



SIA "INŽENIERBŪVE"

PĒTĪJUMA

BITUMENA FUNKCIONĀLO GRUPU UN
MODIFICĒJOŠO PIEDEVU IETEKMES IZPĒTE UZ
ASFALTBETONA KOMPOZĪTU
STRUKTŪRVEIDOŠANĀS PROCESIEM UN ILGMŪŽĪBU.

ATSKAITE

Rīga, 2015. gads 9. decembris

Apstiprinu, 09. 12. 2015		
(vārds, uzvārds, paraksts)		
Pētniecības projekta nosaukums Bitumena funkcionālo grupu un modificējošo piedevu ietekmes izpēte uz asfaltbetona kompozītu struktūrveidošanās procesiem un ilgmūžību.		
Līguma numurs	Līgums Nr. LVC2014/1.10/5/AC	
Līguma slēgšanas datums	29. 08. 2014	
Pētniecības projekta stadija	Atskaite (100%)	
Starpziņojumu kopējais skaits	3 starpziņojumi un 1 gala atskaite	
Ziņojuma nodošanas datums	09. 12. 2015	
Pētniecības projekta izstrādes periods	01. 06. 2014 – 09. 12. 2015	
Lappušu skaits	143	
Disks vai cits datu nesējs (ir/nav)	ir	
Eksemplāru skaits	1	
JAUNU TEHNOLOĢIJU IZPĒTES PROGRAMMA 2014. - 2016. GADAM		
Pētniecības projekta izpildītāji	Vārds, Uzvārds	Paraksts
Pētniecības projekta vadītājs	Viktors Haritonovs	
Pētnieks	Inna Klasa	
Projektu finansē	VAS "Latvijas Valsts ceļi"/Satiksmes ministrija	
Īss apraksts Ceļu bitumena zemā kvalitāte ir viens no priekšlaicīgas ceļa segumu pirmstermiņa bojājuma iemesliem. Nemodificētiem bitumeniem nepiemīt apmierinošas stiprības un deformatīvās īpašības, kas pastāvīgi pieaugošās satiksmes intensitātes un transporta slodzes apstākļos noved pie seguma kalpošanas laika samazinājuma un biežiem remontdarbiem. Asfaltbetona seguma ražošanas un ekspluatācijas laikā bitumens novecojas, kas veicina bitumena deformatīvo un adhēzijas īpašību samazinājumu. Polimēru piedevu ievadīšana bitumenā ļauj ievērojami uzlabot bitumena īpašības. Tomēr, atkarībā no polimēra ķīmiskās uzbūves un bitumena funkcionālo grupu sastāva, <i>modifikācija ne vienmēr var novest pie pozitīvā rezultāta.</i> Pētījuma projekta pirmajā posmā (1. starpziņojuma) ietvaros tika analizētas bitumena fizikālās, ķīmiskās un fizikāli –ķīmiskās īpašības. Fizikālo un fizikāli ķīmisko īpašību noteikšanai izmantotas standarta testēšanas metodes – LVS EN 12591 nemodificēto bitumenu testiem un LVS EN 14023 modificēto bitumenu testiem. Analizēts SBS modifikatora ietekmes efekts atkarībā no bāzes bitumena un modifikatora īpašībām. Analizētas bitumena funkcionālo grupu noteikšanas progresīvākās (viegli realizējamas) testēšanas metodes, ka arī metodes modifikatora un bitumena mijiedarbības novērtējumam. Šajā pētījuma etapā sešiem nemodificētiem ceļa bitumeniem noteiktas pamatīpašības, kā arī veikta šo bitumenu modifikācija, izmantojot dažādas izcelsmes SBS tipa polimēru u.c. modifikatorus. Iegūtie rezultāti rāda, ka polimērmodificētā bitumena īpašības 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, iegūst modificētus bitumenus ar krasi atšķirīgiem uzglabāšanas stabilitātes rādītājiem. Pētījuma projekta otrajā posmā (2. starpziņojuma) ietvaros tika analizēta <i>Performance Grade (PG)</i> sistēmas piemērotība Latvijas apstākļiem, kā arī izveidota bitumena PG klašu karte. Šajā etapā veikta bitumena un polimērmateriāla termostabilitātes un uzglabāšanas stabilitātes izpēte agresīvākos apstākļos salīdzinājumā ar testēšanas standartu prasībām. Konstatēts, ka nemodificētā bitumena B 70/100 un SBS-1 modifikatora kombinācija uzrāda augstu uzglabāšanas stabilitāti agresīvākos testēšanas apstākļos. Šajā etapā aprobēta (veikti pirmie eksperimenti) atomspēka mikroskopa (AFM) metode bitumena funkcionālo grupu noteikšanai, termostabilitātes un uzglabāšanas stabilitātes izpētei. Pētījuma projekta trešajā posmā (3. starpziņojuma) ietvaros ATM metodei izvēlēts piemērots pārtraukta kontakta metodes darbības režīms (novērsta problēma saistīta ar adata piesārņojumu). Iegūtas augstas izšķirtspējas bildes un veikta bitumena termostabilitātes analīze. Šajā etapā analizēta un aprobēta adhēzijas noteikšanas metode vidējā temperatūrā – tuvināti ceļa seguma ekspluatācijas apstākļiem. Veikts izvēlētas metodes salīdzinājums ar Latvijā plaši izmantoto metodi adhēzijas starp minerālmateriālu un bitumenu novērtēšanai. Šajā etapā analizēta bitumena modifikācija ar oligomēriem, kā arī polimēru sintēzi bitumena dispersa vidē. Konstatētas vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionāliem modifikācijas veidiem. Pētījuma projekta pēdējā posmā (4. starpziņojuma – gala atskaites) ietvaros ar ATM metodi turpināta bitumena struktūras izpēte. Šajā etapā veikta bitumena un minerālmateriālu adhēzijas īpašību izpēte. Noteikta tradicionālo – vizuālo adhēzijas novērtēšanas metožu priekšrocības un trūkumi. Sniegtas rekomendācijas tradicionālo metožu pilnveidošanai. Veikta asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašību izpēte ar novecinātiem, nenovecinātiem, stabiliem un nestabiliem PMB bitumeniem. Eksperimentāli asfaltbetona maisījumiem ar dažādas izcelsmes SBS modifikatoriem modificētu bitumenu noteikti elastības moduļi 0°C, 20 °C un 50 °C temperatūrā.		
Pielietojums/pētījuma sfēra	Autoceļu būvniecība/Ceļu būvmateriāli	
Papildus izstrādātie materiāli	Zinātniskās publikācijas un rekomendācijas	

SATURS

SATURS	3
1. IEVADS.....	5
2. PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI	6
3. BITUMENA STRUKTŪRA	8
4. METODES BITUMENA FUNKCIONĀLO GRUPU PROCENTUĀLĀ SATURA NOTEIKŠANAI	16
4.1. Plānā slāņa hromatogrāfija (TLC)	16
4.2. Liesmas jonizācijas detektors (FID)	17
4.3. Diferenciālā skenēšanas kolorimetrija (DSC).....	19
4.4. Atomspēku mikroskops (AFM)	21
4.5. Infrasarkanā spektroskopija	25
4.6. Mazleņķa neitronu izkliedēšana ar atgriezenisku griešanu.....	26
4.7. Apkopojums un secinājumi par 4. nodaļu.....	27
5. MODIFIKATORA IETEKME UZ PMB ĪPAŠĪBĀM	29
5.1. Polimēra daudzuma ietekme uz PMB īpašībām	29
5.2. Bitumena un PMB strukturāli reoloģiskie parametri	35
5.3. Polimēra uzbūves ietekme uz PMB īpašībām.....	36
5.4. PMB struktūras ietekme uz adhēzijas īpašībām.....	39
5.5. Oksidēta bitumena modifikācijas komponentiem mijiedarbojoties dispersā vidē	40
5.5.1. Epoksīdsveķu sacietēšanās bitumena dispersā vidē.....	40
5.5.2. Polimēru sintēze bitumena dispersā vidē	44
5.6. Modificēta bitumena termostabilitāte, novecošanas izpēte un analīze	44
5.7. Apkopojums un secinājumi par 5. nodaļu.....	48
6. PERFORMANCE GRADE BITUMENU KLASIFIKĀCIJAS SISTĒMA	50
6.1. Penetrācijas klasifikācijas sistēma	50
6.2. Viskozitātes klasifikācijas sistēma.....	52
6.2.1. Strategic Highway Research Program	55
6.2.2. PG klasifikācijas sistēmas raksturojums	55

6.2.3. PG nomenklatūra	56
6.2.4. PG testēšanas paņēmieni.....	57
6.3. PG specifikācijas.....	64
6.4. PG sistēma Latvijā	67
6.4.1. Latvijas klimats	67
6.4.2. Seguma temperatūras noteikšana	67
6.4.3. Bitumena klašu izvēle	71
6.5. Latvijas iedalīšana klimata zonas.....	72
6.6. Apkopojums un secinājumi par 6. nodaļu.....	74
7. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	75
7.1. Eksperimentu plāns.....	75
7.2. Nemodificēto bāzes bitumenu īpašības.....	76
7.3. Modificēto bitumenu īpašības.....	80
7.4. Nemodificētā un modificētā bitumena struktūras izpēte ar atomspēka mikroskopu (AFM)	89
7.4.1. Nepārtraukta kontakta metode	89
7.4.2. Pārtraukta kontakta metode.....	93
7.5. Bitumena un minerālmateriāla adhēzija.....	111
7.6. Apkopojums un secinājumi par 7. nodaļu.....	122
8. NOVECINĀTO UN NENOVECINĀTO MODIFICĒTO BITUMENU IETEKME UZ ASFALTBETONA SASTĀVU EKSPLOATĀCIJAS ĪPAŠĪBĀM	126
8.1. Izejmateriālu īpašības.....	126
8.2. Asfaltbetona sastāvu īpašības	128
8.3. Apkopojums un secinājumi par 8. nodaļu.....	134
GALVENIE SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS.....	135
TURPMĀKIE IESPĒJAMIE PĒTĪJUMA VIRZIENI	138
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	139

1. IEVADS

Mūsdienās autoceļu kvalitāte un ilgmūžība ir aktuāli jautājumi visā pasaulē, jo ceļu stāvoklis ir valsts attīstības rādītājs. Galvenais faktors, kas ietekmē asfalta seguma darbību un ilgmūžību, ir ceļa bitumens, jo ceļu bitumena zema kvalitāte ir viens no priekšlaicīgas ceļa segumu pirmstermiņa bojājuma iemesliem. Tā struktūra, funkcionālo grupu sastāvs, mehāniskās un ķīmiskās īpašības nosaka visa asfalta maisījuma darbību.

Tā kā pēdējo 20 gadu laikā strauji pieaug transportlīdzekļu daudzums un to intensitāte uz autoceļiem, tika novērota straujāka asfalta novecošanas un sabrukums pieaugušas slodzes dēļ. Lai būtu iespēja garantēt labāku un ilgāku asfalta darbību, modificējošas piedevas tika rādītās un pievienotas asfalta maisījumam. Modificētu bitumenu pārbaudes testi sniedz pozitīvus rezultātus un ievērojamus īpašību uzlabojumus salīdzinājumā ar bitumeniem bez piedevām. Šis ir noteicošais faktors augošai polimērmodificētu bitumenu pielietošanai. Pēc statistikas 2002. gadā, Vācijā, polimērmodificēto bitumena izmantošana ceļu būvniecībā bija 13,9%, 2008. gadā – jau 18,2%. [1]

Nemodificētiem bitumeniem nepiemīt apmierinošās stiprības un deformatīvās īpašības, kas pastāvīgi pieaugošās satiksmes intensitātes un transporta slodzes apstākļos noved pie seguma kalpošanas laika samazinājuma un biežiem remontdarbiem. Asfaltbetona seguma ražošanas un ekspluatācijas laikā bitumens novecojas, kas veicina bitumena deformatīvo un adhēzijas īpašību samazinājumu. Polimēru piedevu ievadīšana bitumenā ļauj ievērojami uzlabot bitumena īpašības. Tomēr, atkarībā no polimēra ķīmiskās uzbūves un bitumena funkcionālo grupu sastāva, *modifikācija ne vienmēr var novest pie pozitīvā rezultāta.*

Polimēr- modificēta bitumena funkcionalitāte ir atkarīga no bitumena un polimēra savietojamības, t.i., no tendences neatdalīties uzturēšanas periodā [2]. Tāpēc jānosaka modifikatora ietekmes efektu atkarībā no bitumena un modifikatora ķīmiskās uzbūves. Savietojamību var noteikt ar morfoloģijas (mikroskopijas) testiem un uzturēšanas stabilitātes testiem [2].

Līdz ar to, lai radītu ilgmūžīgu polimērm modificētu (PMB) bitumenu, ir nepieciešams veikt komplekso izpēti, novērtējot polimēra ķīmiskās uzbūves ietekmi uz bitumena dispersās sistēmas izmaiņu. Šobrīd, lai izpētītu PMB bitumenu īpašības, izmanto standarta metodes: adatas penetrācija, stiepjamība (duktilitāte, elastīgā atjaunošanās), mīkstēšanās un trausluma temperatūras, utt. Tomēr šīs metodes nesniedz pilnu informāciju par PMB īpašībām. Objektīvās informācijas iegūšanai nepieciešams novērtēt bitumena dispersās struktūras izmaiņu pēc dažādas izcelsmes un ķīmiskā sastāva polimēru ievadīšanas. Līdz ar to bitumena fizikālo un fizikāli – ķīmisko īpašību izpēte tiks izmantotas sekojošas izpētes metodes:

1. Strukturāli – reoloģiskās metodes, kuras ļauj noteikt bitumena reoloģiskus raksturlielumus (mainot temperatūras) bīdes deformācijas iedarbības rezultātā. Nevērtēt PMB bitumena termodinamiskās (novecošanas) īpašības. Noteikt optimālu PMB sastāvu un daudzumu bitumena modifikācijai, kā arī nepieciešamību pievienot plastifikātorus (vieglas frakcijas – eļļas salizturības nodrošināšanai) un adhēzijas piedevas termoizturīgas PMB dispersās sistēmas radīšanai. Rezultātā tas ļauj iegūt un prognozēt PMB bitumena īpašības ārējo faktoru iedarbības rezultātu.
2. Fizikāli – ķīmiskās metodes. DTA (diferenciāli termiskā analīze) bitumena termostabilitātes noteikšanai. KMR (kodolmagnētiskā rezonanse) un infrasarkanās spektroskopijas metode bitumena (asfaltēnu) ar polimēru vai/un adhēzijas piedevu ķīmiskās mijiedarbības izvērtēšanai. Washburna metode bitumena funkcionālu grupu un polimēra starpfāžu mijiedarbības noteikšanai.

2. PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Mērķis ir noteikt bitumena funkcionālo grupu un modificējošo piedevu ietekmi uz bitumena fizikālām mehāniskām un novecošanās īpašībām, kā arī uz asfaltbetona ilgmūžību.

Darba uzdevumi

1. Saistvielu īpašības:

- 1.1. Noteikt naftas bitumenu funkcionālo grupu sastāvu (asfaltēni, sveķi, eļļas);
- 1.2. Veikt naftas bitumenu struktūras veidošanās procesu un dispersās sistēmas termostabilitātes izpēti (novecošanās izpēte un analīze);
- 1.3. Veikt naftas bitumena dispersās sistēmas struktūras izmaiņu izvērtējumu pēc modifikatora pievienošanas;
- 1.4. Noteikt modificētā bitumena termostabilitāti (novecošanās izpēte un analīze);
- 1.5. Noteikt modifikatora ietekmes efektu (īpašību izmaiņas) atkarībā no bitumena un modifikatora ķīmiskās uzbūves;
- 1.6. Noteikt modificēto bitumenu un dažāda mineraloģiskā sastāva minerālmateriālu adhēzijas īpašības;
- 1.7. Piedāvāt metodi, ar kuras palīdzību varētu noteikt adhēziju objektīvāk nekā līdz šim lietotā vizuālā paraugu novērtēšana;
2. Asfalta sastāvu īpašības:
 - 2.1. Noteikt modificēto bitumenu ietekmi uz asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašībām (risu, noguruma un termoplaису noturību) pirms un pēc novecošanas;
 - 2.2. Noteikt polimērmodificētā bitumena (dažādu modifikatoru) ietekmi uz bituminētā maisījuma elastības moduļu vērtībām;
 - 2.3. Izpētīt Superpave ietvaros izstrādātas Performance Grade bitumenu klasifikācijas sistēmu piemērotību Latvijas apstākļiem.

3. BITUMENA STRUKTŪRA

Pasaulē izmanto ceļa bitumenu iegūtus no dažādiem naftas avotiem. Bitumena kā naftas pārstrādes atlikuma daudzums un īpašības ir atkarīgas no naftas īpašībām, savukārt naftas īpašības lielā mērā ir atkarīgas no tās ieguves vietas. Bitumens (t. sk. nafta) sastāv no vairākiem ogļūdeņraža savienojumiem ar dažādu molekulāru masu. Šos savienojumus sauc par **bitumena funkcionālām grupām**, jo to daudzums un attiecība nosaka ceļu bitumena īpašības augstas, vidējās un zemās ekspluatācijas temperatūrās. Bitumena ķīmisko elementu sastāvā ietilpst: 80-85% ogleklis (C), 10-15% ogļūdeņradis (H), 0.1-2% slāpeklis (N), 0.1-1.5% skābeklis (O), 0.5-7% sērs (S), kā arī neliela daudzuma vairāki metāli. Tapāt bitumenā sastāvā ir neliels daudzums minerālu piemaisījumu (smilts, māls), minerālie sāļi (kalcijs un magnija hlorīds), kā arī pelni. 1. tabulā ir dots naftas pārstrādes atlikumu daudzuma salīdzinājums atkarībā no naftas izcelsmes.

Tabula 1

Dažādu naftu destilācijas procesā iegūtie atlikumi [3]

Naftas izcelsme	Atlikuma daudzums, %
ASV (Kalifornijas ielēja Kern)	66
Venecuēla	58
ASV (Kalifornijas piekraste Hondo)	48
Aļaska	31
Arābijas smagā nafta	27
Nigērijas vieglā nafta	1
Krievija	~ 30

Pēc sēra satura bitumenu (naftas) iedala:

- ar zemu sēra saturu līdz 0,6%;
- sēru saturoši 0,61-1,80%;
- augsts sēra saturs 1,81-3,50%;
- īpaši skābs > 3.50%.

Sērs ir nevēlamā komponente bitumena sastāvā, tāpēc to saturs ir stingri reglamentēts (ierobežots). Kā galvenais iemesls jāmin tas, ka naftas pārstrādes rezultātā, kā arī asfaltbetona ražošanas procesā var veidoties videi bīstams sēra

savienojums SO_2 . Gadījumos, kad tiek veikta naftas pārstrāde ar augstu sēra saturu. jāizmanto „zaļās” tehnoloģijas, lai minimizēt SO_2 saturu, kas ievērojami sadārdzina naftas pārstrādes gala produkta (bitumena, degvielas) cenu. Līdz ar to naftas ar lielu sēra saturu tiek klasificētas kā nekvalitatīvas.

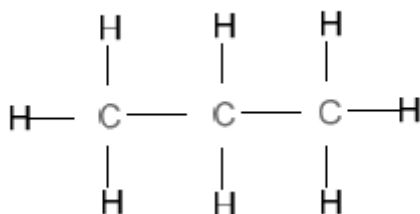
Dabiskās naftas ogļūdeņraži sastāv no šādām galvenajām grupām:

- alkāniem (parafīna ogļūdeņraži) 15-60%;
- cikliskie alifātiskie ogļūdeņraži (naftēni) 30-60%;
- aromātiskie ogļūdeņraži 3-50%.

Naftas pārstrādes procesā iegūst arī citus ogļūdeņražus:

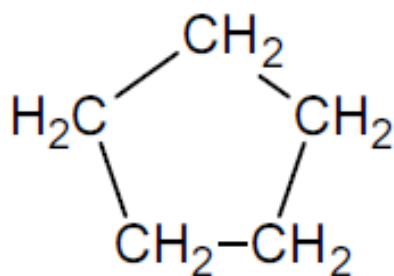
- olefīni;
- alkēni.

