. Bitumena mastikas ar 20% un 40% dolomīta un kaļķakmens milti nedaudz pasliktina adhēziju ar granīta šķembām salīdzinājumā ar izejas bitumenu (B50/70 – 75%; 20% dolomīts – 65%; 20% kaļķakmens – 70%; 40% dolomīts – 55%; 20% kaļķakmens – 65%). Savukārt pelni ievērojami uzlabo bitumena mastikas un granīta šķembu adhēzijas īpašības (20% pelni – 94%, 20% pelni – 99%). Noskaidrots, ka izejas un novecinātā bitumena rišu noturības klase atbilstoši PG (Performance grade) sistēmai ir +64°C, kas atbilst Latvijas klimatiskiem apstākļiem. Mastikai ar 20% kaļķakmens un dolomīta miltiem rišu noturības klase ir +70°C. Savukārt mastikai ar 40% aizpildītājiem (visiem šajā pētījuma izmantotajiem) rišu noturības klase ir +76°C. Rišu noturības klase novērtēta izmantojot rišu veidošanās parametru $G^*/\sin \delta$, kuram jābūt lielākam par 1kPa (novecinātām bitumenam) vai 2.2kPa (novecinātām ar RTFOT vai PAV) metodi bitumenam.

GALVENIE SECINĀJUMI

1. Izejas bitumena polimērmofifikācijas procesu un PMB sistēmas stabilitāti ietekmē polimēra saturs, polimēra molekulārā masa, asfaltēnu molekulārā masa, aromātiskums.
2. Stabīlas PMB struktūras radīšanai, bitumenam jāsaturs pietiekami liels vieglo frakciju saturs, lai šķīdinātu un uzbriedinātu polimēru ar eļļu (plastifikatoru) pievienošanu.
3. Galvenie SBS modifikēta bitumena trūkumi ir zemā novecošanās izturība augstās temperatūrās un UV ietekmē. Perspektīvākā metode šo trūkumu novēršanai ir SBS divkāršas saites piesātināšana, piemēram, ar ūdeņradi (hidroģinēšana) - SEBS (stirēns-etilēns/butadiēns-stirēns) polimērmofifikēta bitumena iegūšana.
4. Stabīlas PMB sistēmas ar augstām ekspluatācijas īpašībām iegūšanai, izejas bitumenam jānosaka un jāanalizē funkcionālo grupu sastāvu ar SARA (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes) metodi.
5. Bitumens ar augstu piesātināto eļļu saturu var veidot nestabīlas PMB sistēmas.
6. Svarīgākais ārējais faktors, kas ietekmē PMB struktūru un īpašības ir PMB ražošanas apstākļi. Šos apstākļus jāizvēlas, veicot priekšizpēti, atkarībā no polimēra tipa, bitumena izcelsmes un klases, pieejamā maisītāja un disperģatora, kā arī maisīšanas laika, ātruma un temperatūras režīma. Ražojot PMB ar SBS polimēru, jāizvairās no temperatūrām virs 190°C, lai samazinātu izejas bitumena un polimēra priekšlaicīgu novecošanos.
7. Veikta vairāku paņēmienu analīze PMB stabilitātes un novecošanās problēmu samazināšanai, kā piemēram, ķīmiskā piesātināšana, vulkanizācija ar sēru, antioksidantu, hidroģobo māla minerālu, reaģējošo polimēru, kā arī funkcionalizācijas metožu izmantošana. Secināts, ka ķīmiskā piesātināšana, funkcionalizācija un reaģējošie polimēri ir efektīvi veidi polimēru, piemēram, SBS novecošanas izturības un uzglabāšanas stabilitātes uzlabošanai.
8. Veicot bitumenu eksperimentālo izpēti, konstatēts, ka:
 - a. Funkcionālo grupu sastāvs atkarīgs no bitumena ražotāja, piegādes partijas, bitumena klases un novecošanās ilguma.
 - b. Bitumens B70/100-2 uzrādīja zemāko vieglo frakciju saturu.
 - c. Bitumeniem, kuri modifikēti PMB ražotnē ir labākas ekspluatācijas īpašības zemās temperatūrās, nekā laboratorijā modifikētiem bitumeniem. Fluorescences mikroskopa rezultāti rāda, ka rūpnieciski modifikētam bitumenam atšķiras PMB struktūra – polimērs veido nepārtraukto fāzi, bet laboratoriski modifikētām bitumenam nepārtauko fāzi veido bitumens.
 - d. "Bitumenam B70/100-2 Gasteļa indekss novecināšanas rezultātā mainījās minimāli"
 - e. Samazinot PMB izgatavošanas temperatūru laboratorijas apstākļos līdz 175°C un maisīšanas ātrumu līdz 6100RPM, tiek uzlabota laboratorijā izgatavotu PMB kvalitāte.
 - f. Vienas klases un ražotāja, bet dažādu partiju bitumeniem var ievērojami atšķirties funkcionālo grupu sastāvs un īpašības.
 - g. Bitumens B100/150-1 pēc novecināšanas ievērojami zaudē sveķus un tajā palielinās asfaltēnu un asfaltogēno skābju daudzums, turpretī bitumenam B70/100-2 novecināšanas rezultātā sveķu procentuālais sastāvs palielinās, bet samazinās eļļu procentuālais sastāvs.
 - h. Testēto bitumenu kritiskā temperatūra atkarīga no izejas bitumena īpašībām (t.sk. tipa, ražotāja,

- piegādes partijas), modifikatora un modifikācijas tehnoloģijas.
- i. SBS modificēts bitumens B 70/100-1.1 uzrāda augstāku kritisko temperatūru - ievērojami augstāku par SBS modificētu B 70/100-2, kas nozīmē, ka tiem ir sliktāka noturība pret zemām ekspluatācijas temperatūrām.
 - j. Bitumeni 70/100-1.2 un B 70/100-1.3, salīdzinājumā ar B 70/100-1.1, uzrādīja zemāku kritisko temperatūru, kas pierāda, ka bitumena īpašības ir atkarīgas no piegādes partijas.
 - k. Bitumens B 70/100-2 (ražotājs Nr.2) uzrādīja ievērojami labākas īpašības zemās temperatūrās, nekā citu ražotāju izejas bitumens, kā arī nezaudēja salizturības īpašības pēc īslaicīgas novecošanas, jo novecošanas rezultātā zaudēja mazāk vieglo frakciju, nekā bitumens B 100/150 1.
 - l. Zemāka SBS daudzuma – 2,0% - pievienošana kombinācijā ar sveķiem (R) un plastifikatoru P-1, salīdzinājumā ar 2.5% modifikatora pievienošanu bez piedevām, nedod gaidīto ekonomisko un ekspluatācijas īpašību uzlabojumu.
 - m. Palielināta SBS saturs – 4% - pievienošana izejas bitumenam B 100/150-1 uzrāda nozīmīgu kritiskās temperatūras uzlabojumu, tomēr tas ievērojami sadārdzina bitumenu un var negatīvi ietekmēt PMB stabilitāti.
 - n. SBS modificēti izejas bitumeni 70/100-1.2 un B 70/100-1.3 uzrādīja zemu kritisko temperatūru, kas varētu būt saistīta ar izejas bitumenu kvalitāti, kā arī PMB maisījuma izgatavošanas tehnoloģiju.
 - o. PMB bitumeni, kas izgatavoti rūpnīcā, salīdzinājumā ar laboratorijā izgatavotiem, uzrāda zemākas kritiskās temperatūras.
 - p. Bitumens B 70/100- 1.2 + 2.5% SBS-2 1.5% P-2 (izgatavots rūpnīcā) uzrādīja viszemāko kritisko temperatūru - $-41,16^{\circ}\text{C}$. PMB bitumenu B 70/100-1.2 + 2.5% SBS-2 + 1.5% P-2 un B 70/100-1.3 + 2.5% SBS-1 atšķirīgas kritiskās temperatūras norāda, ka izejas bitumena kvalitāte, SBS tips un ražotājs, kā arī piedeva (plastifikators) ietekmē PMB sastāva īpašības. Lai plašāk izpētītu šo faktoru ietekmi, nepieciešami tālāki pētījumi.
 - r. Izejas un PMB bitumeni, atbilstoši PG klasifikācijai zemām ekspluatācijas temperatūrām, piemēroti lietošanai visā Latvijas teritorijā.
9. PMB bitumena struktūra ir atkarīga no laboratorijas maisītāja maisīšanas galvas lieluma. Ar lielo maisīšanas galvu ir lielāka iespēja iegūt viendabīgāku struktūru, salīdzinot ar mazo maisīšanas galvu (izņemot nosacījumu, ka mazā galva strādā ar maksimālo intensitāti).
 10. Izgatavojot PMB ar SBS saturu 2-3%, izmantojot lielo maisīšanas galvu, neatkarīgi no rotēšanas ātruma un temperatūras, tiek iegūta dominējošā un homogēnā bitumena fāzes ar apļveidīgiem polimēra pūšļiem, kas nepārsniedz diametrā 10 μm . Izmantojot mazo maisīšanas galvu, šādu rezultātu var sasniegt tikai pie maksimāliem apgriezieniem neatkarīgi no temperatūras.
 11. PMB maisījumi ar 8% SBS polimēru uzrāda nevienmērīgu struktūru ar daudzveidīgām polimēra formām.
 12. PMB maisījumi ar 2% SBS polimēru uzrāda vienmērīgāku un viendabīgāku struktūru salīdzinājumā ar PMB ar 8% SBS polimēru.
 13. Viendabīgu PMB maisījumu ar 8% polimēra piedevu var iegūt palielinot temperatūru maisīšanas procesā virs 190°C , pie nosacījuma, ka tiek izmantota mazā maisīšanas galva ar 7000 apgriezieniem minūtē. Pie pārējiem nosacījumiem temperatūra būtiski neietekmē PMB struktūru, ja tā ir robežās no 170 līdz 196°C .
 14. Veicot bitumena mastikas izpēti, kas izgatavota, izmantojot dažādus aizpildītājus, konstatēts, ka tradicionālo aizpildītāju (dolomīta un kaļķakmens milti) īpašības atbilst "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām, bet netradicionālā aizpildītāja (pelni) granulometriskais sastāvs neatbilst "Ceļu specifikācijas 2017" prasībām, kā arī tā RV vērtība pārsniedz rekomendēto 28% - 45% robežu.
 15. Bitumena mastika ar pelniem uzrāda zemāko penetrācijas radītāju un augstāku mikstēšanas temperatūru.
 16. Mastiku homogenitātes (uzglabāšanas stabilitāti) rezultāti rāda, ka visu mastiku struktūra ir nestabila un tai raksturīga noslāņošanas.