Vienkāršāka struktūra no visām bitumena (naftas) ogļūdeņraža grupām ir **parafīnu ogļūdeņražiem** (sk. 1. att.). Šajā savienojumā oglekļa atomiem ir vienkāršas savstarpējas saites, savukārt no pārējām pusēm oglekļa atomi savienojas (piesātinās) ar ūdeņraža atomiem. Parafīnu ķīmiskā formula ir $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.



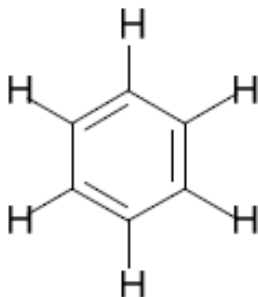
1. att. Parafīnu ogļūdeņražu struktūra

Naftēniem (alicycliskiem savienojumiem) ir piesātināto ciklisko ogļūdeņraža ķēžu struktūra. Šī struktūra ir lokveida un slēgta ar vairākiem gredzena posmiem (sk. 2. att.). Naftēnu ķīmiskā formula ir C_nH_{2n} .



2. att. Naftēnu ogļūdeņražu struktūra

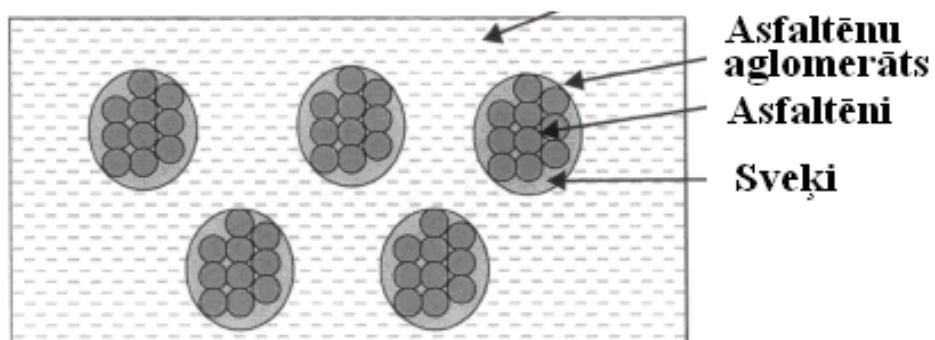
Aromātiskajiem ogļūdeņražiem ir nepiesātināta, lokveida struktūra, kuru veido sešu pamata oglekļa atomu gredzens, kurš savienots ar ūdeņraža atomiem, kā arī savienojums ar katra oglekļa loka ķēdes atomu. Aromātisko ogļūdeņražu ķīmiskā formula ir C_nH_{2n-6} . Šī ogļūdeņraža īpašības krasi atšķiras no naftēnu un parafīnu ogļūdeņražiem (sk. 3. att.).



3. att. Aromātisko ogļūdeņražu struktūra

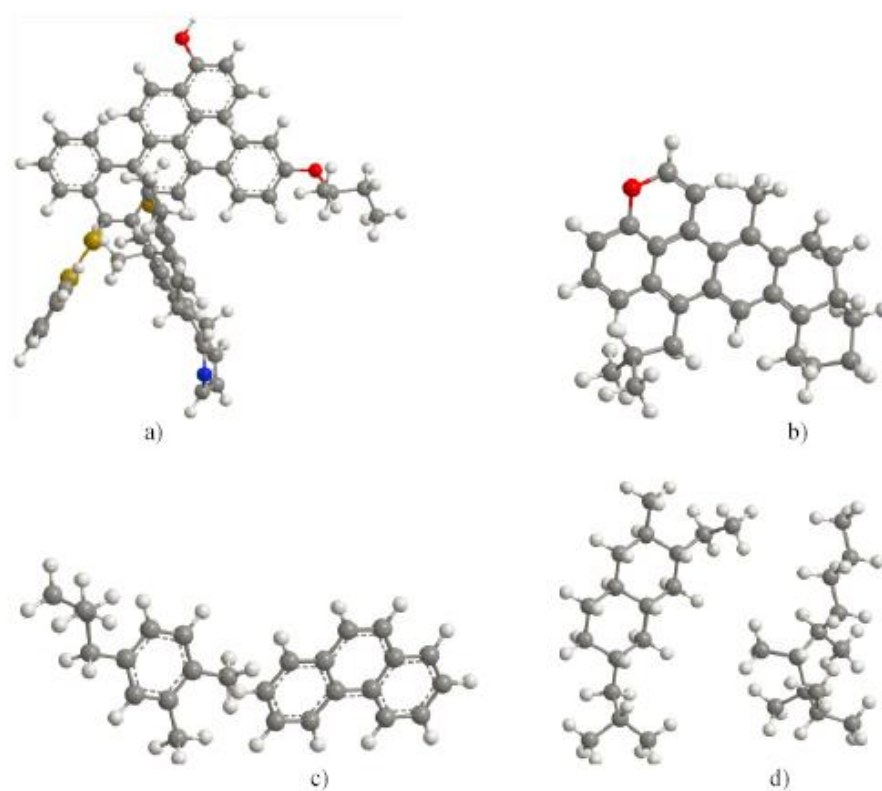
Bitumens ir koloidālā sistēma, kas sastāv no maltēniem (sveķi, aromātiski, piesātināto taukskābju) un asfaltēniem (sk. 4. att.). Svarīgākas bitumena koloidālās sistēmas komponentes ir asfaltēni, kuru daudzums un mijiedarbība ar sveķiem un eļļām (aromātiskie un piesātinātie ogļūdeņraži) nosaka bitumena reoloģiskās īpašības.

Piesātinātie un aromātiskie ogļūdeņraži



4. att. Bitumena struktūra

5. attēlā attēlotas bitumena funkcionālo grupu struktūras.



5. att. Bitumena funkcionālo grupu struktūra.

a) asfaltēni; b) sveķi; c) aromātiskie ogļūdeņraži; d) piesātināti ogļūdeņraži.

Asfaltēni ir augstmolekulāri naftas pārstrādes atlikumi. Tie pēc būtības ir hidrofobi un satur aktīvās karbonil-, karboksil un merkaptogrupas, kas tiem piedod skābu raksturu. Asfaltēni ir stingri sakārtoti agregāti, kurus veido plāksņveida elementi (5-8 dažādu ciklu fragmenti, kas savstarpēji saistīti ar metilēntiltiņu (-CH₂-) vai heteroatomiem), ar palielinātu polaritāti, t.i., tie var absorbēt polārus savienojumus. Asfaltēnu vidēja molekulārā masa ir 1000 – 5000 g/mol. Asfaltēnu šķīdības rādītājs ir starp 17 – 22 MPa^{0.5}, to blīvums 20°C temperatūrā ir ap 1,15g/cm³ un H/C ir 0,98 – 1,56.

Sveķi ir ķīmiski līdzīgi asfaltēniem. Tā ir polārā bitumena komponente. Bitumena koloidālā struktūrā tie aptver asfaltēnus, neļaujot tiem salipt. Sveķi veido pāreju (tiltu) no asfaltēniem uz eļļām (aromātiskiem un piesātinātiem ogļūdeņražiem). Istabas temperatūrā tie ir cieti vai puscieti, plūstoši (šķidri) augstā temperatūrā un cieti (trausli) zemā temperatūrā. Sveķu vidēja molekulārā masa ir 300 – 2000 g/mol. Sveķu šķīdības rādītājs ir starp 18 – 20 MPa^{0.5}, to blīvums 20°C temperatūrā ir ap 1,07g/cm³ un H/C ir 0,6 – 0,9.

Aromātiskie ogļūdeņraži ir tumšs viskozs šķidrums, kurš aizpilda bitumena koloidālās sistēmas vidi, jo to daudzums bitumenā ir 30 - 45%. Sveķu vidēja molekulārā masa ir 300 – 2000 g/mol. Aromātisko ogļūdeņražu šķīdības rādītājs ir starp 17 – 18,5 MPa^{0.5}, to blīvums 20°C temperatūrā ir ap 1,00g/cm³ un H/C ir 0,5 – 0,6.

Piesātinātie ogļūdeņraži ir bezkrāsaina, šķidra vai vidēji viskozā viela, un darbojas kā aromātiskās ogļūdeņraža koloidālās sistēmas vides atšķaidītājs. Šai komponentei ir viszemākā molekulārā masa 600g/mol un polaritāte. Šīs komponentes struktūru veido taisnas un sazarotas ķēdes. Piesātināto ogļūdeņražu šķīdības rādītājs ir starp 15 – 17 MPa^{0.5}, un to blīvums 20°C temperatūrā ir ap 0,9g/cm³.

Sakarības starp bitumena funkcionālām grupām un fizikālām un mehāniskām īpašībām noteikšanai izmanto Gaesteļa indeksu (Gaestel index) I_c . Šo parametru izmanto bitumena koloidālās sistēmas stabilitātes noteikšanai un aprēķina pēc sekojošās formulas:

$$I_c = \frac{\text{Piesātināti ogļūdeņraži} + \text{Asfaltēni}}{\text{Sveķi} + \text{Aromātiskie ogļūdeņraži}}$$

Piesātināti ogļūdeņraži ir bitumena sastāva visneaktīvākā komponente, savukārt asfaltēni ir bitumena struktūras visaktīvākā komponente. Asfaltēnu izšķīšanu koloidālā sistēmā veicina vidēji polāru komponentu – aromātisko ogļūdeņražu un sveķu klātbūtne. Līdz ar to jo augstāks ir Gasteļa indekss, jo nestabilākā ir bitumena sistēma. Bitumena koloidālās sistēmas klasifikācija pēc stabilitātes indeksa I_c ir dota 2. tabulā.

Tabula 2

Bitumena koloidālās sistēmas klasifikācija pēc stabilitātes indeksa I_c

I_c	0.22 – 0.5	> 0.5	< 0.22
Bitumena stāvoklis	Stabila sistēma	Bitumens kļūst cietāks	Bitumens kļūst mīkstāks

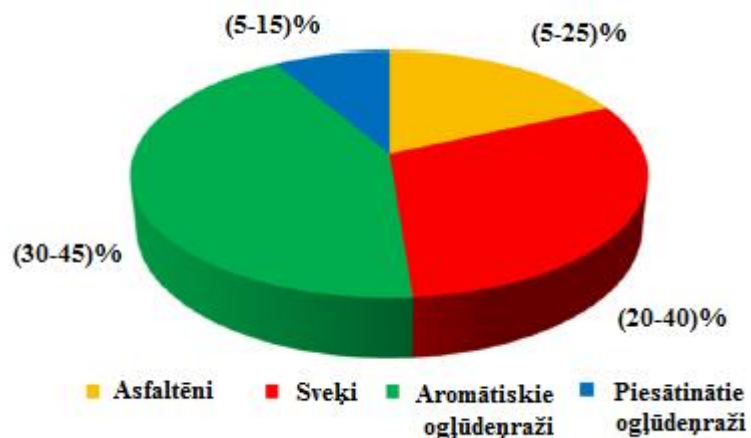
Bitumena funkcionālo grupu sastāvs dažādu valstu bitumeniem dots 3. tabulā

Tabula 3

Bitumena funkcionālo grupu sastāvs dažādu valstu bitumeniem [3]

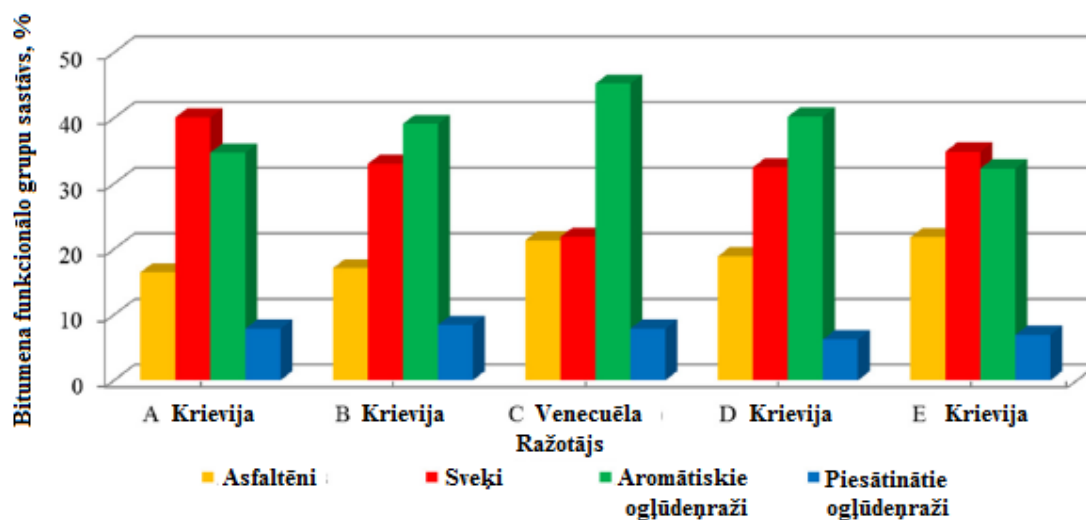
Valsts	Bitumena funkcionālo grupu sastāvs, %			
	Asfaltēni	Sveķi	Aromātiskie ogļūdeņraži	Piesātināti ogļūdeņraži
Krievija	10-25	20 - 40	40 - 60	-
Baltkrievija	19-21	32 - 34	45 - 49	-
Spānija	5 - 20	30 - 45	30 - 45	5 - 15
Lielbritānija	5 - 25	15 - 25	40 - 65	5 - 20
Rumānija	15 - 35	18 - 48	40 - 60	-
ASV	-	-	-	-

6. attēlā balstoties uz vairāku eksperimentu un pētījuma datiem ir parādīts rekomendējamai bitumena funkcionālo grupu sastāvs



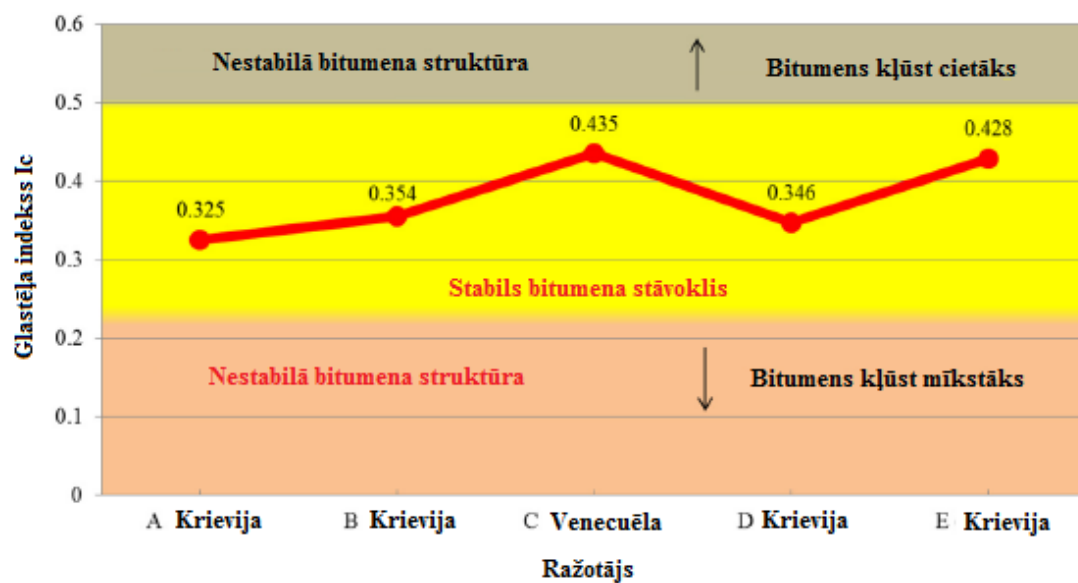
6. att. Rekomendācijas bitumena funkcionālo grupu sastāvam [3]

Analizējot piecu B50/70 bitumena tipu funkcionālo grupu sastāvu no dažādiem ražotājiem (četri Krievijas un viens Venecuēlas), tiek secināts, ka tie atbilst bitumena sastāva rekomendācijām (sk. 7.att.).



7. att. Dažādu bitumena saistvielas ražotāju funkcionālo grupu sastāvs [3]

Analizējot piecu B50/70 bitumena tipu koloidālo sistēmu stabilitāti, secināts, ka visiem bitumeniem koloidālā sistēma ir stabila. Bitumeniem C un D, salīdzinājumā ar pārējiem bitumeniem, ir neliela nosliece uz cietēšanu (sk. 8. att.).



8. att. Bitumenu koloidālo sistēmu stabilitāte [3]

4. METODES BITUMENA FUNKCIONĀLO GRUPU PROCENTUĀLĀ SATURA NOTEIKŠANAI

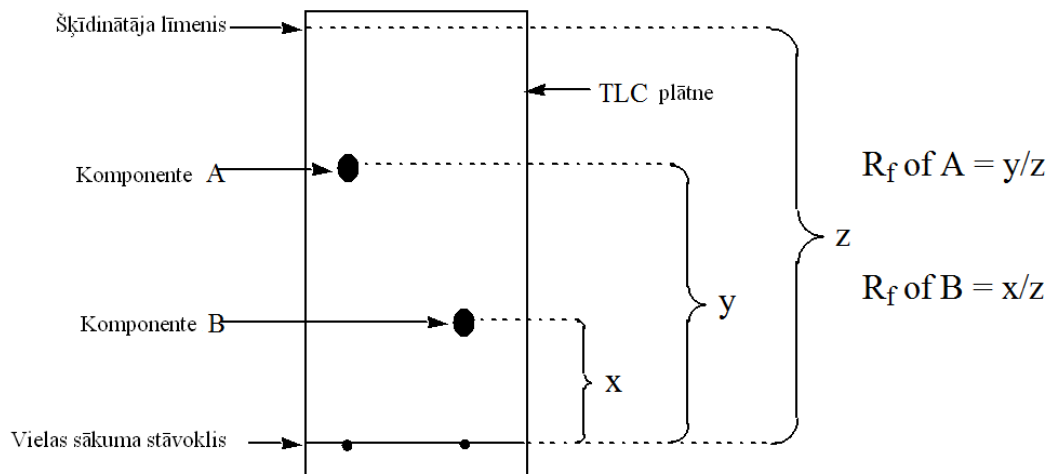
4.1. Plānā slāņa hromatogrāfija (TLC)

Pastāv vairākas metodes bitumena funkcionālo grupu procentuālā satura noteikšanai. Šo testēšanas metožu saīsinātais nosaukums ir *SARA* (saturates, aromatics, resins, asphaltenes) komponentu noteikšanas metodes. Visobjektīvākie un visaptverošākie rezultāti tiek iegūti, ja vairākas metodes tiek kombinētas un tiek noteikta korelācija starp dažādu metožu rezultātiem.

Vienā no izplatītākām *SARA* komponentu noteikšanās metodēm ir plānā slāņa hromatogrāfija (thin layer chromatograph technique – TLC), kuru izmanto vienas vielas organisko komponentu sadalīšanai. **Planā slāņa (plānārā) hromatogrāfija** ir hromatogrāfijas metode, kur stacionārā fāze atrodas plaknē.

- Papīra hromatogrāfija – stacionārā fāze ir pats papīrs kā tāds vai piesūcināts ar kādu vielu.
- Plānslāņa hromatogrāfija – adsorbenta slānis uzneš uz plakana nesēja (piem., stikla plates).

Abas šīs metodes (plānā slāņa hromatogrāfija (PSH) un tās paveids – papīra hromatogrāfija (PH)) - lieto, lai atdalītu savienojumus kompleksas vielas, piemēram, bitumenā. Plāns un vienmērīga biezuma stacionārās fāzes slānis ir uzklāts uz atbilstošas pamatnes: stikla, alumīnija folijas, poliestera plēves, u.c. PSH gadījumā speciālu papīru piesūcina ar stacionārās fāzes šķīdumu. Bitumena *SARA* komponentes (savienojumus) caur stacionāro fāzi transportē šķīdums, kurš, pārvietojoties cauri sorbenta kapilāriem, **nes līdzī izšķīdušos savienojumus**. Vienā plāksnītes vai papīra galu pārklāj ar bitumenu pilieniem, tad iegremdē šo galu nesēj šķīdumā un ļauj tam virzīties augšup pa plāksnīti vai papīru. Tie savienojumi, kuri ar stacionāro fāzi mijiedarbojas vājāk nekā ar šķīdumu, kustās ātrāk un kopā ar šķīdumu aizplūst tālāk. Uz plāksnītes vai papīra iegūst **plankumus, kas atbilst katram savienojumam šķīdumā** (sk. 9. att.).



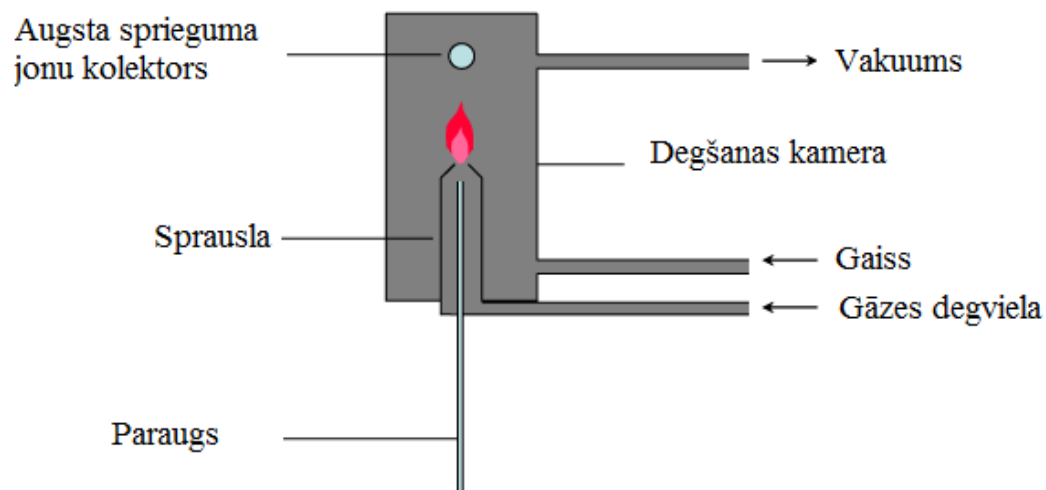
9. att. Plānā slāņa hromatogrāfijas metode

Koeficients R_f nosaka attiecību starp vielas komponentes pārvietojumu (komponentei B – x, komponentei A – y) un "mobilā" šķīdinātāja pārvietojumu (z) no sākuma stāvokļa līdz augšējām līmenim. Ar TLC metodi var sadalīt bitumenu SARA komponentēs. Mazāk polārām komponentēm (piesātināti un aromātiskie ogļūdeņraži) būs lielāks R_f rādītājs nekā bitumena polārām komponentēm (asfaltēniem un sveķiem). Tas saistīts ar bitumena komponentu mijiedarbību ar polāru adsorbentu uz TLC plātnes.

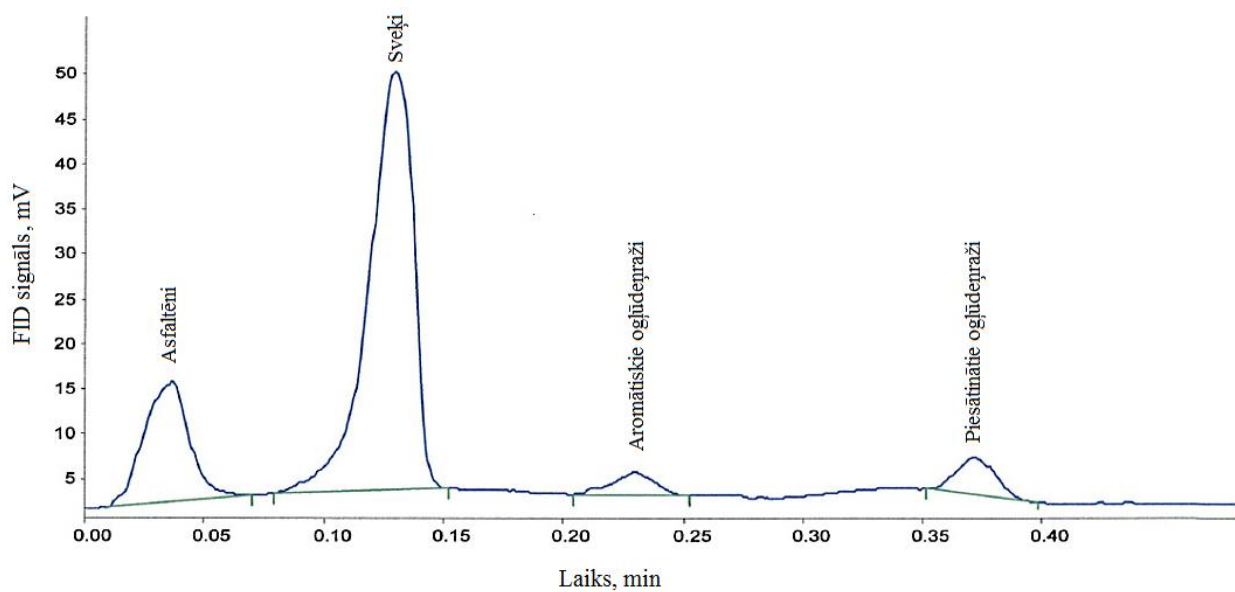
4.2. Liesmas jonizācijas detektors (FID)

Liesmas jonizācijas detektors (Flame ionization detector FID) ir standarta metode ogļūdeņražu koncentrācijas noteikšanai. Sākumā bitumena funkcionālo grupu (SARA komponentu) sadalīšanu veic ar plānā slāņa hromatogrāfijas metodi (TLC). Tāpēc FID metode izmanto kopā ar TLC metodi. Literatūrā bieži sastopama abreviatūra TLC-FIM, kura nozīme šo metožu koplietošanu bitumena ķīmiskā sastāva noteikšanai.

FID metodes pamatā ir paraugu dedzināšana - ogļūdeņraži tiek nosūtīti uz degļa sprauslu ar kontrolētu plūsmas ātrumu (sk. 10. un 11. att.). Ogļūdeņraža koncentrāciju (koncentrātu) iegūst jonizējot ogļūdeņražus ūdeņraža liesmā un pēc tam mērot radīto (izraisīto) jonu plūsmu. FID metode parāda ķīmiskās reakcijas (atbildi) laiku (minūtes) proporcionāli ūdeņraža atomu skaitam testētos ogļūdeņražos.



10. att. Liesmas jonizācijas detektora (FID) metode



11. att. Liesmas jonizācijas detektora (FID) bitumena funkcionālo grupu signāls

4.3. Diferenciālā skenēšanas kolorimetrija (DSC)

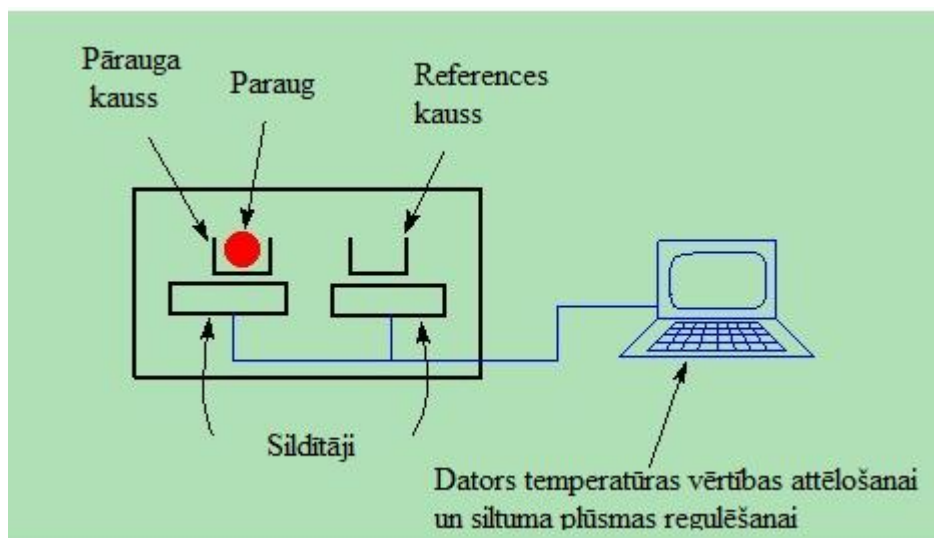
Diferenciālā skenēšanas kolorimetrija (*Differential Scanning Calorimetry - DSC*) ir termoanalitiskā metode, kura dot iespēju noteikt materiāla fiziskas izmaiņas, kas ir saistītas ar siltuma apmaiņu. Šī metode ir izmantojama, lai noteiktu vairākas īpašības un parādības, kas nosaka fiziskās izmaiņas (parēja stikla trausluma stāvoklī, kušana, kristalizēšana) [4]. Ar DSC palīdzību var tikt izmērītas ķīmiskās reakcijas un siltuma ietilpība. Turklāt, ja bitumena sastāva ietilpst vasks, tad ir iespējams identificēt vaska kušanas temperatūru, kura var būt izmantojama, lai noteiktu vaska daudzumu bitumenā.

Tā kā bitumens novecojas oksidācijas un/vai sfēriskās sacietēšanas rezultātā, uzmanība ir jāpievērš parauga sagatavošanai, kā arī parauga izņemšanai no pamatmateriāla. Nav ieteicams ņemt materiālu no materiāla augšējās daļas, jo visintensīvāk novecošanās notiek uz virsmas.

Testu veikšanai apmēram 15 mg bitumena tiek novietotas DSC kausā, kas ir noslēgts ar vāku, kurā ir neliels caurums, lai novērstu spiedienu un izvairīties no iespējamām kausa deformācijām testēšanas laikā. 15 mg bitumena ir optimāls daudzums, tomēr tas ir atkarīgs no kausa, jo bitumena pārlieds daudzums var izraisīt parauga burbuļošanu eksperimenta laikā pie augstākām temperatūrām.

Kad paraugs ir sagatavots, tas tiek novietots DSC ierīcē un tiek atdzesēts līdz 25°C 5 min laikā. Pēc tam paraugs tiek atdzesēts no 25°C līdz -80°C ar dzesēšanas ātrumu -10°C/min, un tad tiek atstāts uz 5 minūtēm pie pastāvīgas temperatūras. Mērījumi tiek uzsākti, kad paraugs tiek uzsildīts no -80°C līdz 140°C, kam seko atgriezeniskā atdzesēšana no 140 °C līdz -80°C. Pēc šīs dzesēšanas perioda paraugs tiek atstāts uz 5 minūtēm pie pastāvīgas temperatūras -80°C, kam seko otras kārtas sildīšanas mērījumi no -80°C līdz 140°C pie sildīšanas ātruma 10°C/min.

12. attēlā ir parādīta diferenciālā skenēšanas kolorimetrijas metodes būtība:



12. att. Diferenciālā skenēšanas kolorimetrijas metode [5]

13. attēlā ir parādīta ierīce diferenciālās skenēšanas kolorimetrijas metodes veikšanai:



13. att. Diferenciālās skenēšanas kolorimetrijas metodes ierīce [6]

4.4. Atomspēku mikroskops (AFM)

Atomspēku mikroskops (*Atomic Force Microscope – AFM*) ir attēlveidošanas ierīce ar ļoti augstu izšķirtspēju, kas sniedz informāciju par pārauga virsmas reljefu un fāžu kontrastu. Šī metode ir izmantojama, lai raksturotu bitumena virsmas mikrostruktūru [4]. Atomspēku mikroskops ir ļoti lietderīgs tādām daudzfāžu materiālam kā bitumens. Izmantojot AFM, var noteikt dažādas fāzes materiālā.

Nesen attīstītās attēlošanas paņēmieni sniedz iespēju attēlot bāzes materiāla un mērierīces gala dinamisku mijiedarbību. Papildus tam, kad mērierīce ir iedarbināta, vibrācijas amortizācija tiek piefiksēta un izmantota kā atgriezeniskais signāls. It īpaši priekš viskoziem materiāliem kā bitumens, atšķirība starp esošām vibrācijām un piefiksētās atbildes uz tām (fāzes signāls), var noteikt zonas, kurās ir atšķirīgs stingums un viskozitāte. Tādas fāžu attēli līdz ar virsmas reljefa attēliem var noteikt, ka kompozītmateriāls nav homogēns ogļūdeņražu maisījums un ka ne visi ogļūdeņraži ir šķīstošas istabas temperatūrā [4].

Dabiskais vasks, kas ir naftas sastāvdaļa, bieži ir definēts kā materiāls, kas izgulsnējas noteiktā temperatūrā. Ir divi vaska tipi, kas ir noteikti bitumena sastāvā: parafīna vasks un mikrokristāliskais vasks. Parafīna vasks pieder n-alkānu grupai C20-C40. Mikrokristāliskais vasks, otrādi, tiek uzkrāts izgulsnē destilācijas procesa rezultātā un sastāv pārsvarā no naftēniem (naftas ogļūdeņraži) un izoparafīniem. Abi tipi var tikt attēloti ar AFM palīdzību.

Parafīna vasks kristalizējas lielās, plakanās plātnēs vai adatās un ir arī zināms kā makrokristāliskais vasks. Mikrokristāliskais vasks, otrādi, sastāv no alifātiskiem (taisnas virknes) ogļūdeņražiem ar augstāku vārīšanas temperatūru un kristalizējas kā mazas mikroskopiskas adatiņas.

Testējot bitumenu, kurā sastāvā ietilpst dabiskās izcelsmes vasks, rezultāti parādīja, ka vaska daudzums augstā eksploatācijas temperatūrā neietekmē bitumena reoloģiskās īpašības. Tomēr zemās temperatūrās vaska klātbūtne bitumenā izraisa vaska bitumena fizisko sacietēšanu, kas noved pie asfalta maisījuma ar augstāku trausluma temperatūru.

Bitumeniem, kuru sastāvā neietilpst vaski, struktūra nav kristāliska. Kristālu struktūra ir atkarīga no kristalizācijas temperatūras un temperatūras vēstures.

Balstoties uz pētījumiem, kas aprakstīti rakstā “*Laboratory investigation of bitumen based on round robin DSC and AFM tests*” [4], bitumena vasks sāk kust temperatūra, kas zemāka par 60 °C. Zemās temperatūrās kristāliskas daļas stipri ietekmē fizisko sacietēšanu, kas paradās laika gaitā. Augstās temperatūrās kristāliskas daļas arī ietekmē reoloģisko darbību, jo izšķīšanas nogulsnes paradās pārsvarā temperatūras intervālā no 0°C līdz 80 °C.

Izmantojot fāžu kontrasta mikroskopu (*Phase Contrast Microscopy*), var noteikt, ka vaska klātbūtnē bitumenā var izraisīt fāžu atdalīšanu – no viena homogēna šķidruma divās šķidrās fāzēs dzesēšanas apstākļos caur spinodālu sadalīšanu (*spinodal decomposition*).

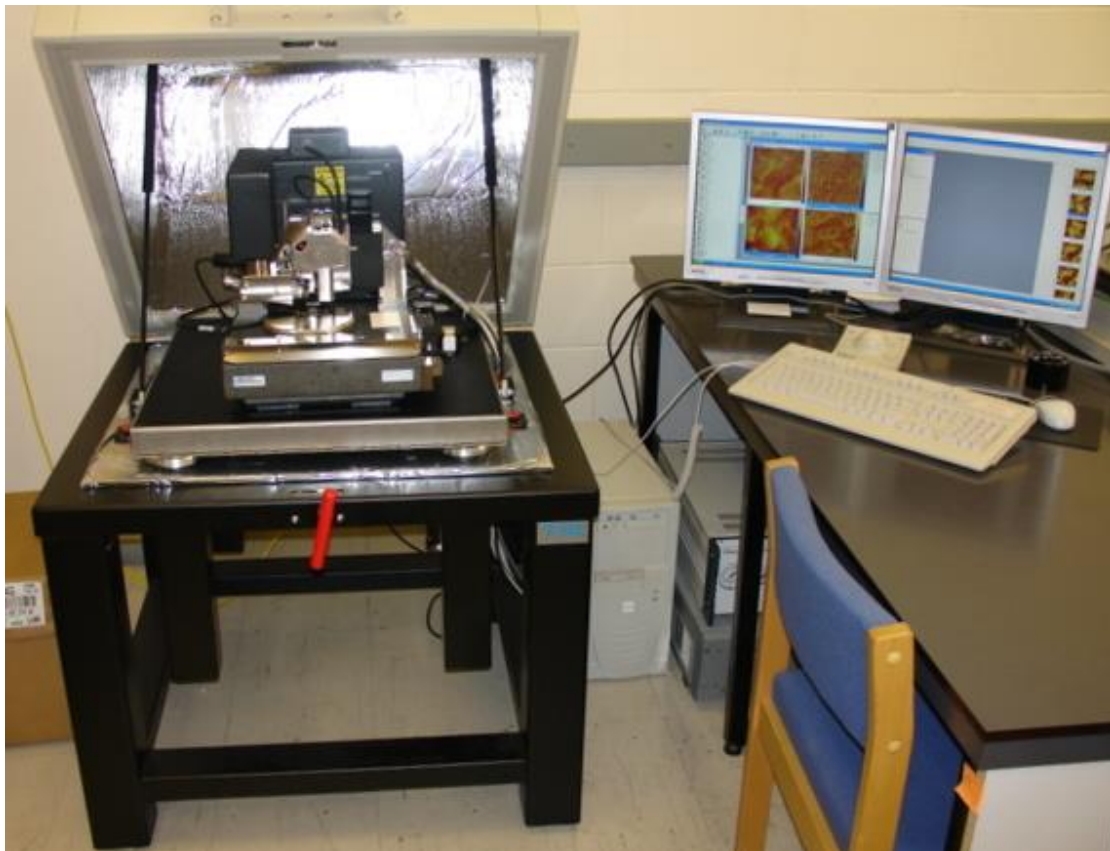
Ar atomspēku mikroskopa (AFM) palīdzību var iegūt materiāla virsmas reljefa attēlus, kā arī attēlus, kuros var redzēt atšķirīgas fāzes bitumena struktūrā. Mikrostruktūras vienības, kas ir saredzamas atomspēku mikroskopa attēlos, tika nosauktas par “bitēm” sava melnu – dzeltenu strīpu krāsojuma dēļ [4].

Fāžu izmaiņas, kas ir novērojamas ar AFM, kuru cēlonis ir temperatūras pieaugums, atrodas korelācijā ar DSC metodi iegūtām līknēm.

AFM priekšrocība ir tāda, ka šī metode pieprasa relatīvi vienkāršu pārauga sagatavošanu, un var darboties esošos apkārtējos apstākļos. AFM metodes trūkums ir tas, ka šī metode sniedz tikai virsmas attēlus, un, lai nodrošinātu attēlu pietiekami labu kvalitāti, virsmai jābūt relatīvi glūdai. Turklāt, jāņem vērā fakts, ka parauga sagatave var ietekmēt mērījumu rezultātus un ka virsmas īpašības ne vienmēr atbilst visa bitumena maisījuma īpašībām.