17. Visi šajā pētījumā izmantoti aizpildītāji 20% daudzumā, salīdzinot ar izejas bitumenu B50/70, pasliktina bitumena mastikas elastīgās īpašības. Palielinoties aizpildītāja daudzumam līdz 40% visu mastiku elastīgās īpašības uzlabojas pārsniedzot izejas bitumena elastīgo atjaunošanos.
18. Bitumena mastikas ar 20% un 40% dolomīta un kaļķakmens milti nedaudz pasliktina adhēziju ar granīta šķembām salīdzinājumā ar izejas bitumenu (B50/70 – 75%; 20% dolomīts – 65%; 20 kaļķakmens – 70%; 40% dolomīts – 55%; 20% kaļķakmens – 65%).
19. Pelni ievērojami uzlabo bitumena mastikas un granīta šķembu adhēzijas īpašības (20% pelni – 94%, 20% pelni – 99%).
20. Izejas un novecinātā bitumena rišu noturības klase atbilstoši PG (*Performance grade*) sistēmai ir +64°C, kas atbilst Latvijas klimatiskiem apstākļiem (sk. 1 pētījuma kārtu). Mastikai ar 20% kaļķakmens un dolomīta miltiem rišu noturības klase ir +70°C. Savukārt mastikai ar 40% aizpildītājiem (visiem šajā pētījuma izmantotajiem) rišu noturības klase ir +76°C. Rišu noturības klase novērtēta izmantojot rišu veidošanas parametru $G^*/\sin \delta$, kuram jābūt lielākam par 1 kPa (novecinātām bitumenam) vai 2.2 kPa (novecinātām ar RTFOT vai PAV) metodi bitumenam.