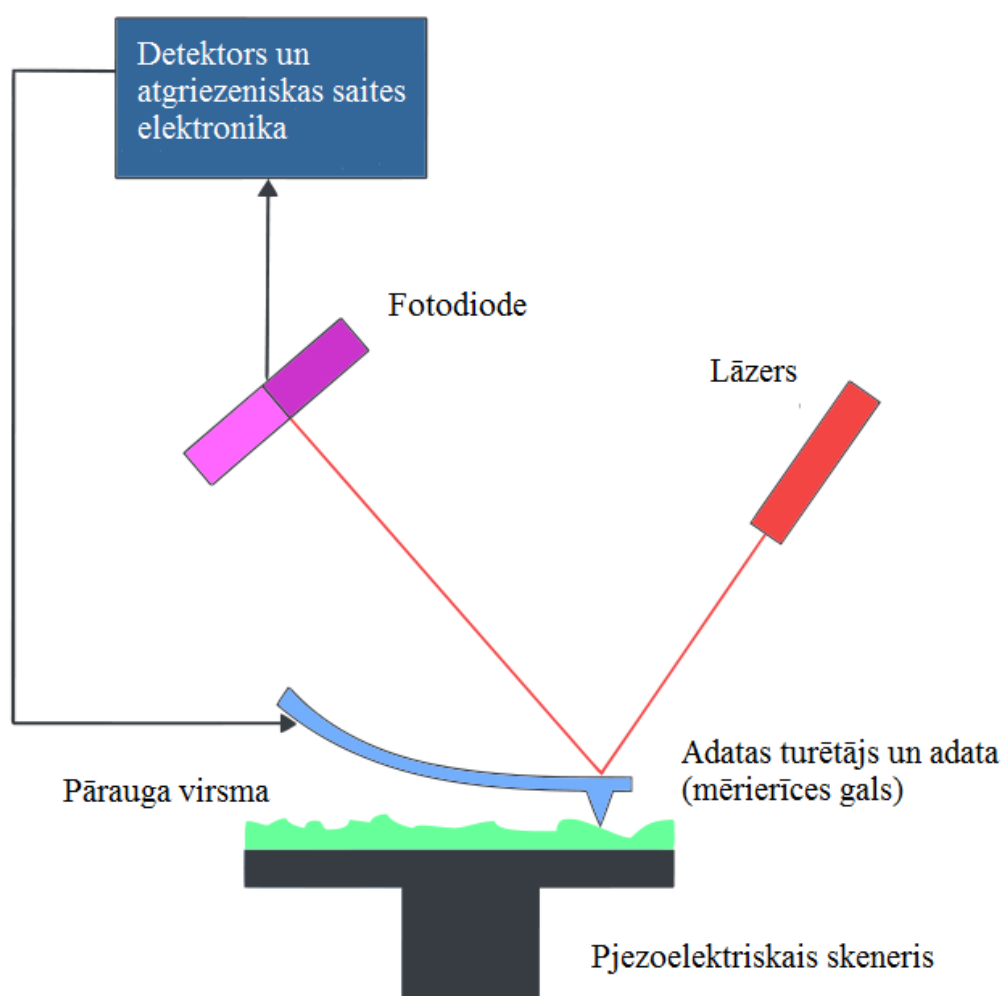
Testēšanas procedūra ir līdzīga DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) procedūrai, jo mikrostruktūra, kas veidojas uz pārauga virsmas, ir atkarīga no termiskās vēstures. Tests var tikt veikts dažādās temperatūrās vai pie konstantas temperatūras. Pāraugs tiek ievietots AFM ierīcē un tiek atdzesēts no 25°C līdz -30°C 5 minūšu laikā. Mērīšana sākas pie temperatūras -30°C. Uzmanība ir jāpievērš ledus parādīšanai gaisa mitruma kondensācijas rezultātā. To var novērst ar sausa slāpekļa gāzi, kura izplatīšanai jābūt lēnai, lai neiztraucētu mērījumus. Saistībā ar to ir rekomendēts sākt attēlveidošanu 0°C temperatūrā.

14. attēlā ir parādīts atomspēku mikroskops, kas ir pieslēgts datoram, lai varētu uzreiz konvertēt attēlus no mikroskopa:



14. att. Atomspēku mikroskops (AFM) [7]

15. attēlā ir parādīts atomspēku mikroskopa darbības princips:



15. att. Atomspēku mikroskopa darbības princips [8]

4.5. Infrasarkanā spektroskopija

Infrasarkanā spektroskopija (*Infrared spectroscopy*) ir spektroskopijas metode, kura ietver sevī spektra garo viļņu (virs 730 nm) zonu. Infrasarkanie spektri rodas molekulu svārstību rezultātā [9].

Ar infrasarkanā spektru palīdzību var konstatēt organisko un neorganisko vielu molekulu struktūru ar relatīvi īsām molekulām.

Infrasarkanā spektroskopija var tikt izmantota, lai noteiktu bitumena struktūrā ietilpstošus molekulārus komponentus – funkcionālas grupas (asfaltēni, sveķi, eļļas).

Lai noteiktu polimēru daudzumu saistvielā, ir nepieciešams zināt šī polimēra molekulāru struktūru. Specifiskas funkcionālas grupas absorbē infrasarkanu starojumu pie tipiska viļņa garuma. Polimēru koncentrācija var tikt noteikta ar Bugera-Lamberta – Bera likumu (*Lambert-Beer law*) [10].

Infrasarkanā spektroskopijas rezultātus var novērtēt pēc karboksilu zonas augstuma noteikšanas. Karboksilgrupā ietilpst oglekļa atoms un skābekļa atoms, starp kuriem ir dubultsaite. Karboksilu zona ir indikators bitumena oksidēšanai, t.i., jo lielāka absorbcijas atšķirība starp reģenerētu saistvielu un saistvielu piegādes stāvoklī, jo intensīvāks oksidācijas process bija. Tas nosaka saistvielas novecošanas procesa progresu [9].

16. attēla ir parādīta ierīce, infrasarkanā spektroskopijas testa veikšanai:



16. att. Infrasarkanās spektroskopijas ierīce [11]

4.6. Mazleņķa neitronu izkliedēšana ar atgriezenisku griešanu

Neskatoties uz to, ka atomspēku mikroskops sniedz apliecinājumus fāžu atdalīšanai bitumenā, šie pētījumi tika veikti ar divdimensiju bitumena plēvēm. Tas noved pie varbūtības, ka fāžu atdalīšanās notiek tikai uz bitumena virsmas spriegumu dēļ nevis visā bitumena apjomā.

Lai varētu noteikt, vai fāžu atdalīšanās notiek visā bitumena apjomā, tiek veikts mazleņķa neitronu izkliedēšanas tests (*SEASANS - Spin Echo Small Angle Neutron Scattering*), kas dot iespēju izmērīt blīvuma-blīvuma korelācijas funkcijas [12].

Gadījumā, kad jāapskata paraugs ar vienkāršu divu fāžu struktūru, divas atšķirīgas vielas var tikt viegli atpazīstamas ar mazleņķa izkliedēšanas paņēmieni. Ūdeņraža un oglekļa 5% attiecība sniedz pietiekami lielu izkļiedes kontrastu, lai atdalītu fāzes. Tas nozīmē, ka pat pie neliela leņķa var noteikt struktūrvienību esamību paraugā. Atgriezeniski rēķinot, izmantojot izkļiedes datus, var noteikt izkļiedes garuma blīvumu un vidējo fāžu molekulāru sastāvu. Salīdzinot datus, kas iegūti no

virsmas modeļa un no visa parauga apjoma modeļa var noteikt, vai fāžu atdalīšana notiek visā bitumena apjomā [12].

Jāņem vērā tas, ka tradicionāli mazleņķa paņēmienu nevar izpētīt šo efektu, tā kā mazleņķa paņēmienu ir ierobežots izkliedes garums (10 nm). Ja nepieciešams pētīt vielu garumā, kas sastāv no dažiem mikrometriem, tad tādām nolūkam iespējams izmantot Delft Universitātes izveidoto SESANS ierīci (sk. 17. att.).



17. att. SESANS ierīce

4.7. Apkopojums un secinājumi par 4. nodaļu

Izejvielas un ražošanas tehnoloģijas ietekme uz ceļa bitumena īpašībām

Viena un tā paša tipa bitumena ražošanai uzņēmumi izmanto dažādas izcelsmes naftas atlikumus. Veiktie pētījumi apstiprina, ka izejvielai ir liela ietekme uz bitumena īpašībām un vienam un tam pašam bitumena tipam, piemēram, B70/100 vai B50/70, iegādātam no viena un tā paša ražotāja, var krasi atšķirties īpašības, jo sastāvā tiek izmantoti dažādas izcelsmes naftas atlikumi. Tāpat ceļa būvniecībā izmantotā bitumena īpašības ietekmē arī naftas pārstrādē un bitumena ražošanā izmantotās tehnoloģijas. Šo iemeslu dēļ būtu vēlams noteikt pamatīpašības katrai iegādātai bitumena partijai (pat ja ir vienāds tips, kā arī ja ir viens un tas pats ražotājs). Tapāt, lai precīzi novērtētu bitumena kvalitāti, ir jānosaka bitumena funkcionālo grupu sastāvs,

un šī pārbaude jāatkārto katru reizi, kad tiek iegādāts bitumens no izvēlēta ražotāja. Šis secinājums piemērojams arī asfaltbetona sastāvu projektēšanai, jo, ja pat nedaudz mainās bitumena fizikālās, ķīmiskās un fizikāli – ķīmiskās īpašības, ir jāveic asfaltbetona sastāva pārprojektēšana:

- 1) Atkārtoti jāizvērtē mijiedarbība starp izejmateriāliem;
- 2) Jāizvēlas atbilstoša adhēzijas piedeva;
- 3) Jāveic saistvielas daudzuma atkārtota optimizācija, izmantojot gan pamatīpašības, gan ekspluatācijas īpašības testēšanas metodes.

Metodes bitumena funkcionālo grupu sastāva noteikšanai

Apkopota informācija par sekojošām progresīvākajām metodēm funkcionālo grupu sastāva noteikšanai:

- 1) Liesmas jonizācijas detektora metode – FID, kura ir standarta metode ogļūdeņražu koncentrācijas noteikšanai.
- 2) Bitumena sadalīšana funkcionālajās grupās ar plāna slāņa hromatogrāfijas metodi (TLC).
- 3) Bitumena funkcionālo grupu sastāva un struktūras (morfoloģijas) noteikšanai ar atomspēka mikroskopa metodi (ATM).

Bitumena funkcionālo grupu sastāvs ļāva noteikt koloidālās sistēmas stabilitāti. Analizējot piecu B50/70 bitumena tipu koloidālo sistēmu stabilitāti, secināts, ka visiem bitumeniem koloidālā sistēma ir stabila.

Analizējot piecu B50/70 bitumena tipu funkcionālo grupu sastāvu no dažādiem ražotājiem, tiek secināts, ka tie atbilst bitumena sastāva rekomendācijām. [3]

5. MODIFIKATORA IETEKME UZ PMB ĪPAŠĪBĀM

5.1. Polimēra daudzuma ietekme uz PMB īpašībām

Visas bitumena ķīmiskas un mehāniskas īpašības ir atkarīgas no bitumena struktūras un sastāva. Viens no svarīgākajiem bitumena raksturlielumiem ir viskozitāte. Viskozitāte ir reoloģiska īpašība, kas mainās atkarībā no temperatūras un ķīmiskā sastāva. Bitumena viskozitāti ietekme asfaltēnu un eļļu daudzums - jo vairāk asfaltēnu, jo lielāka viskozitāte [13].

Asfalta seguma darbības novērtēšanai ekspluatācijas apstākļos svarīga loma ir bitumena elastīgumam. Bitumena elastīgumu nosaka eļļu daudzums (jo vairāk eļļu – jo elastīgāks ir bitumens) [13]. Lielāks elastīgums piemīt tam polimērmodificētam bitumenam, kuras bāzē ir bitumens ar mazāku viskozitāti. Svarīga loma ir polimeru daudzuma ietekmei uz bitumena darbību. Ir divi polimērmodificēta bitumena darbības veidi [14]:

- Pāreja elastīga stabilitātē piemīt PmB ar polimeru saturu 2,5-3,5%;
- Trausluma temperatūras strauja samazināšanās novērojama PmB ar polimēru saturu virs 5%.

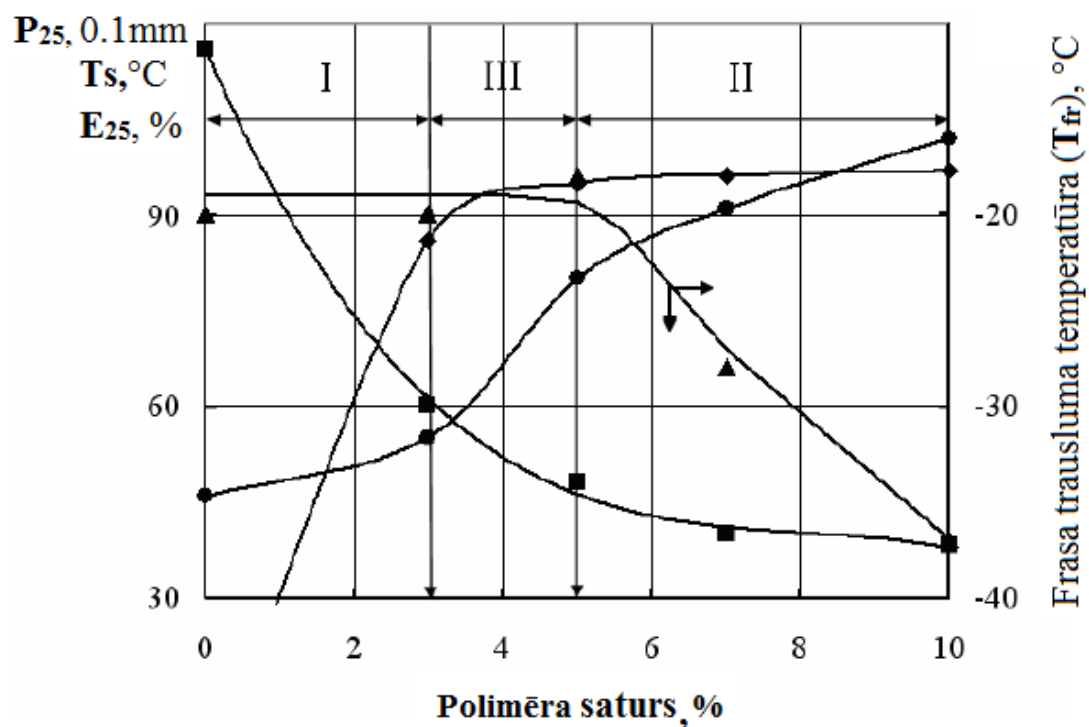
Šos secinājumus sniedz pētījums, ko veica Harkovas Nacionāla universitātē (*Kharkov National Automobile and Highway University*). Pētījuma rezultāti ir apkopoti 4. tabulā un grafiski parādīti 18. attēlā.]

Tabula 4

Polimērmodificēta bitumena tehniskās īpašības ar dažādu SBS daudzumu [14]

Nosaukums un sastāvs	Īpašības						
	P ₂₅ [0.1mm]	P ₀ [0.1mm]	T _s [°C]	D ₂₅ [cm]	D ₀ [cm]	E ₂₅ [%]	T _{fr} [°C]
Bitumens 90/130	116	37	46	>88	5,4	-	-19,5
Bitumens 90/130 + 3%SBS	60	17	55	58	10	86	-20
Bitumens 90/130 + 5%SBS	48	20	80	63	23	95	-18
Bitumens 90/130 + 7%SBS	40	16	91	62	24	95	-28
Bitumens 90/130 + 10%SBS	38	17	102	40	25	97	-37

Piezīmes: P₂₅ - penetrācija 25°C, P₀ - penetrācija 0°C, T_s - mīkstēšanas temperatūra °C, D₂₅ – duktilitāte 25°C, D₀ - duktilitāte 0°C, E₂₅ – elastīgā atjaunošanās 25°C, T_{fr} - trausluma temperatūra °C.



18. att. Polimēru daudzuma ietekme uz: ■ – penetrāciju 25°C, ▲ – Frasa trausluma temperatūru, ◆ - elastību 25°C, ● – mīksttapšanas temperatūru [14]

No tā izriet trīs polimērmodificēta bitumena tipi:

- Bitumens – nepārtraukta vide, polimērs – pārtraukta vidē, kurš izkļiedēts bitumenā;
- Polimērs – nepārtraukta vide, bitumens – pārtraukta vide, kurš izkļiedēts polimērā;
- Pārejas tipa polimērmodificēta bitumens.

Zemāk ir parādīti attēli (sk. 19. att.), kas iegūti ar mikroskopa palīdzību [2]. Divi dažādas izcelsmes bitumeni ar penetrāciju 70/100 tika modificēti ar SBS polimēru, kuru daudzums sastādīja 5%. Dati par nemodificētiem bitumeniem ir parādīti 5. tabulā, dati par modificētiem bitumeniem – 6. tabulā.

Tabula 5

Bāzes bitumenu tipiski parametri [2]

Bitumens	Pamatīpašības		Funkcionālo grupu (SARA) analīze (%) ar Iatroscan metodi			
	P ₂₅ [0.1mm]	T _s [°C]	Piesātinātie ogļūdeņraži	Aromātiskie ogļūdeņraži	Sveķi	Asfaltēni
B1	99	43.0	8	52	20	20
B2	93	43.2	7	55	22	16

Piezīmes: **P₂₅** - penetrācija 25°C, **T_s** - mīkstēšanas temperatūra °C, B1 – vienas izcelsmes bitumens, B2 – otrās izcelsmes bitumens.

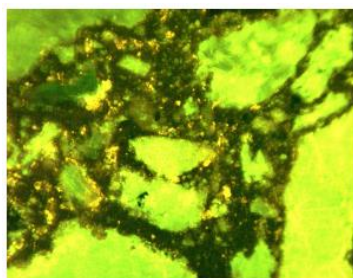
Tabula 6

Pamattestu rezultāti polimērmodificētiem bitumeniem [2]

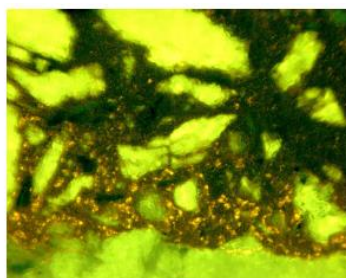
Modificēts bitumens	P ₂₅ [0.1mm]	T _s [°C]	Uzglabāšanas stabilitāte (T_s - mīkstēšanas temperatūra izmaiņa), °C
PmB1	57	76.0	45.2
PmB2	52	85.0	0.0

Piezīme: PmB1 – vienas izcelsmes polimērmodificēts bitumens 70/100 ar 5% SBS, PmB2 - otras izcelsmes polimērmodificēts bitumens 70/100 ar 5%.

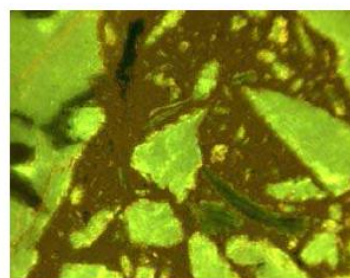
19. attēlā ir parādīts, kā polimēru fāze (mazi dzelteni punkti) ir izkliedēti nepārtrauktā bitumena fāzē:



M-PmB1



M-PmB2



Nemodificēts

19. att. Modificētā bitumena morfoloģijas attēli, kas iegūti ar mikroskopu [2]

Pēc Harkovas Nacionālās Transporta un Autoceļu Universitātes (*Kharkov National Automobile and Highway University*) veikta pētījuma tika konstatēts, ka bitumenam ar nelielu polimēru saturu piemīt kā cieta, tā arī mīksta bitumena īpašības [14]. Tas ir parādīts 7. tabulā, kurā ir apkopoti pētījuma rezultāti:

Tabula 7

Bitumenu reoloģiskas īpašības ar dažādu SBS polimēru daudzumu [14]

Parametri	T, °C	f, Hz	Bitumeni				
			BND 90/130	BND 90/130+3% SBS	BND 90/130+5% SBS	BND 90/130+7% SBS	BND 90/130+10% SBS
Komplekss elastības modulis E, Mpa	-20	0,5	8240	8910	8910	9120	7410
	0	0,5	4270	5130	6030	5010	4070
	20	0,5	1320	1860	2460	2090	1860
	50	0,5	320	480	550	650	810
Trausluma temperatūra T _g , °C		0,01	-18,5	-18,5	-18,5	-20	-29,5
		0,5	-11,5	-11,5	-12,5	-17,5	-24,5
Temperatūras jūtīguma koef.		0,01	0,031	0,026	0,024	0,022	0,019
		0,5	0,029	0,024	0,02	0,017	0,015
Plastiskuma koef.	20		0,21	0,18	0,18	0,17	0,16
Viskoplastiskā stāvokļa pārejas temperatūra T _{vp} , °C		0,01	46,5	59	65	67,5	71,5
Kritiskā deformācija $\epsilon_{cr} \cdot 10^4$	20	0,5	1,25	1,5	2,2	2,65	2,85
Kritiskie spriegumi σ_{cr} , Mpa	20	0,5	0,044	0,086	0,144	0,15	0,16

Lai uzlabotu asfaltbetona seguma īpašības, var piemērot dažādas modifikācijas metodes. Ir divi asfaltbetona maisījuma modifikācijas veidi [15]:

- Iekšēja modifikācija (tiek modificēts bitumens (modifikatora piedevas SBS, SBR, PE...), un tad tiek pievienots pildvielām);
- Ārēja modifikācija (tiek modificēts maisījums, t.i., modifikators (gumija, pulveris, šķiedras...) tiek sākumā pievienots pildvielām maisījuma ražošanas periodā, un tikai tad asfalta maisījumam tiek pievienots bitumens).

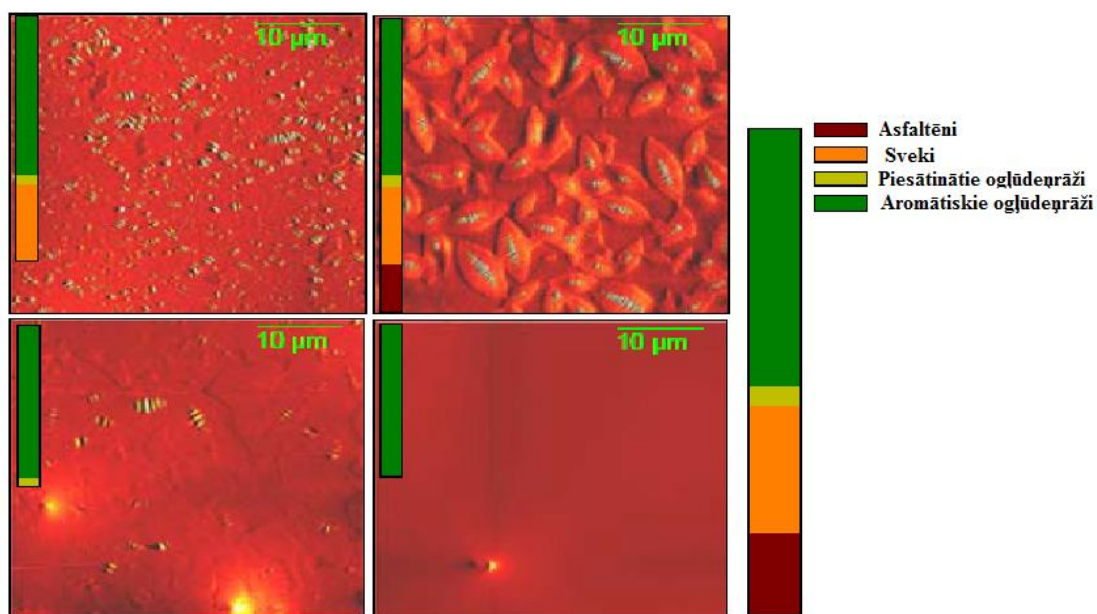
Pēc Ķīnas Universitātes (*Highway School of Chang'an University, Xi'an, China*) veiktā pētījuma tika konstatēts, ka labāk darbojas asfalts, kas tika modificēts ar ārējo modifikācijas metodi [15].

Vēl viena Ķīnas universitāte (*1 Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an China*) veica

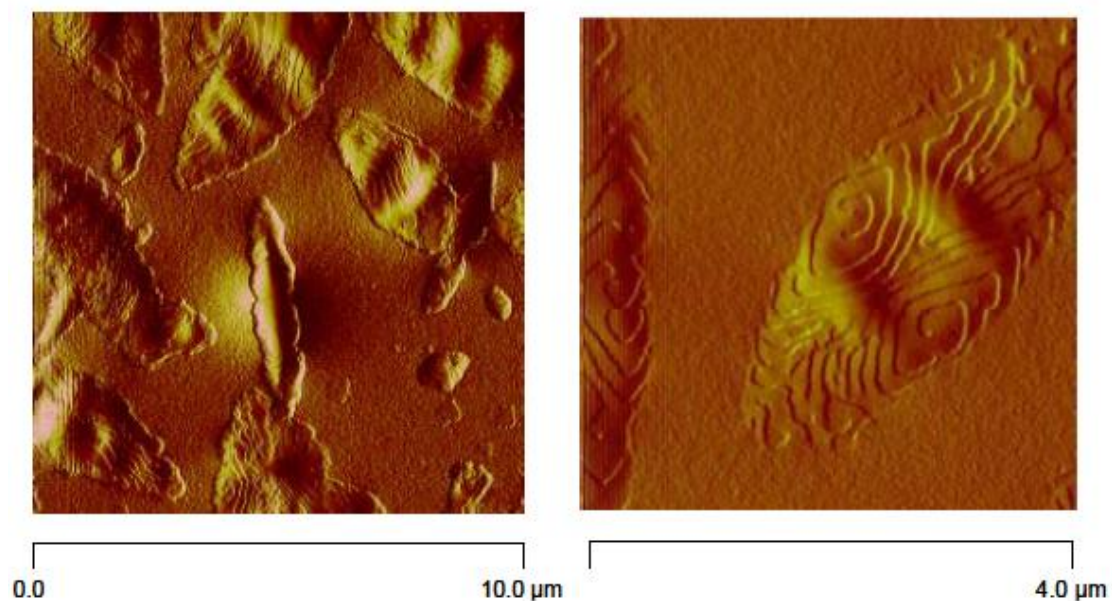
pētījumu, kurā rezultātā tika noteikts, ka katram bitumenam pastāv tāda temperatūra, pie kuras, neatkarīgi no polimēru daudzuma, penetrācija un elastības testa rezultāti ir vienādi. Operējot ar šo temperatūru, ir iespējams noteikt, vai bitumens ir piemērots noteiktiem klimatiskiem apstākļiem vai nē. Šis temperatūras lielums ir saistīts ar modifikatora veidu, bitumena izcelsmi, bitumena un modifikatora savietojamības [16].

Polimērmodificēta bitumena funkcionalitāte ir atkarīga no bitumena un polimēra savietojamības, t.i., no tendences neatdalīties uzturēšanas periodā. Savietojamība var noteikt ar morfoloģijas (mikroskopijas) testiem un uzturēšanas stabilitātes testiem [2].

Ar atomspēku mikroskopu (*AFM – Atomic Force Microscope*) var dabūt bitumena struktūras attēlus. 20. un 21. attēlā ir parādīti iegūti ar AFM attēli, kurās ir parādīta bitumena “bites” struktūra.



20. att. AFM iegūti attēli ar bitumena struktūrā ietilpstošām sastāvdaļām [12]



21. att. Ar AFM testu iegūti attēli, kuros ir redzama “bites” struktūra [12]

Morfoloģija un uzturēšanas stabilitāte ir atkarīga no bāzes bitumena īpašībām, polimēra daudzuma, kā arī izgatavošanas procesa. Polimērmodificēta bitumena morfoloģiju un uzturēšanas stabilitāti ietekmē temperatūra un saistvielas termiskā vēsture [13]. Modificēta saistviela ar nelabvēlīgu morfoloģiju var sniegt mazus mehānisko īpašību uzlabojumus (nesniegt nekādus uzlabojumus), nepietiekama uzturēšanas stabilitāte var novest pie fāžu atdalīšanas un pretrunīgu saistvielas kvalitāti.

Polimērmodificēto bitumenu morfoloģija ievērojami ietekme reoloģiskas īpašības. Tas attiecas uz bitumeniem, kuriem bitumens – nepārtrauktā vidē, kurā ir izkliedēti polimēri –pārtrauktā vidē [2].

5.2. Bitumena un PMB strukturāli reoloģiskie parametri

Bitumens ir dažādu ogļūdeņražu savienojumu maisījums, un katram bitumena tipam ir atšķirīga molekulu struktūra un izmērs. Bitumenu materiālu kvalitāti raksturo sekojoši faktori: stingums, izturība, plastiskums, viskozitāte, t.i., strukturāli mehāniskās īpašības. Struktūras izmaiņas izraisa materiāla īpašību izmaiņu, kas liecina par to, ka struktūras maiņa ir viens no pamat- un radikālākiem veidiem, kā var, uzlabojot bitumena darbību un kvalitāti, palielināt bitumena dzīves ciklu.

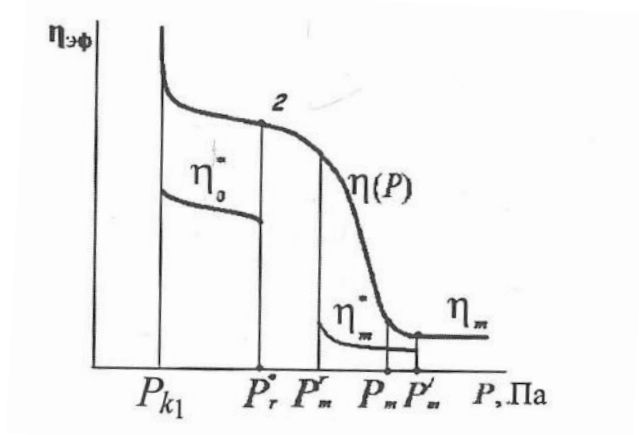
Viens no veidiem, kā var regulēt bitumena koloidālo struktūru, ir materiāla modifikācija ar polimēriem, kas ļauj pietuvināt bitumena strukturāli reoloģiskas īpašības daudzmolekulāru polimērmateriālu īpašībām, kuriem piemīt atgriezeniskās deformācijas spēja pieliktas slodzes ietekmē.

Deformāciju īpašību noteikšana tiek veikta ar strukturāli reoloģisko parametru definēšanu. Tas ir galvenais faktors, kas ļauj noteikt jaunizveidoto struktūru raksturu un, sekojoši, ir svarīgākais instruments, lai noteiktu jaunu sistēmu īpašības un strukturāli mehāniskus kritērijus materiāla piemērotības ekspluatācijas apstākļiem novērtēšanai.

Materiālu stacionāras tecēšanas process tiek raksturots ar pilnu reoloģisko līkni [18 – 23, 48]. Materiālam, kas atrodas Ņūtona šķidruma stāvoklī, reoloģiska līkne ir taisne, kas iet caur koordinātu sākumpunktu. Šī gadījumā vienīgais reoloģiskais raksturlielums ir viskozitātes konstante η :

$$\eta = P/D_r,$$

kur: P – nobīdes spriegums, D_r – ātruma gradients.



22. att.– reoloģiskā līkne

Cietveida sistēmām ar elastīgas deformācijas apgabalu ir S – veida reoloģiskā līkne (sk. 22. att.). Tādām sistēmām ir raksturīgs straujš efektīvas viskozitātes kritiens šaurā spriegumu intervālā. Maksimālai viskozitātei η_0 ir bezgalīgi liela vērtība, kas netiek mainīta.

Pēc reoloģiskas līknes grafika var noteikt spriegumu, kas izraisa ķermeņa nepārtrauktības pārrāvumu P_m , līdz atļautai robežai sabruktas struktūras minimālu viskozitāti η_m , kā arī aprēķināt struktūras noturības rādītāju $\chi = P_m/P_{k1}$. Struktūrāli reoloģiski rādītāji ļauj novērtēt dispersu sistēmu spēkus, kuri darbojas starp daļiņām.

5.3. Polimēra uzbūves ietekme uz PMB īpašībām

Galvenais parametrs, kas nosaka polimermodificēta bitumena gala īpašības, ir polimēra un bitumena šķīdība, t.i., polimēra spēja uztūkt un izšķīst bitumena dispersijas fāzē. Lai raksturotu polimera un bitumena savienojamību, izmanto *šķīdības parametru* δ . Tas tiek aprēķināts, balstoties uz kohēzijas enerģijas blīvuma izmaiņu starp mijedarbojošiem savienojumiem, un ir ekvivalents darbam (enerģijai), kas nepieciešams mijedarbojošo molekulu pārvietošanai uz bezgalīgi lielu attālumu. Šķīdības parametrs δ ir ne tikai fizikāli-ķīmiskais, bet arī svarīgs tehniskais polimeru un šķīdinātāju raksturlielums. Tika noteikts, ka, lai savienotos ar bitumenu polimēru šķīdības parametram δ , jābūt robežās no 8.1 līdz 8.6 cal/cm³ [23, 24, 48].

SBS (stirols - butadiens – stirols) polimera šķīdības parametru vērtības ir 9.1 cal/cm³ (stirols) un 8.5 cal/cm³ (butadiens). Bitumena šķīdības parametrs ir 8 cal/cm³, tāpēc ir iespējams panākt labu butadiena šķīdību bitumenā, bet praktiski nav iespējams izšķīdināt stirolu. Tāpēc pastāv tehnoloģiskās grūtības SBS un bitumena savienošanā.

No reoloģiskā skatupunkta bitumēni ir sarežģītas dispersas sistēmas, kuras atkarībā no temperatūras strauji maina savas struktūr – reoloģiskās īpašības. Līdzīgi tam, ka dinamiskās iedarbības apstākļos (it īpaši zemās temperatūrās) deformācijas tiek raksturotas ar elastības moduli, ilglaicīgas slodzes apstākļos jāpievērš uzmanība bitumena viskozitātei. Turklāt viskozitāte ir viens no noteicošiem raksturlielumiem, no kuras atkarīgs asfaltbetona ražošanas un maisīšanas kvalitātes process (viegla iestrādajamība).

Viskozitāte ir atkarīga ne tikai no temperatūras, bet arī no slodzes lieluma un iedarbības ilguma [25, 26]. Lielu slodžu iedarbības rezultātā (it īpaši, ja tas iedarbojas ilgu laiku) materiāla struktūra var tikt izjaukta, kas noved pie strauja viskozitātes krituma. Atkarībā no deformācijas apstākļiem PMB var darboties kā Ņūtona šķidrums, kā arī ne-Ņūtona šķidrums [19 - 22, 27 – 29, 48].

Ekspluatācijas apstākļos lielākas priekšrocības piemīt materiāliem ar lielāku viskozitāti, mazākiem nobīdes ātrumiem η_0^* un materiāliem ar elastīgi – plastiskām īpašībām, kuras tiek raksturotas ar maksimālu plastisku viskozitāti η_m^* .

Balstoties uz strukturāli reoloģisko īpašību salīdzināšanas analīzes, tika konstatēts, ka SBS pievienošana bitumenam, neatkarīgi no SBS ķīmiskas uzbūves, veicina bitumena koloidālas struktūras izmaiņu. Par to liecina parametra θ_{k1} vērtības pieaugums (statiskas nobīdes spriegums), kas raksturo materiāla pretestību pieliktām deformācijām. Kompozīcijās bitumens + SBS šis parametrs palielinās 4 – 16 reizēs.

Statiskas nobīdes spriegums atbilst visstraujākam sistēmas viskozitātes kritumam un raksturo nepārtrauktu telpisko tīklu, kas aptver visu sistēmas tilpumu, un pēc būtības ir tuvs elastības robežai [30, 48].

Ar SBS modificētiem bitumeniem piemīt augstāka kohēzijas izturība salīdzinājumā ar nemodificētiem bitumeniem. PMB ir ne tikai augstāka nesabrukta struktūras izturība, bet arī tam piemīt elastīgi – plastiskas īpašības. PMB, tāpat kā polimeriem, ir plūstamības apgabals, par ko liecina sākotnējās struktūras sabrukums un jaunizveidota makromolekulu orientēšana.

SBS pievienošana bitumenam veicina daudz ievērojamāku elastīgi – plastisku īpašību izpaušmi – dinamiskas nobīdes robežsprieguma θ_{k2} vērtība palielinās no $30 \cdot 10^2$ Pa (ar 1% SBSB) līdz $185 \cdot 10^2$ Pa (ar 5% SBS). Tas tiek izskaidrots ar polimera molekulu struktūru, kas satur polibutadienu ķēdi, kas satur dubultas $-C=C-$ saiknes, kas arī sniedz polimeram elastīgi – plastiskās īpašības.

Tabula 8

PMB efektīvas viskozitātes vērtības 130°C, Pa·s

SBS daudzums, %	η_0^*	η_m^*
0	3	1
1	7	3
3	11	5
5	20	10

Kā parādīts 8. tabulā, 130°C temperatūrā viskozitātes η_0^* vērtības, kas raksturo praktiski nesabrukšu paraugu struktūru, kuri ir modificēti ar 3-5% SBS, ir 2-5 reizēs lielākas nekā nemodificētam bitumenam. Tas liecina par to, ka SBS – modificēti bitumēni ir augststrukturālas sistēmas noteiktā temperatūrā.

Balstoties uz PMB strukturāli reoloģisko parametru analīzi, tika konstatēts, ka, ieviešot SBS polimēru, bitumenā veidojas telpiska struktūra ar optimālām izturības un viskozi elastīgām īpašībām. To apstiprina viskozas plūstamības aktivācijas enerģijas aprēķinātas vērtības E_{akt} (sk. 9. tab.)

Tabula 9

Viskozas plūstamības aktivācijas enerģijas vērtības SBS – modificētiem bitumeniem.

Pāraugs	Polimēra daudzums, %	E_{akt} , kJ/mol
Bitumens	-	80.00
Bitumens + SBS	0.5	88.00
	1.0	100.11
	2.0	117.34
	3.0	137.59
	4.0	150.85
	5.0	158.37

Viskozas plūstamības aktivācijas enerģijas vērtības tiek aprēķinātas no sekojošās sakarības:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_{akt}}{RT}},$$

kur:

η - PMB viskozitāte dotajā temperatūrā;

A – konstante;

E_{akt} – viskozas plūstamības aktivācijas enerģija;

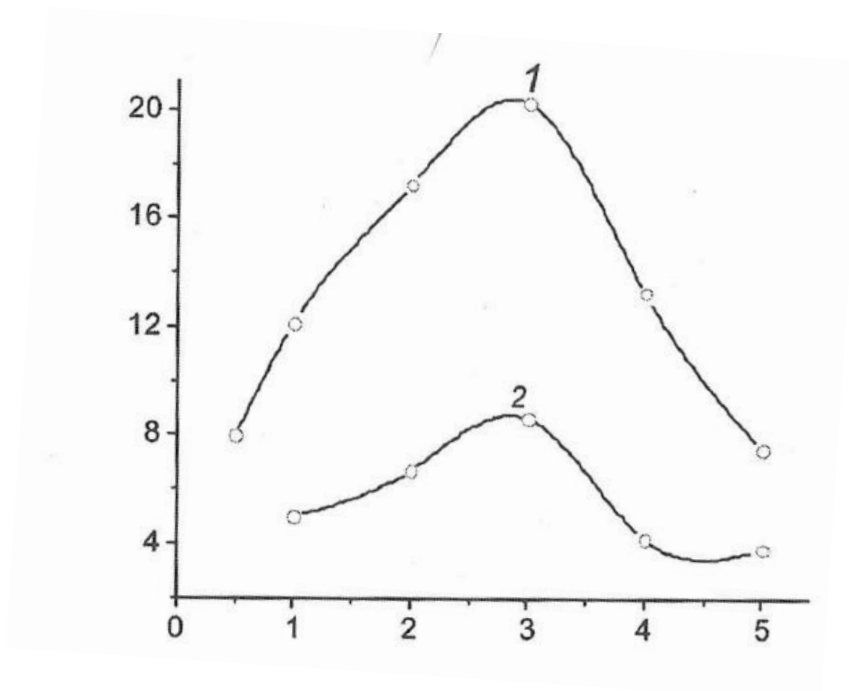
R - gāzu universāla konstante;

T – temperatūra.

Logaritmējot doto sakarību, iegūstam:

$$E_{akt} = \frac{R}{\lg e} \cdot \lg \eta.$$

23. attēlā ir parādīts, ka maksimālas viskozas plūstamības aktivizācijas enerģijas vērtība tiek sasniegta, ja SBS polimera daudzums bitumenā sastāda 3%. Pie šī polimeru daudzuma PMB veidojas termiski visnoturīgākā dispersa sistēma.



23. att. Viskoza plūstamības aktivizācijas enerģijas vērtību grafiks (horizontāli – polimēra daudzums, vertikāli – enerģijas vērtība).