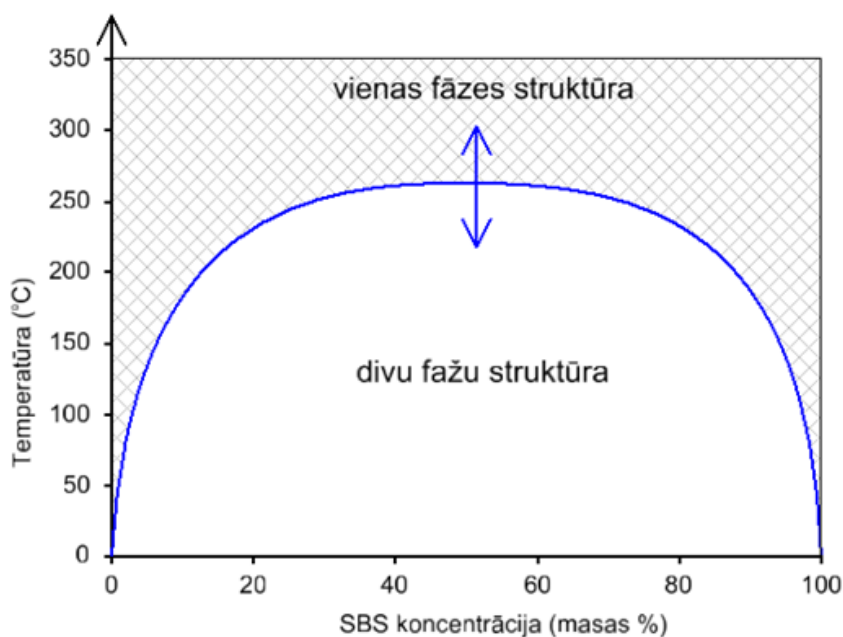
VADLĪNIJAS BITUMENA MODIFIKATORU IZVĒLEI UN TO KVALITĀTES PĀRBAUDĒM

Bitumena modifikācijai kļūstot arvien pieprasītākai, projektējot, ražojot, pārvadājot, uzglabājot un iestrādājot modificētu bitumenu, ir svarīgi izprast bitumena un polimēra fāžu sarežģīto uzvedību un mijiedarbību. Pretējā gadījumā ir jārēķinās ar iespējamām problēmām ekspluatācijas laikā un pilnvērtīgi neizmanto tu saistvielas potenciālu. Visplašāk lietotais polimērs asfalta modifikācijā ir SBS kopolimērs.

Lai arī polimērmodificēti bitumeni uzrāda uzlabotas fizikālās īpašības, to ražošana, uzglabāšana, transportēšana un iestrādāšana, salīdzinājumā ar parastajiem bitumeniem, ir sarežģītāka. SBS modificētam bitumenam ir novērojama segregācija un polimēra degredācija, kā arī nekonsekventi testēšanas rezultāti šo abu procesu ietekmē. Šīs problēmas ir saistītas ar SBS modificēta bitumena sarežģīto dabu. [25]

BITUMENA FĀZES

Pievienojot SBS uzkarstētam bitumenam, tas absorbē eļļas bitumena sastāvā un uzbriest. Uzbriešanas ātrums un apjoms ir atkarīgs no temperatūras, SBS daļiņu izmēra un formas, maisīšanas procesa un polimēra un bitumena sastāviem. Idealizēta SBS modificēta bitumena fāžu uzvedība ir attēlota 76. attēlā. Laukumā virs attēlotās līknes bitumens un SBS kopolimērs izveido vienotu fāzi, SBS izšķīstot bitumenā. Laukumā zem attēlotās līknes saistviela izveido divu fāžu struktūru ar bitumenu vai SBS kā dominējošo fāzi. Līknes novietojums ir atkarīgs no izmantotā SBS un bitumena. [25]



76. att. Idealizēta SBS modificēta bitumena fāžu struktūra [25]

Segregācija parasti notiek, kad polimērmodificētam bitumenam izveidojas divu fāžu sistēma, kā rezultātā mazāk blīvais SBS kopolimērs tiecas uzpeldēt glabāšanas tvertnes virspusē. [25]

Morfoloģijai ir liela ietekme uz saistvielas īpašībām un tā raksturo to, kā polimēra un bitumena fāzes ir izvietojušās polimērmodificētā bitumenā. SBS modificēta bitumena īpašības ir atkarīgas no tā, kā SBS daļiņas ir disperģētas bitumenā un no tā, vai SBS un bitumens veido vienotu fāzi. Ir sarežģīti izvērtēt modificēta bitumena morfoloģiju pēc tā fizikālajām īpašībām. Daudz vienkāršāk par to var spriest, izmantojot ar fluorescences mikroskopu iegūtus attēlus, kas izgaismo polimēra daļiņas uz tumša (bitumens) fona. [25]

BITUMENA UN SBS SADERĪBA

Bitumena un SBS saderībai ir liela ietekme uz SBS modificēta bitumena īpašībām. Modificējot bitumenu ar lielu asfaltēnu saturu, pastāv risks, ka SBS sacietēs. To var novērst pievienojot bitumenam eļļu. [25]

Lai minimizētu SBS modificēta bitumena segregācijas risku, ir jālieto saderīgs bitumens un polimērs. Bitumena un polimēra saderība ielā mērā ir atkarīga no bitumena stabilitātes, ko var noteikt izmantojot Gasteļa indeksu (I_c):

$$I_c = \frac{\text{piesātinātie ogļūdeņraži} + \text{asfaltēni}}{\text{sveķi} + \text{aromātiskie ogļūdeņraži}}$$

Piesātinātie ogļūdeņraži un asfaltēni ir komponentes ar attiecīgi zemāko un augstāko polaritāti un asfaltēnu šķīdība ir atkarīga no dispersijas vides, ko veido sveķi un aromātiskie ogļūdeņraži. Līdz ar to, jo augstāks Gasteļa indekss, jo zemāka kopējā bitumena sistēmas stabilitāte. [25, 26].