Mikroskopu izpētes testu rezultāti liecina par pārmaiņām bitumena dispersā sistēmā. Modifikācijas procesā polimērs tiek izkliedēts bitumena dispersā sistēmā savstarpēju savienotu daļiņu veidā un izveido telpisku polimēru struktūru. Balstoties uz KMR (kodolmagnētiskā rezonanse) spektroskopijas testa rezultātiem, tika konstatēts, ka starp SBS un bitumena komponentiem nepastāv ķīmiskas saites, jo tiem ir izotropas mijiedarbības raksturs. Stirols un butadiens, izšķīstot bitumena eļļās, adsorbē tās komponentes, kas pārsvarā ir maltēnu sastāvdaļas, un izveido fāzi ar lielu polimeru daudzumu. Otrā fāze sastāv no asfaltēniem ar pārpalikušiem maltēniem.

5.4. PMB struktūras ietekme uz adhēzijas īpašībām

Bitumena adhēzija (pielipšana pie minerālmateriāla virsmas) ir svarīgs parametrs, kas nosaka būvkonstrukciju un ceļu segumu ilgmūžību [31-34, 48]. Bitumena adhēzijas spējas tiek noteiktas ne tikai pēc minerālu sastāva un minerālmateriāla virsmas struktūras, bet arī pēc bitumena komponentu polaritātes.

Polimēru modifikatoru ietekmes uz bitumena adhēzijas spējam pētījumu rezultāti atspoguļo minerālmateriāla virsmas pārklājuma pakāpi ar bitumenu (sk. 10. tab.).

Tabula 10

PMB un minerālmateriāla adhēzijas īpašības noteiktas ar vārīšanas metodi

Saistviela	Bitumena pārklājums, %
Bitumens	10
Bitumens + 3% SBS	20
Bitumens + 3% SBSM	15
Bitumens + 5% EVA 18	50
Bitumens + 5% EVA 24	60
Bitumens + 5% EBA 28	60
Bitumens + 5% EBA 35	65

SBS un SBSM praktiski nemaina bitumena adhēzijas spējas, savukārt etilēns (EVA) ievērojami paaugstina bitumena adhēzijas spējas, jo tiek palielināta bitumena disperso komponentu polaritāte.

5.5. Oksidēta bitumena modifikācija komponentiem mijiedarbojoties dispersā vidē

5.5.1. Epoksīdsveķu sacietēšanās bitumena dispersā vidē

Viens no perspektīvākiem virzieniem bitumena modifikācijā ir oligomēru ievadīšana bitumena dispersā vidē. Oligomēri pēc savām fizikālām un ķīmiskām īpašībām atrodas starp polimēriem un monomēriem, un parasti tiem piemīt šķidra konsistence. Tas nodrošina ievērojamas tehnoloģiskas priekšrocības salīdzinājumā ar polimēru ievadīšanu bitumenā [53-55].

Modificējot bitumenu ar polimēriem, jāreķinās arī ar tādām darbībām kā polimēru sasmalcināšana un izšķīdināšana, un šiem procesiem ir nepieciešams liels enerģijas patēriņš, t.i., vajadzīgs liels daudzkaloriju degvielas daudzums. Šis faktors ierobežo plašu polimēru izmantošanu bitumena modifikācijā.

Pēc iedarbības rakstura oligomēri tuvojas polimēriem – tie paaugstina bitumena elastību, stiprību dinamiskās slodzes ietekmē, paplašina plastiskuma un elastības robežas, samazina trausluma temperatūru. Svarīga daudzu oligomēru īpašība – spēja daļēji polimerizēties relatīvi zemās temperatūrās. *Šī īpašība ir lietderīga asfaltbetonu maisījumu pagatavošanas procesā, tādā veidā paaugstinot ražošanas tehnoloģijas efektivitāti.*

Lai nodrošinātu nepieciešamās bitumena un asfaltbetona maisījuma īpašības, svarīgi ir regulēt ievadīto oligomēru daudzumu, temperatūru un maisījuma noturēšanu oligomēru efektivitāte izpaužas arī asfalta ērtākā uzklāšanā un asfaltbetona seguma noturībā pret plaisām [55]. Pētījumā [55] tiek parādīts, ka ar oligomēriem modificētu bitumenu reoloģiskas īpašības ir augstākas nekā nemodificētiem bitumeniem. Papildus tiem ir raksturīgs plašāks elastības intervāls un augsti stiepes īpašības 0°C temperatūrā [55].

Viens no oligomēru modifikatoriem, kas ir piemērots bitumeniem, ir epoksīdsveķi. Epoksīdsveķi iegūst vērtīgas īpašības (stiprību, dielektriskās īpašības, ķīmisko noturību) tikai tad, kad sveķos tiek izveidota telpiskā struktūra, kura savukārt veidojas epoksīd- un hidroksilgrupu ķīmiskās mijiedarbības rezultātā [53]. Galvenais šis ķīmiskās mijiedarbības mērķis ir nodrošināt epoksīdsveķu sacietēšanu. Ķīmiskās reakcijas starp epoksīdsveķiem un vielas, kas veicina sacietēšanu, rezultātā bitumenā tiek izveidots trīsdimensionāls tīkls. Pēc polimerizācijas reakcijas PMB iegūst cietas vielas īpašības, kam piemīt augstas adhēzijas spējas. Bet tas nesniedz iespēju iegūt materiālu ar augstām elastības spējām. Tāpēc optimāls risinājums būtu modificēt bitumenu ar mazmolekulāriem un strukturētiem oligomēru komponentiem (kombinācija oligomērs + plastifikators).

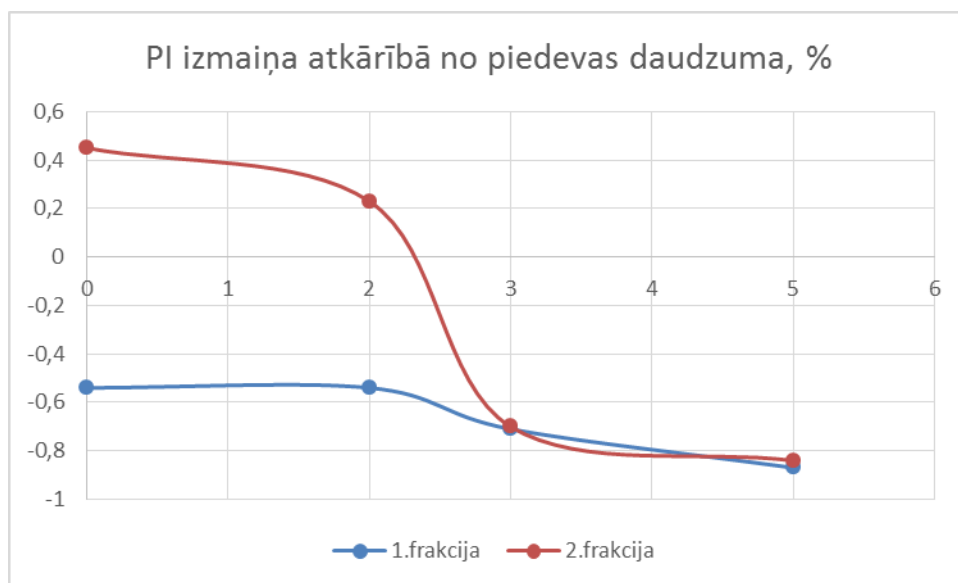
Izmantojot vieglas (1) un smagas (2) naftas frakcijas plastifikatorus, kas iegūtas Baltkrievu naftas pārstrādes rūpnīcās, noteikta plastifikatoru ietekme uz bitumena fizikālām īpašībām.

Analizējot bitumenu B70/100 penetrācijas indeksa vērtības izmaiņu atkarībā no plastifikatora piedevas koncentrācijas, tika novērota diezgan strauja penetrācijas indeksa izmaiņa bitumenam ar frakcijas Nr.2 piedevu, palielinoties piedevas daudzumam no 2 līdz 3%. Tas liecina par to, ka naftas frakciju ievadīšana pārtrauc koloidālo līdzsvaru sistēmā, kas izpaužas bitumena fiziko-mehānisko īpašību izmaiņā un tiek izskaidrots ar to, ka tiek izmainīta bitumena dispersās vides termostabilitātes spēja. (sk. 11. tab. un 24. att.). Svarīgi atzīmēt, kas stabilām bitumenam PI ir robežās no 0 līdz -0,5.

Tabula 11

Plastifikatoru ietekme uz bitumena fizikālām īpašībām

Plastifikatora koncentrācija, %	Radītājs			
	Mīksttapšanas temp., °C	Trausluma temp., °C	Penetrācija, 0.1mm, 25°C	Penetrācijas indekss
Frakcija Nr. 1				
0	48.7	-17	74.1	-0.54
2	46	-20	98.1	-0.54
3	43	-24	123.1	-0.71
5	38	-30	159.4	-0.87
Frakcija Nr.2				
0	47.5	-19	90.9	0.45
2	44.5	-24	134.9	0.23
3	40.5	-27	162.4	-0.7
5	35.5	-31	234	-0.84



24. att. Plastifikatoru ietekme uz bitumena fizikālām īpašībām

Frakcijas Nr.2 ievadīšana bitumena dispersā vidē veicina asfaltēnu relatīva daudzuma samazināšanu. Frakcijas Nr.1 ievadīšana izraisa asfaltēnu izšķīdināšanās samazināšanos bitumena dispersā vidē, un rezultāta asfaltēnu daudzums palielinās. Tāpēc arī penetrācijas indeksa samazināšanas notiek lēni. Tāpēc, *izmantojot naftas frakcijas kā plastifikatorus, tas daudzumam jābūt ap 1-3%, tad netiek konstatēta ievērojamā koloidālas struktūras izmaiņa.* Ar naftas frakciju kā plastifikatoru izmantošanu bitumenā jābūt piesardzīgiem. No vienas puses, tas samazina bitumena viskozitāti un tādejādi paaugstina ražošanas tehnoloģijas efektivitāti. No otras puses – turpmāka frakciju klātbūtne bitumenā var novest pie bitumena ekspluatācijas īpašību pasliktināšanas.

Mūsdienās viskozu un šķidru bitumenu iegūšanai izmanto plastifikatorus ar ķīmiskām piedevām, it īpaši tādus, kuru sastāva pamatā ir rapšu eļļas aminoskābju atvasinājumi, kuri nepiesārņo apkārtējo vidi (salīdzinājumā ar parasti izmantotajām naftas frakcijām). Aminoskābju atvasinājumos ir reaktīvas aminogrupas, to klātbūtne noved pie bitumena dispersās sistēmas komponentu polaritātes pieauguma, kas paaugstina bitumena un minerālmateriāla adhēzijas spēkus. Papildus šīs piedevas stimulēs epoksīdsveķu sacietējumu bitumena dispersā vidē, kas paaugstinās elastīgi – plastiskās PMB īpašības [53-55].

5.5.2. Polimēru sintēze bitumena dispersā vidē

Alternatīvs bitumena modifikācijas veids ir polimēru sintēze bitumena dispersā vidē. Viens no piemēriem – alifātiskie poliamīdi. Poliamīdi ir daudzmolekulārie savienojumi, kuru īpašības plaši mainās atkarībā no ķīmiskas uzbūves. Poliamīdiem ir raksturīga augsta mīksttapšanas un pārvēršanas stiklveida vielā zemā temperatūrā. Galvenā tādas modifikācijas priekšrocība ir tas, ka, sintezējot polimēru bitumena dispersā vidē, *tiek panākta optimāla PMB komponentu savietojamība*. Turklāt šī procesa veikšanai nav nepieciešamas speciālas iekārtas un augstas temperatūras uzturēšana, kā, piemēram, modificējot bitumenu ar jau gataviem polimēriem, tādiem kā SBS [53]. Pētījumā [54 - 55] tika salīdzināta bitumena modifikācija ar maleīnskābes poliamīdiem un ar maleīnskābes monoamīdiem. Pētījuma rezultāti liecina, ka modifikācijai ar maleīnskābes poliamīdiem ir lielāks efekts. Tas ir saistīts ar to, ka maleīnskābes monoamīdi ir oligomēri un neveido polimēru tīklu bitumena dispersa vidē [56 - 61].

Svarīgs ir fakts, ka, papildus polāro karbon- un amīd- grupu ievadīšana bitumena dispersa vidē veicina *labāku PMB saķeri ar minerālmateriālu, kuram ir skābas dabas virsma, paaugstinot to no 20% (lielums, raksturīgs nemodificētam bitumenam) līdz 75%*.

Visu iepriekš minēto pētījumu [53 - 61] analīze ļauj veikt secinājumu par iespēju modificēt bitumenu, veicot maleīnskābes anhidrīda polikondensācijas reakciju ar di- un poliamīniem bitumena dispersa vidē. Atkarībā no sintēzes veikšanas apstākļiem, reaģējošo komponentu koncentrācijas un ķīmiskās uzbūves ir iespējams regulēt struktūrveidošanas procesus bitumena dispersā vidē un iegūt PMB ar nepieciešamiem tehniskiem parametriem.

5.6. Modificēta bitumena termostabilitāte, novecošanas izpēte un analīze

Bitumena uzlaboto (ar polimēriem) īpašību zaudēšana novecošanas dēļ nevar tikt pieļauta. Saistvielas novecošana, papildus nogurumam, ir viena no galvenajiem iemesliem asfalta seguma sabrukšanai. Novecošana neatgriezeniski izmaina saistvielas reoloģiskas īpašības un līdz ar to arī visa asfalta kopumā.

Novecošanas procesa būtība ir sekojoša. Dažādi bojājumi - gaisa poras, smalkas agregāta daļiņas, dažādu piedevu atšķirīgas fāzes - kas rodas asfalta segumā,

darbojas kā spriegumu koncentratori, kas var izraisīt mikro un makro plaisu rašanos, kas sāk izplatīties. Papildus tam, elastīgiem materiāliem piemīt tendence uz plastisko deformāciju rašanās apkārt plaisas zonai, kas palielinās līdz materiāla pilnīgai sagrūšanai [1].

Novecošanas process atšķiras atkarībā no bitumena izcelsmes un sastāva. Saistvielas ir pakļautas termiskiem un oksidatīviem spriegumiem jau izgatavošanas procesā. Pirmās ievērojamās izmaiņas tiek novērotas maisīšanas procesā, otrās – kas asfalts ir izmantots kā segas sastāvdaļa [9]. Paskaidrojums pirmajām ievērojamām izmaiņām: asfalta izgatavošanas procesā bitumens stipri ir pakļauts oksidācijai, jo tā virsma ir nepārtraukti mainīga. Šis process ir atkarīgs no maisītāja tipa. Daudzi perifēriski apstākļi ietekmē bitumena trauslumu asfalta izgatavošanas procesā. Pildvielas (šķembas), kuras tika izžāvētas pārāk augstā temperatūrā, var radīt negatīvu efektu, jo plānā saistvielas plēve uz pildvielas daļiņas sacietē pārāk ātri (saistoša efekta samazināšanās). Tas ir viens no svarīgākajiem faktoriem termisko spriegumu samazināšanai, līdz ar to ilgajai novecošanai ir nepieciešams ievērot maksimālo maisīšanas temperatūru, kuru norāda bitumena ražotājs [9].

Arī maisījuma uzglabāšana ietekmē novecošanas procesu. Maisījuma īss uzglabāšanas periods karstos silosos izskaidro, kāpēc saistvielas īpašības, kas noteiktas ar tradicionāliem paņēmieniem, mainās pavisam nelielā uzglabāšanas laikā, bet tomēr uzglabāšanas temperatūrai un gaisa iedarbībai ir svarīga loma. [9].

Runājot par asfaltu, kas atrodas ekspluatācijas apstākļos, liela ietekme ir klimatiskiem apstākļiem uz seguma novecošanas procesu. Skābekļa iedarbība novecošanas procesā pārsvarā iedarbojas uz seguma virsmu (t.i., uz dilumkārtu). Novecošana UV staru iedarbības rezultātā ir līdzvērtīga oksidācijas iedarbībai, tāpēc asfalta dilumkārtas ekspluatācijas laikā kļūst trauslāka nekā saistes kārtā. Tomēr testu rezultāti parāda, ka trauslums piemīt arī saistes kārtai. Izskaidrojums tam varētu būt liels poru skaits asfalta saistes kārtā. Saistvielas oksidāciju īpaši ietekmē poru izmēri: jo lielākas poras, jo vairāk skābekļa var nokļūt kārtā un jo lielāka oksidācijas iespēja rodas [9].

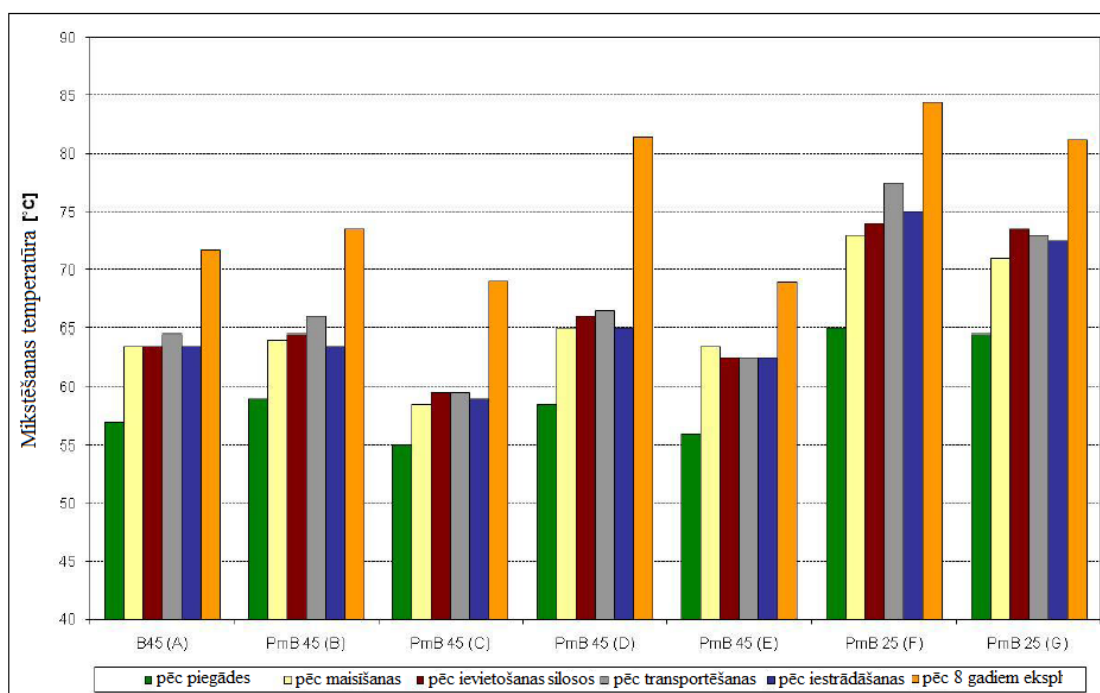
Balstoties uz Braunšvaigas universitātes (*Braunschweig University of Applied Sciences*) veikta pētījuma, tika konstatēts, ka polimērm modificētam bitumenam piemīt ievērojami labāki īpašību rādītāji ceļu seguma dzīves ciklā. PmB25 ar augstāku viskozitāti uzrāda lielākas savu īpašību izmaiņas (pēc elastības pārbaudēm) salīdzinājumā ar PmB65, kas ir ar zemāku viskozitāti [9]. Pētījuma ietvaros tika veikts

mēģinājums noteikt polimēru daudzumu modificētā bitumenā pēc 8 gadus ilgas ekspluatācijas. Polimēru daudzums polimērmodificētos bitumenos tika noteikts ar infrasarkanu spektroskopijas paņēmieni, kas sniedz iespēju noteikt vairākus polimērus un diezgan precīzi konstatēt to koncentrāciju. Bet mēģinājums noteikt polimēru daudzumu bitumenā, kas tika ekspluatēts 8 gadus, nesniedza nekādus datus par polimēru daudzuma izmaiņām. 12. tabulā un 25. attēlā ir dots Braunšvaigas universitātes pētījuma apkopojums:

Tabula 12

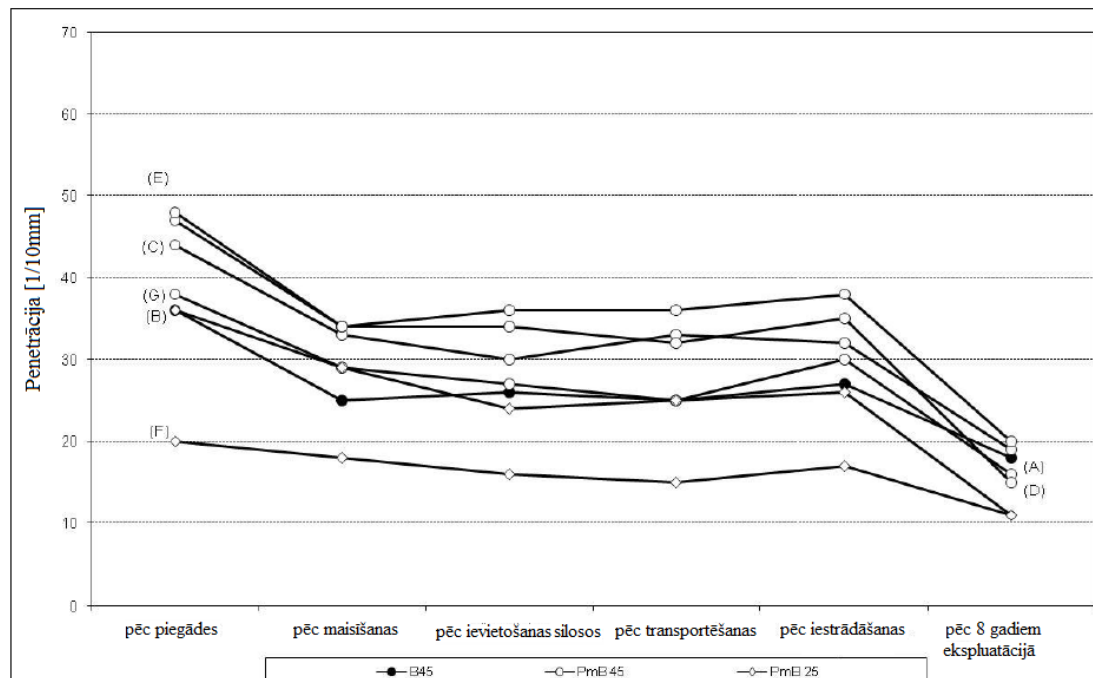
Mīksttapšanas temperatūras izmaiņa PMB bitumeniem ražošanas
transportēšanas un ekspluatācijas laikā [9]

Bitumena tips	Produkts	Mīkstēšanas temperatūra [°C]					
		Pēc piegādes	Pēc maisīšanas	Pēc ievietošanas silosos	Pēc transportēšanas	Pēc iestrādāšanas un sablīvējuma	Pēc 8 gadiem ekspluatācijā
B45	(A)	57,0	63,5	63,5	64,5	63,5	71,7
PmB 45	(B)	59,0	64,0	64,5	66,0	63,5	73,5
	(C)	55,0	58,5	59,5	59,5	59,0	69,0
	(D)	58,5	65,0	66,0	66,5	65,0	81,4
	(E)	56,0	63,5	62,5	62,5	62,5	68,9
PmB 25	(F)	65,0	73,0	74,0	77,5	75,0	84,4
	(G)	64,5	71,0	73,5	73,0	72,5	81,2



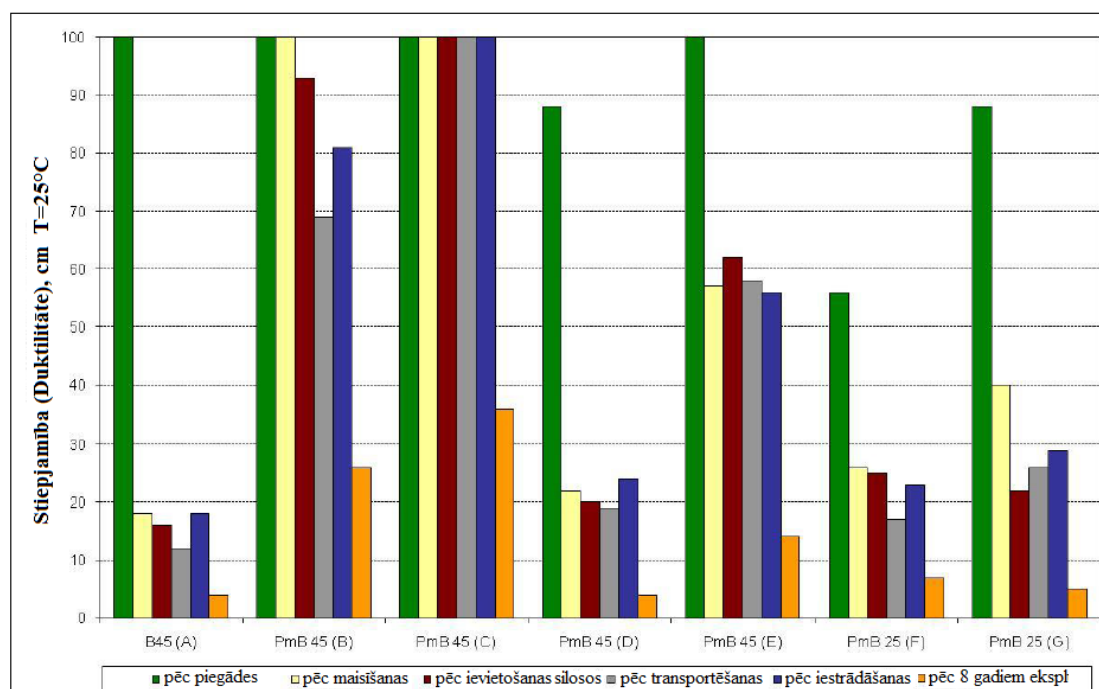
25. att. Mīkstapšanas temperatūras izmaiņas [9]

26. attēlā parādīta testēto PMB bitumenu penetrācijas izmaiņa



26. att. Penetrācijas izmaiņas [9]

27. attēlā parādīta testēto PMB bitumenu stiepjamības (duktilitātes) izmaiņa



27. att. PMB bitumenu stiepjamības (duktilitātes) izmaiņa [9]

5.7. Apkopojums un secinājumi par 5. nodaļu

Bitumena dispersās sistēmas struktūras izmaiņa pēc modifikatora pievienošanas

Starp SBS un bitumena komponentiem **nepastāv ķīmiskas saites**, jo tiem ir izotropas mijedarbības raksturs. Stirols un butadiens, izšķīstot bitumena eļļās, absorbē tās komponentes, kas pārsvarā ir maltēnu sastāvdaļas, un izveido fāzi ar lielu polimēru daudzumu. Otrā fāze sastāv no asfaltēniem ar pārpalikušiem maltēniem. Šī īpašība ievērojami samazina PMB bitumena termostabilitātes spēju (uzglabāšanas stabilitātes spēju).

Viens no perspektīvākiem virzieniem bitumena modifikācijā ir oligomēru (epoksīdsveķu) ievadīšana bitumena dispersā vidē. Epoksīd- un hidroksilgrupu **ķīmiskās mijiedarbības** rezultātā sveķos tiek izveidota telpiskā struktūra. Šis ķīmiskās mijiedarbības rezultāts veicina epoksīdsveķu sacietēšanu. Pēc polimerizācijas reakcijas PMB iegūst cietas vielas īpašības, kam piemīt **augstas adhēzijas spējas**, tomēr tas nesniedz iespēju iegūt materiālu ar augstām elastības spējām. Tāpēc optimāls risinājums būtu modificēt bitumenu ar epoksīdsveķiem un plastifikatoru (kombinācija). Tomēr naftas frakciju kā plastifikatoru ievadīšana var pārtraukt koloidālās sistēmas līdzsvaru,

kas izpaužas bitumena fizikāli-mehānisko īpašību izmaiņā un tiek izskaidrots ar to, ka tiek izmainīta (pasliktināta) bitumena dispersās vides termostabilitātes spēja. Savukārt plastifikatoru uz aminoskābju atvasinājumu bāzes klātbūtne noved pie bitumena dispersās sistēmas komponentu polaritātes pieauguma, kas paaugstina bitumena un minerālmateriāla adhēzijas spēkus. Papildus šis piedevas stimulēs epoksīdsveķu sacietējumu bitumena dispersā vidē, kas paaugstinās elastīgi – plastiskās PMB īpašības.

Alternatīvs bitumena modifikācijas veids ir polimēru sintēze bitumena dispersā vidē. Galvenā tādas modifikācijas priekšrocība ir tas, ka, sintezējot polimēru bitumena dispersā vidē, **tiek panākta optimāla PMB komponentu savietojamība**. Viens no piemēriem ir poliamīdi - daudzmolekulārie savienojumi, kuru īpašības plaši mainās atkarībā no ķīmiskas uzbūves. Amīd- grupu ievadīšana bitumena dispersā vidē veicina *labāku PMB saķeri ar minerālmateriālu, kuram ir skābas dabas virsma, paaugstinot to no 20% līdz 75%*. Līdz ar to atkarībā no sintēzes veikšanas apstākļiem, reaģējošo komponentu koncentrācijas un ķīmiskās uzbūves ir iespējams regulēt struktūrveidošanas procesus bitumena dispersā vidē un iegūt PMB ar nepieciešamiem tehniskiem parametriem.

Modificēta bitumena termostabilitāte

Analizējot pasaules pieredzi, ir secināts, ka uzglabāšanas stabilitāte ir atkarīga:

- 1) No PMB struktūras: PMB struktūra ar nepārtrauktu polimēra fāzi neuzrāda vai uzrāda nenožīmīgu fāžu sadalījumu uzglabāšanas laikā, tomēr šo struktūru veidošanai nepieciešams liels polimēra saturs (līdz 5 – 10%), kas ievērojami sadārdzina PMB un asfaltbetona cenu.
- 2) No polimēra dispersitātes:
 1. Ja polimērdaliņu izmēri ir mazāk par 0.001mm, tad šim maisījumam ir labi radītāji uzglabāšanas stabilitātes testā;
 2. Ja daļiņu izmēri ir 0.001-0.01mm, tad nepieciešamā uzglabāšanas stabilitāte nav sasniedzama;

Ja daļiņu izmēri pārsniedz 0.01mm, tad mēdz notikt absolūta sadalīšana.

6. PERFORMANCE GRADE BITUMENU KLASIFIKĀCIJAS SISTĒMA

6.1. Penetrācijas klasifikācijas sistēma

Bitumena klasifikācija pēc penetrācijas 25 °C ir pirmā izstrādātā klasifikācijas sistēma un to joprojām lieto dažu valstu autoceļu aģentūras. Penetrācijas klasifikācijas sistēma tika izstrādāta 20. gadsimta sākumā un to lieto vidēji cieta bitumena konsistences noteikšanai. Saskaņā ar Vašingtonas štata transporta departamenta izdotajām 2003. gada specifikācijām, penetrācijas klasifikācijas sistēma izvērtē sekojošas bitumena īpašības:

- 1) Penetrāciju 25 °C;
- 2) Uzliesmošanas temperatūru;
- 3) Lokanību 25 °C;
- 4) Šķīdību trihloretilēnā;
- 5) *Thin film oven test* (imitē īslaicīgo bitumena novecošanu);
- 6) Paliekošo penetrāciju (pēc *Thin film oven test*);
- 7) lokanību 25 °C (pēc *Thin film oven test*). [35, 36]

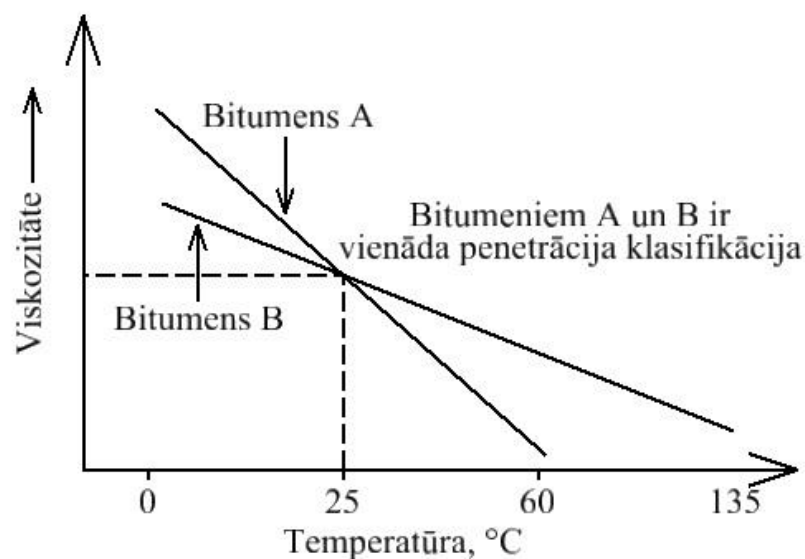
Penetrācijas klasifikācijas pamata pieņēmums ir – jo mazāk viskozs bitumens, jo dziļāk tajā iegrimst adata. Iegrimmes dziļums ir empīriski saistīts ar bitumena ekspluatācijas īpašībām. Balstoties uz penetrācijas klasifikācijas sistēmu, bitumeni ar augstām penetrācijas vērtībām tiek pielietoti zemas temperatūras klimata apstākļos, bet bitumeni ar zemām penetrācijas vērtībām tiek pielietoti augstas temperatūras klimata apstākļos. [35, 36]

Penetrācijas klasifikācija veidojas pēc tā, cik dziļi bitumenā iegrimst adata (viena penetrācijas vienība – 0.1 mm). Bitumenā ar penetrāciju 70/100 adata iegrimst no 7 līdz 10 mm. 28. attēlā parādīta penetrācijas testēšanas iekārta. Nacionālā naftas bitumena tirdzniecības asociācija Bitumena institūts (*The Asphalt Institute*) rekomendē bitumena ar 120/150 pen. līdz 85/100 pen. lietošanu teritorijās, kur gada vidējā gaisa temperatūra ir 7 °C un zemāka, bitumena ar 85/100 pen. līdz 60/70 pen. teritorijās, kur gada vidējā gaisa temperatūra ir robežās no 7 °C līdz 24 °C un bitumena ar 60/70 pen. līdz 40/50 pen. teritorijās, kur gada vidējā gaisa temperatūra ir augstāka par 24 °C. [35, 36]



28. att. Penetrācijas testēšanas iekārta [20]

Saskaņā ar vairumu specifikāciju, kuras balstītas uz penetrācijas klasifikācijas metodi, vienīgais bitumena konsistences rādītājs ir adatas penetrācija 25 °C. Tā kā bitumena īpašības netiek izvērtētas citās temperatūrās, netiek ņemtas vērā arī asfaltbetona ekspluatācijas īpašības temperatūras ietekmē. Diviem bitumeniem ar vienādu penetrāciju var būt krasi atšķirīga viskozitāte citās temperatūrās, kā tas ir parādīts 29. attēlā. Tas nozīmē, ka ar penetrācijas noteikšanu 25 °C nepietiek, lai pārlicinātos, ka bitumenam būs nepieciešamā viskozitāte ekspluatācijas temperatūrās. [35, 36]



29. att. Viskozitātes atšķirība diviem pēc penetrācijas klasifikācijas vienādiem bitumeniem [35, 36]

Galvenās penetrācijas klasifikācijas sistēmas priekšrocības un trūkumi apkopoti 13. tabulā.

Tabula 13

Penetrācijas klasifikācijas sistēmas priekšrocības un trūkumi [35]

Priekšrocības	Trūkumi
Uzrāda labāku korelāciju ar bitumena īpašībām zemās temperatūrās nekā viskozitātes tests, ko veic 60 °C.	Tests ir empīrisks un neuzrāda tādu bitumenam svarīgu īpašību kā viskozitāti.
Bitumena reoloģisko īpašību izmaiņas temperatūras ietekmē var tikt noteiktas, veicot testēšanu atšķirīgās temperatūrās.	Testa laikā bīdes spēki ir mainīgi un augsti, un tā kā bitumens 25 °C neuzvedas kā Ņūtona šķidrums, tas ietekmē testa rezultātu.
Tests ir ātrs un lēts, tātad viegli lietojams lauka apstākļos.	Bitumena reoloģisko īpašību izmaiņas nevar tikt noteiktas ar 1 testa palīdzību.
	Tests nesniedz informāciju par ražošanas un iestrādāšanas temperatūrām.

6.2. Viskozitātes klasifikācijas sistēma

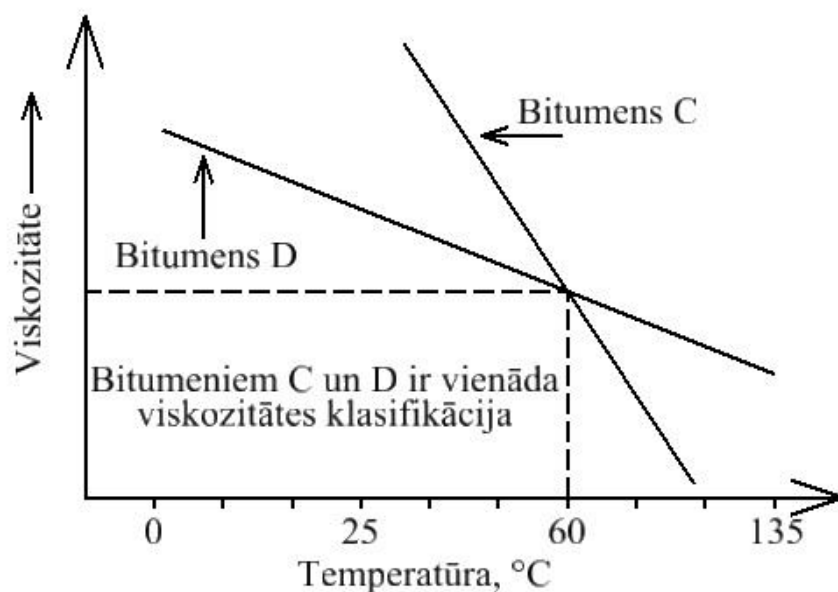
20. gadsimta sešdesmitajos gados tika izstrādāta bitumenu klasifikācijas sistēma pēc viskozitātes rādītājiem. Sākumā gan tika mēģināts klasificēt bitumenu pēc viskozitātes 25 un 20 °C, tomēr viskozitātes mērīšana tik zemās temperatūrās bija

problemātiska. Vēlāk testēšanas temperatūra tika pacelta līdz 60 °C, kas aptuveni atbilda augstākajai temperatūrai, kādu var sasniegt asfaltbetona segums ekspluatācijas laikā. Ar laiku viskozitātes klasifikācijas sistēma sāka nomainīt penetrācijas klasifikācijas sistēmu. Saskaņā ar Vašingtonas transporta departamenta izdotajām 2003. gada specifikācijām, viskozitātes klasifikācijas sistēma izvērtē sekojošas bitumena īpašības:

- 8) Viskozitāti 60 °C;
- 9) Viskozitāti 135 °C;
- 10) 100 g smagas adatas 5 sekunžu penetrāciju 25 °C;
- 11) Uzliesmošanas temperatūru;
- 12) Lokanību 25 °C;
- 13) Šķīdību trihloretilēnā;
- 14) *Thin film oven test* (imitē īslaicīgo bitumena novecošanu);
- 15) Viskozitāti 60 °C (pēc *Thin film oven test*);
- 16) Lokanību 25 °C (pēc *Thin film oven test*). [35]

Bitumenu klasificēšana ar viskozitātes klasifikācijas sistēmu var tikt veikta uz svaigiem bitumena paraugiem (AC klasifikācija) un paraugiem, kas jau izgājuši *Thin film oven test*. (AR klasifikācija) Klasificējot svaigu bitumena paraugu, tiek noteiktas īpašības, kas bitumenam piemīt pirms tā iestrādes karstā asfaltbetona maisījumā, bet klasificējot bitumenu pēc *Thin film oven test*, tiek noteiktas bitumena īpašības pēc iestrādes karstā asfaltbetona maisījumā, tādā veidā cenšoties pietuvināt rezultātus tiem, kādus bitumens uzrāda ekspluatācijas laikā. [35, 36]

Svaiga bitumena parauga klasifikācija atkarīga no tā, cik liela ir bitumena viskozitāte 60 °C 100 Pa·s vienībās. Bitumena parauga ar viskozitātes klasifikāciju AC-20 absolūtā viskozitāte ir 2.000 ± 400 Pa·s 60 °C. AC-20 bitumens to rupji pārveidojot uz penetrācijas klasifikācijas sistēmu, atbilst 60/70 penetrācijas klases bitumenam, tomēr, temperatūras jūtīguma un ne-Ņūtoniskas bitumena uzvedības dēļ, pārveidošana no viskozitātes uz penetrācijas sistēmu dažādiem bitumeniem var būt atšķirīga. 30. attēlā parāda, kā mainās divu, pēc viskozitātes klasifikācijas sistēmas vienādu bitumenu, viskozitāte temperatūras ietekmē. Lai varētu kontrolēt šo atšķirību, tika ieviestas minimālās penetrācijas 25 °C un minimālās viskozitātes 135 °C prasības. [35, 36]



30. att. Viskozitātes atšķirība diviem pēc viskozitātes klasifikācijas vienādiem bitumeniem [35]

Galvenās viskozitātes klasifikācijas sistēmas priekšrocības un trūkumi apkopoti 14. tabulā.