DEGRADĀCIJA

Nepiesātinātajam polibutadiēnam, kas atrodas SBS sastāvā, reaģējot ar skābekli, polimērā notiek ķēžu šķelšanās, kas saīsina polimēra garumu un līdz ar to pasliktina tā fizikālās īpašības. Tā kā reakcijas ātrums ir atkarīgs no temperatūras, ir vēlams minimizēt modificētā bitumena saskari ar temperatūrām virs rekomendētās robežas. Saistvielām, kas uzrāda būtiskas degradācijas pazīmes, parasti ir samazināta elastība un sliktas īpašības zemās ekspluatācijas temperatūrās.

SBS MODIFICĒTU BITUMENU RAŽOŠANA

Lai kvalitatīvi samaisītu SBS kopolimēru ar bitumenu, tiek rekomendēts trīs posmu process:

1. Pirmssadalīšanās posms - maisot bitumenu aptuveni 180 °C, tam tiek pievienots polimērs.
2. Sadalīšanās posms - maisot bitumenu un polimēru (parasti augstas bīdes dzirnavās) tiek sašķeltas polimēra daļiņas. Šķelšanās procesā var ievērojami kāpt temperatūra, tāpēc ir svarīgi pievērst pastiprinātu uzmanību maisīšanas procesam, lai temperatūra nepārsniegtu 190 °C, kas var izraisīt strauju SBS polimēra degradāciju.
3. Mērcēšanas posms - šajā posmā polimērs piebriest un iekļaujas bitumena fāzē. To parasti paveic, lietojot zemas bīdes maisīšanu.

PARAUGU SAGATAVOŠANA LABORATORIJĀ

Bitumena modifikācijai laboratorijā mērķis ir radīt saistvielu pietuvinātu ražošanas apstākļos radītam modificētam bitumenam, kas ļautu spriest par komponentu saderību un saistvielas fizikālajām īpašībām, patērējot mazāk resursu, nekā tas būtu nepieciešams bitumenu ražojot rūpnīcā.

Lai laboratorijā radītu homogēnu polimērmodificētu bitumenu ir svarīgi izvēlēties pareizus modifikācijas parametrus (temperatūru, maisīšanas ātrumu un ilgumu) un laboratorijas aprīkojumu. Pētījuma laikā uzkrātās zināšanas ļauj secināt, ka:

1. nepieciešamie maisīšanas parametri ir atkarīgi no izvēlēta bitumena un polimēra un to masas attiecības;
2. modificējot bitumenu ar SBS kopolimēru, modifikācijas temperatūra nedrīkst pārsniegt 190 °C;
3. lai iegūtu homogēnu saistvielu, ieteicams izmantot augstas bīdes mikseri.

Neskatoties uz to ir praktiski neiespējami izstrādāt universālas vadlīnijas bitumena modifikācijai laboratorijā. Parametru izvēle ir jābalsta uz iepriekš izdarītu mēģinājumu testēšanas rezultātiem un modifikācijas komponentu izpēti.

POLIMĒRMODIFICĒTA BITUMENA TESTĒŠANA

Lai pārliecinātos, ka bitumens ir piemērots modifikācijai un SBS modificētais bitumens ir pietiekami kvalitatīvs atbilstoši LVS EN 14023 standarta prasībām tiek rekomendēti sekojoši testi:

SARA frakciju noteikšana

Lai noteiktu vai bitumenam ir pietiekoši daudz vieglo frakciju un vai tas ir pietiekami stabils, lai to varētu veiksmīgi modificēt ar polimēru, jānosaka tā frakcionālais sastāvs un Gasteļa indekss, kā tas norādīts nodaļā 2.4.2.

Fluorescences mikroskopija

Polimērmodificēta bitumena morfoloģijas analizēšanai. Atbilstoši LVS EN 13632 „Bitumens un bitumena saistvielas. Polimēra dispersijas vizualizēšana ar polimēru modificētā bitumenā”.

Uzglabāšanas stabilitāte

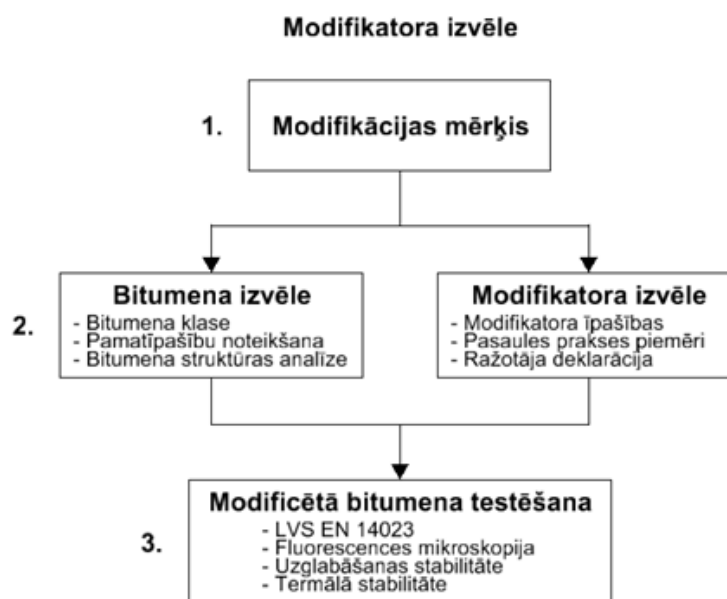
Polimērmodificēta bitumena tieksmi segregēties jātestē atbilstoši LVS EN 13399 “Bitumens un bitumena saistvielas. Modificēta bitumena uzglabāšanas stabilitātes noteikšana”.

Termālā stabilitāte

Polimērmodificēta bitumena tieksmi degradēties var analizēt, izmantojot gredzena un lodes metodi, atbilstoši LVS EN 1427:2015. Testa laikā nepieciešams noteikt mīkstēšanas temperatūru 2 paraugiem – tikko izgatavotam polimērmodificēta bitumena paraugam un paraugam, kas 3 dienas mēģenē uzglabāts atbilstoši LVS EN 13399 (nosakot vidējo mīkstēšanas temperatūru starp rezultātiem paraugam no mēģenes augšas un apakšas). Atšķirība starp svaigi modificēta bitumena mīkstēšanas temperatūru un vidējo mīkstēšanas temperatūru starp paraugiem no mēģenes augšas un apakšas nedrīkst pārsniegt 5 °C (10 °C saistvielām ar mīkstēšanas temperatūru starp 50 °C – 80 °C).

METODISKIE NORĀDĪJUMI BITUMENA MODIFIKĀTORA AKCEPĒŠANA

Ne visi modifikatori ir piemēroti ceļu bitumena modifikācijai, tāpat kā nav universāla modifikatora, kas spētu novērst visus bitumena trūkumus un uzlabot visas tā īpašības. Kvalitatīva un apstākļiem piemērota bitumena modifikatora izvēle jāveic balstoties uz labas prakses piemēriem un iepriekšējās pētījuma nodaļās apkopoto informāciju. Bitumena modifikatora izvēles shēma parādīta 77. attēlā.



77. att. Bitumena modifikatora izvēles shēma

MODIFIKĀCIJAS MĒRĶIS

Pirms bitumena un modifikatora izvēles ir skaidri jādefinē modifikācijas mērķis – asfaltbetona ekspluatācijas īpašību uzlabošana augstās un/vai zemās temperatūrās, izturības pret novecošanos paaugstināšana vai cits.

BITUMENA UN MODIFIKATORA IZVĒLE

Kad ir skaidri definēts mērķis, kuru jāsasniedz ar bitumena modifikācijas palīdzību, jāturpina ar bitumena un modifikatora izvēli. Nav stingri noteikts kādā secībā tas ir jādara, bet ieteicams sākt ar bitumena izvēli un modifikatoru piemeklēt atbilstoši bitumena īpašībām un modifikācijas mērķim.

Bitumena izvēle

Izvēloties modifikācijai piemērotu bitumenu, jāņem vērā tā klase, izcelsme, ražošanas īpatnības un ražotāja norādītās materiāla īpašības, ņemot vērā modificēta bitumena mērķa klasi un modifikācijas mērķi kopumā. Lai varētu izvēlēties piemērotu modifikatoru, bitumenam jānosaka pamatīpašības un SARA frakcijas. Ņemot vērā, ka vienas klases un tā paša ražotāja divu dažādu partiju bitumenu īpašības var atšķirties, pamatīpašības un SARA frakcijas jānosaka katrai iegādātajai bitumena partijai.

Modifikatora izvēle

Kad ir zināmas bitumena pamatīpašības un tā frakcionālais sastāvs, jāpiemeklē modifikācijas mērķa sasniegšanai piemērots un ar bitumenu saderīgs modifikators. Izvēloties modifikatoru, jāņem vērā tā īpašības un pasaules prakses piemēri. 1. tabulā ir apkopoti bitumena modificēšanai lietoto polimēru īpašības, bet ar bitumenu modifikācijas piemēriem ražotājs var iepazīties šajā pētījumā, pētot citu literatūru par šo tēmu vai pieredzes apmaiņas procesā ar citiem ražotājiem.

Modifikatoram jābūt marķētam ar CE marķējumu, bet, ja tāds nav, jāpārbauda tā atbilstība ražotāja deklarācijai, veicot dokumentu pārbaudi un organoleptisku materiāla pārbaudi katrai piegādes partijai.

MODIFICĒTĀ BITUMENA TESTĒŠANA

Modificētam bitumenam jāatbilst standartam LVS EN 14023 „Bitumens un bitumena saistvielas. Pamatnoteikumi ar polimēriem modificēto bitumenu specifikēšanai”, kas nosaka prasības un testēšanas metodes modificēta bitumena atbilstības novērtēšanai un sevī ietver sekojošu bitumena īpašību pārbaudi:

1. konsistenci vidējās darba temperatūrās;
2. konsistenci palielinātās darba temperatūrās;
3. trauslumu zemās temperatūrās;
4. kohēziju;
5. ilgizturību;
6. elastīgo atjaunošanos;
7. citas informatīvās īpašības.

Papildus standartā LVS EN 14023 norādītajām prasībām modificēta bitumena kvalitātes noteikšanai ieteicams:

1. analizēt bitumena morfoloģiju atbilstoši LVS EN 13632 „Bitumens un bitumena saistvielas. Polimēra dispersijas vizualizēšana ar polimēru modificētā bitumenā”;
2. analizēt polimērmodificēta bitumena tieksmi segregēties atbilstoši LVS EN 13399 “Bitumens un bitumena saistvielas. Modificēta bitumena uzglabāšanas stabilitātes noteikšana” (minēts arī standartā LVS EN 14023);
3. analizēt polimērmodificēta bitumena tieksmi degradēties, izmantojot, piemēram, FTIR (*Fourier Transform Infrared*) spektroskopiju vai/un novērtējot pamatīpašību izmaiņas PMB “svaigam” un PMB novecinātām bitumenam.

REKOMENDĀCIJAS

"Ceļu specifkācijas 2017" jāiekļauj prasību par bitumena struktūras testēšanu ar fluorescences mikroskopijas metodi. Pamatojums šīs prasības iekļaušanai ir krasi atšķirīgas struktūras (morfoloģijas) rezultāti laboratorijā un ražotnē izgatavotiem PMB. Kritērijs atbilstības novērtēšanai ir PMB struktūras atbilstība LVS EN 13632 standarta prasībām.

Tā kā vairāki izejas bitumēni un PMB neatbilst Frasa trausluma temperatūras prasībām ("Ceļu specifkācijas 2017" 6.2-11), bet uzrāda zemas kritiskās temperatūras un ir, atbilstoši PG sistēmai, piemēroti lietošanai Latvijas teritorijā, rekomendējamā Frasa trausluma temperatūra ir samazināma līdz $\leq -12^{\circ}\text{C}$.

"Ceļu specifkācijas 2017" 6.2-10 tabulā iekļaut sausā sablīvētā aizpildītāja porainību noteiktu atbilstoši LVS EN 1097-4. Rekomendējamā porainības kategorija atbilstoši LVS EN 13043 - RV 28-45.

LITERATŪRA

1. Becker, Y., Méndez, M., P., Rodríguez, Y., Polymer modified asphalt. *Vision Tecnológica*. 2001, vol. 9, no. 1, pp. 39-50. Available from: <http://www.easphalt.com/ingles/venezuela.pdf>
2. Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N., Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*. 2014, vol. 54, pp. 18-38. ISSN 0014-3057. Available from: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>
3. Bart Pursel. *Recyclable thermoset plastics IST 110: Introduction to Information Sciences and Technology*. 2015.
4. S.S.Galooyak, B.Dabir, A.E. Nazarbeygi, A.Moeini. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonitecomposites. *Construction and Building Materials* 2010; 24(3):300-307.
5. M.C.C.Lucena, S.A.Soaes, J.B.Soaes. Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt. *Materials Research Ibero-american Journal of Materials* 2004;7(4):529-534.
6. M. Ameri, A. Mansourian, A.H.Sheikhmotevali. Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumensand mixtures based upon performance related parameters. *Construction and Building Materials* 2013; 40:438-447.
7. J.S.Chen, M.C.Liao, M.S.Shiah. Asphalt modified by styrene-butadiene-styrene triblock copolymer: Morphology and model. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2002; 14(3):224-229.
8. Yildirim, Y., Polymer modification asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2007, vol. 21, no. 1, pp. 66-72. ISSN 0950-0618. Available from: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>
9. L.Zanzotto, J.Stastna, O.Vacin. Thermomechanical properties of several polymer modified asphalts. *Applied Rheology* 2000; 10(3):134-144.
10. Q.Wang, M.Liao, Y.Wang, Y.Ren. Characterization of end-functionalized styrene-butadiene-styrene copolymers and their application in modified asphalt. *Journal of Applied Polymer Science* 2007; 103(1):8-16.

11. M.Jasso, D.Bakos, D.MacLeod, L.Zanzotto. Preparation and properties of conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite clay. *Construction and Building Materials* 2013; 38:759-765.
12. Lesueur, D., The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009, vol. 145, no. 1 - 2, pp. 42-82. ISSN 0001-8686. Available from: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>.
13. NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. Washington, D. C.:Transportation Research Board, 2011. 274 pp. ISBN: 978-0-309-15564-9. ISSN 0077-5614. Available from: doi: 10.17226/14524
14. E.Prockāns. Performance Grade (PG) Bitumena Pielietojums Latvijā. Bakalaura darbs. RTU. Transportbūvju institūts. Ceļu un Tiltu katedra. (darba vad. V. Haritonovs) 2014. gads
15. Błażejowski, K., Olszacki, J., Peciakowski, H., Bitumen Handbook [online]. Płock, Poland: ORLEN Asfalt sp. z o.o., 2014 [viewed 20 December 2016]. Available from: <http://www.ornenasfalt.pl/PL/InformacjeTechniczne/PortalWiedzy/Documents/flipbook/2014-PAEN/files/assets/basic-html/page1.html>
16. Nam H. Tran, P.E., LEED GA, Adam Taylor, P.E. Richard Willis. EFFECT OF REJUVENATOR ON PERFORMANCE PROPERTIES OF HMA MIXTURES WITH HIGH RAP AND RAS CONTENTS. National Center for Asphalt Technology (NCAT). June 2012.
17. Carpenter, S., and J. Wolosick. "Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material," *Transportation Research Record* 777, TRB, Washington, DC, 1980, pp. 15-22.
18. Kadar, P. "Field and Laboratory Properties of Recycled Asphalt Pavement," *AsphaltReview*, Australia, 1996, pp. 9-12.
19. Potter, J., and J. Mercer. "Full-Scale Performance Trials and Accelerated Testing of Hot - Mix Recycling in the UK." *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, International Society for Asphalt Pavements, Seattle, 1997, 593-607.
20. Tam, K., P. Joseph, and D. Lynch. "Five-year experience of low-temperature performance of recycled hot mix," *Transportation Research Record* 1362, TRB, Washington, DC, 1992, pp. 56-65.
21. Karlsson, R. and U. Isacsson. "Investigations on Bitumen Rejuvenator Diffusion and Structural Stability," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.72, AAPT, Lino Lakes, MN, 2003, pp. 463-501.
22. Karlsson, R., and U. Isacsson. "Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, ASCE, 2003.
23. S. Nahar, J. Qiu, A. Schmetts, E. Schlangen, M. Shirazi, M. van de Ven, G. Schitter and A. Scarpas. Turning Back Time: Rheological and Microstructural Assessment of Rejuvenated Bitumen. 93th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2014, Washington, D.C.
24. J. Qiu, E. Schlangen, M.F.C. van de Ven and M. Shirazi. REINTRODUCING THE INTRINSIC SELF-HEALING PROPERTIES IN RECLAIMED ASPHALT BY REJUVENATION. ICSHM 2013: *Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials*. pp. 498-501.
25. Oliver J., Khoo K. Y., Ensuring the quality of SBS modified binders. In: 25th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes, Perth, Australia 2012
26. Paliukaitė, M., Vaitkus, A., Zofka, A., Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. In: The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING", Vilnius, Lithuania, 22. – 23. May 2014. 7 pp. eISSN 2029-7092. eISBN 978-609-457-640-9 Available from: leidykla.vgtu.lt/conferences/ENVIRO_2014/Articles/4/162_Paliukaite.pdf.