Tabula 14

Viskozitātes klasifikācijas sistēmas priekšrocības un trūkumi, [36]

Priekšrocības	Trūkumi
Atšķirībā no penetrācijas dziļuma, viskozitāte ir fundamentāls inženierzinātņu parametrs.	Precīzi neatspoguļo reoloģijas īpašības zemās temperatūrās.
Testēšanas temperatūras labi korelē ar vidējo seguma temperatūru (25 °C), augstāko seguma temperatūru (60 °C) un asfaltbetona ražošanas temperatūru (135 °C).	Pēc AC klasifikācijas vienādi bitumeni uzrāda atšķirīgus rezultātus AR klasifikācijā, tātad bitumeni ar vienādu AC klasifikāciju var uzrādīt atšķirīgas ekspluatācijas īpašības.
Tiek noteiktas bitumena reoloģisko īpašību izmaiņas temperatūras ietekmē, testējot bitumenu trīs dažādās temperatūrās.	Salīdzinājumā ar penetrācijas testu, testēšana ir dārgāka un aizņem ilgāku laiku.

6.2.1. Strategic Highway Research Program

No 1987. līdz 1992. gadam Amerikas Savienotajās Valstīs tika izvēsta vērienīga 150 miljonus dolāru vērtā pētniecības programma ar nosaukumu *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, kuras galvenais mērķis bija uzlabot Amerikas Savienoto Valstu autoceļu sistēmas ekspluatācijas īpašības, izturību, drošību un efektivitāti. 53 miljonus dolāru vērtā bitumena pētniecības programma bija lielākā *SHRP* ietvaros izstrādātā programma, un tai bija trīs primārie uzdevumi:

- 1) Noskaidrot kāpēc vieni asfaltbetona segumi uzrāda labas ekspluatācijas īpašības, bet citi nē;
- 2) Izstrādāt testus un specififikācijas materiāliem, kuru ekspluatācijas īpašības un ilgmūžība būs pārāka par esošajiem materiāliem;
- 3) Sadarbojoties ar autoceļu aģentūrām un industriju kopumā, veikt pāreju uz jaunizstrādātajām specififikācijām. [35]

Bitumena pētniecības programmas gala produkts bija *Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements)* sistēma, kurai *SHRP* noslēgumā bija trīs galvenās sastāvdaļas:

- 1) Jaunas ceļu bitumena specififikācijas – *Performance Grade (PG)* ceļu bitumena specififikācijas;
- 2) Asfaltbetona projektēšanas un analizēšanas metode balstīta uz asfaltbetona maisījuma tilpuma īpašībām – *Superpave* asfaltbetona maisījumu projektēšanas metode;
- 3) Asfaltbetona maisījumu analīzes testi un ekspluatācijas īpašību paredzēšanas modeļi (testu izstrāde noslēdzās 2004. gadā). [35]

6.2.2. PG klasifikācijas sistēmas raksturojums

Amerikas Savienoto Valstu ceļu būvniecībai paredzētie bitumeni tradicionāli tika klasificēti pēc penetrācijas un/vai viskozitātes sistēmām. Lai gan šīs sistēmas bija plaši pielietotas, tām bija ierobežotas iespējas pilnībā novērtēt bitumena ekspluatācijas īpašības karstā asfaltbetona maisījumos. Tāpēc *Superpave* ietvaros tika izstrādāta jauna bitumena klasifikācijas sistēma *Performance Grade (PG)*, kuras testēšanas metodes un specififikācijas bija speciāli paredzētas karstā asfaltbetona maisījuma ekspluatācijas īpašību novērtēšanai. [35]

PG klasifikācijas sistēma ir balstīta uz ideju, ka asfaltbetona saistvielas īpašībām ir jābūt saistītām ar apstākļiem, kādos saistviela tiks ekspluatēta. Tāpēc PG sistēma paredz vairākus testus, kurus bitumenam jāiztur dažādās temperatūrās, kuras atbilst vietai, kur bitumens tiks ekspluatēts. PG klasifikācijas sistēmā bitumeni tiek klasificēti pēc temperatūras diapazona, kurā bitumens uzrāda atbilstošas īpašības – pietiekamu elastību zemās un pietiekamu stingumu augstās temperatūrās – tāpēc var uzskatīt, ka PG sistēma ir labākā klasifikācijas sistēma, tomēr tā ir arī dārgāka klasifikācijas sistēma [35]

6.2.3. PG nomenklatūra

Performance Grade savā nomenklatūrā lieto 2 ciparus. Pirmais cipars norāda vidējo maksimālo septiņu dienu asfaltbetona temperatūru °C, bet otrs - minimālo asfaltbetona temperatūru °C. Piemēram, bitumens ar klasifikāciju PG 64-28 ir paredzēts lietošanai ekspluatācijas apstākļos, kur asfaltbetona vidējā maksimālā septiņu dienu temperatūra ir 64 °C un asfaltbetona minimālā temperatūra ir -28 °C. [37, 38]

Darbības temperatūras diapazons nosaka vai dotai bitumena klasei ir vajadzīga modifikatora pievienošana. Piemēram, PG 64-28 bitumenam darbības temperatūras diapazons ir 92 °C ($64 + 28 = 92$). Parasti saistvielām ar darbības temperatūras diapazonu 92 °C vai vairāk ir nepieciešams kāda veida modifikators (skat. 31. att.). [37, 38]

		Augstākā temperatūra, °C				
		52	58	64	70	76
Zemākā temperatūra, °C	-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16
	-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22
	-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28
	-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34
	-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40

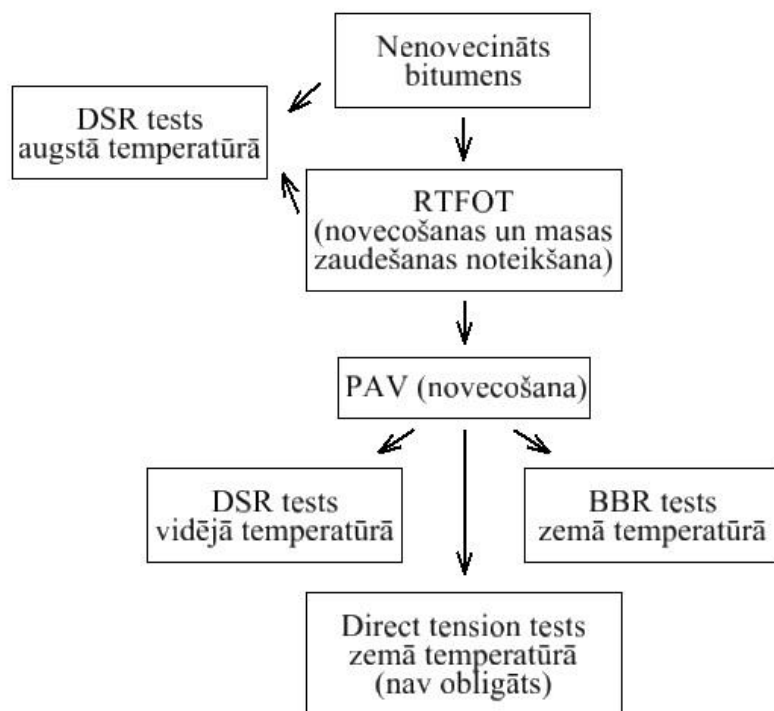
	Jēlnafts
	Augstas kvalitātes jēlnafts
	Nepieciešams modifikators

31. att. PG klases dažādiem bitumeniem, [37, 38]

6.2.4. PG testēšanas paņēmieni

Lielākā daļa PG testu ir saistīti ar bitumena reoloģijas īpašībām. Reoloģija ir zinātne, kas pēta kā materiāls plūst (materiāla īpašību izmaiņu laikā), tātad reoloģisks tests ir tāds, kurš novērtē vienu vai vairākus veidus, kā plūst materiāls. Gan *Dynamic Shear Rheometer (DSR)* tests, gan *Bending Beam Rheometer (BBR)* tests mēra bitumena plūšanas īpašības – DSR temperatūrās no 10 līdz 82 °C, bet BBR temperatūrās no -20 līdz 0 °C. [39]

Bitumens var tikt raksturots, izmantojot reoloģiskās īpašības, tomēr ar šo īpašību noteikšanu nepietiek, lai raksturotu bitumena uzvedību ekspluatācijas laikā, jo tas asfaltbetona izgatavošanas, transportēšanas, ieklāšanas un pat ekspluatācijas laikā noveco un kļūst cietāks. Tāpēc ir vajadzīgas metodes, ar kurām simulēt bitumena novecošanu. PG sistēmas ietvaros tiek lietotas divas bitumena novecināšanas metodes – *Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)* un *Pressure Aging Vessel (PAV)*. Secība, kādā šie testi tiek lietoti kopā ar reoloģijas testiem, parādīta 32. attēlā. DSR tests augstā temperatūrā tiek pielietots gan uz svaigu bitumenu, gan uz atlikušo bitumenu pēc RTFOT. RTFOT atlikums tālāk tiek novecināts PAV un atlikums no PAV tiek pakļauts papildus testiem. PAV atlikums vienmēr tiek pakļauts DSR testam vidējā temperatūrā un BBR testam zemā temperatūrā. Dažkārt PAV atlikums tiek pakļauts arī *Direct tension* testam, kas mēra bitumena plaisāšanas īpašības zemās temperatūrās. *Direct tension* tests ir noderīgs, klasificējot modificētus bitumenus ar neierasti augstu stiprību un stingrību, kas uzlabo bitumena īpašības zemās temperatūrās. [39]



32. att. PG testu izpildes secība [39]

Papildus iepriekš minētajām testēšanas metodēm, tiek testēta arī bitumena viegliestrādājamība. Šī testa laikā nenovecinātu bitumenu pārbauda, izmantojot rotācijas viskozometru (RV vai RTV). [39]

6.2.4.1. RTFOT

RTFOT simulē bitumena īslaicīgo novecošanu, kas notiek asfaltbetona izgatavošanas, piegādes un ieklāšanas laikā. Procedūras laikā 35 gramu bitumenu tiek uzmanīgi nosvērti stikla traukos un ievietoti speciāli izstrādātās krāsns apļveida plauktā. 163 °C plaukts lēnām rotē stikla traukus. Vienu reizi katrā apgriezienā traukos tiek iepūsta gaisa strūkļa. Pēc 75 minūtēm stikla traukus izņem no krāsns, atdzesē un nosver. Tiek noteikts procentuālais masas zudums, kas norāda uz to, cik daudz vieglās eļļas ir iztvaikojušas. Liels masas zudums norāda, ka bitumenam ir tieksme novecošanas rezultātā kļūt stingākam, sarauties un plaisāt. 33. attēlā parādīta *RTFOT* krāsns. [38]



33. att. *RTFOT* krāsns

6.2.4.2 PAV

PAV simulē bitumena ilglaicīgo novecošanu, kas notiek asfaltbetona ekspluatācijas laikā. Procedūras laikā tērauda pannas ar 125 mm diametru tiek piepildītas ar bitumenu, kas jau ir novecināts *RTFOT* krāsnī. Sešas šādas pannas tiek novietotas plauktā viena virs otras (sk. 34. att.) un ievietotas spiediena traukā, kuru ievieto krāsnī. Spiediena trauks ir izturīga tērauda kamera, paredzēta augsta spiediena un temperatūras, kas pielietotas *PAV* testā, izturēšanai. Augstās temperatūras un spiediens palīdz paātrināt bitumena novecošanu. *PAV* testa beigās bitumens ir novecojis tik pat daudz, cik tas novecotu vairāku gadu laikā asfaltbetonā ekspluatācijas apstākļos. [39]

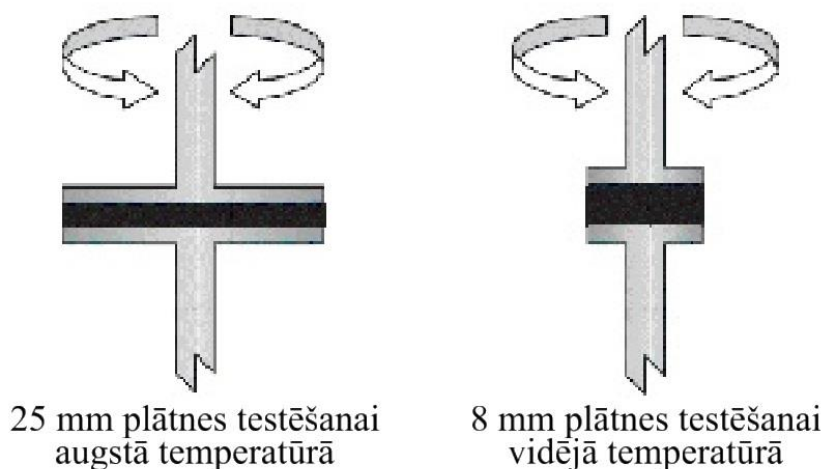


34. att. Plaukts ar pannām [39]

6.2.4.3. DSR tests augstā temperatūrā

Primārais mērķis *DSR* testam augstā temperatūrā ir nodrošināt, ka bitumenam būs atbilstošas īpašības augstās temperatūrās un tas spēs samazinās risu veidošanos asfaltbetonā. *DSR* ir griezes tests, kurā plāns asfalta paraugs tiek pakļauts cirpei starp divām apaļām plātnēm. *DSR* ir arī dinamisks tests, kas nozīmē, ka paraugs tiek cirpts ļoti ātri, griežot plātnes uz vienu un uz otru pusi. *DSR* testam augstās temperatūrās tiek lietotas plātnes ar 25 mm lielu diametru un aptuveni 1 mm biezi paraugi. 35. attēlā redzama *DSR* skice gan testam augstā, gan vidējā. Testu veic dažādās temperatūrās, atkarībā no asfalta klasifikācijas. Standarta temperatūras *DSR* testā ir 46, 52, 58, 64, 70, 76 un 82 °C. Pirmais cipars *PG* nomenklatūrā ir bitumena testēšanas temperatūra *DSR* testā augstā temperatūrā. [39]

DSR tests mēra gan dinamisko cirpes moduli (G^*), gan fāzes leņķi (δ). Modulis ir stinguma mērvienība – jo augstāka moduļa vērtība, jo stingāks bitumens. Fāzes leņķis norāda, cik šķidr ir materiāls – jo šķidrāks materiāls, jo lielāks fāzes leņķis. Elastīgam materiālam ir mazs fāzes leņķis, bet plastiskam – liels. *DSR* testam augstā temperatūrā tiek noteikta $G^*/\sin\delta$ vērtība kPa. Specifikācijās, izmantojot gan G^* , gan $\sin\delta$, vienlaicīgi tiek kontrolēts bitumena stingums un elastība. Stingiem un elastīgiem bitumeniem būs augstāks $G^*/\sin\delta$ rādītājs nekā mīksti un šķidriem bitumeniem. Pēc *PG* klasificētiem nenovecinātiem bitumeniem, kas testēti frekvencē 10 rad/s, nepieciešamajā temperatūrā $G^*/\sin\delta$ vērtībai jābūt vismaz 1.0 kPa. Pēc *RTFOT* minimālā $G^*/\sin\delta$ var būt 2.2 kPa. [39]



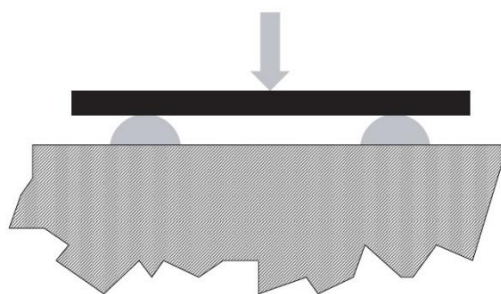
35. att. *DSR* testa skice augstā un vidējā temperatūrā [39]

6.2.4.4. DSR tests vidējā temperatūrā

DSR tests vidējā temperatūrā izmanto tos pašus principus kā *DSR* tests augstā temperatūrā, tomēr starp šiem testiem ir dažas svarīgas atšķirības. *DSR* tests vidējā temperatūrā ir radīts, lai izvairītos no tā, ka bitumēni vidējās temperatūrās kļūst pārāk stingi, kas var novest pie pārāgas asfaltbetona noguruma plaisāšanas. Šis tests palīdz noteikt arī bitumēna vispārīgās plūšanas īpašības. Tā kā vidējās temperatūrās bitumēns ir daudz stingāks, testā izmantotajām plāksnēm jābūt mazākām un bitumēna paraugam biezākam (skat. 35. att.). Tiek lietotas plātnes ar 8 mm lielu diametru un 2 mm biezi paraugi. *DSR* testā vidējā temperatūrā tiek noteikta $G^* \times \sin \delta$ vērtība, jo pētījumos ir pierādīta šīs vērtības saistība ar noguruma noturību karstā asfaltbetona maisījumos. Vidējās temperatūras *DSR* tests tiek veikts pēc *RTFOT* un *PAV*, temperatūras diapazonā no 4 līdz 40 °C, ar soli 3 °C. Maksimālā pieļaujamā $G^* \times \sin \delta$ vērtība testam, kas veikts ar frekvenci 10 rad/s, ir 5.0 kPa. [39]

6.2.4.5. BBR tests

BBR testa mērķis ir noteikt, vai bitumēns zemā temperatūrā nekļūst pārāk stingš un trausls. *BBR* tests ir lieces stinguma tests, kura laikā 1 minūti tiek slogota maza bitumēna sija, kuras deformācijas tiek izmērītas. No pieliktās slodzes un radušās deformācijas tiek aprēķināts šķūdes stingums. Analizējot *BBR* testa laikā iegūtos datus, tiek iegūts vēl viens lielums – m - vērtība – stinguma samazināšanās ātrums. Testējamais paraugs ir 125 mm garš, 12.5 mm plats un 6.25 mm biezs. Testu var veikt sekojošās temperatūrās - -36, -30, -24, -18, -12, -6 un 0 °C. Klasificējot bitumēnu, testu veic par 10 °C augstākā temperatūrā nekā zemākā klasifikācijas temperatūra. Piemēram, PG 64-22 bitumēnam *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 slogošana laikā. 36. attēlā parādīta *BBR* testa skice.



36. att. *BBR* testa skice [39]

6.2.4.6. Direct tension tests

Direct tension tests ir unikāls starp bitumenu klasifikācijā izmantotajiem testiem, jo tas ir plaisāšanas, nevis reoloģiskais tests. Procedūras laikā mazs bitumena paraugs tiek lēnām stiepts, kamēr tas pārplīst. 37. attēlā parādīts *direct tension* tests. Šo testu nedrīkst sajaukt ar penetrācijas un viskozitātes klasifikācijas sistēmās izmantoto lokanības testu, kas tiek izpildīts daudz augstākā temperatūrā pie daudz lielākām deformācijām un ir empīriskais tests, kurš nedod nekādu noderīgu informāciju par materiāla inženieriskajām īpašībām. *Direct tension* testa rezultāti ir deformācija un spriegumi, bitumenam sabrūkot. Šis tests tiek veikts ļoti zemās temperatūrās, ļoti lēni palielinot slodzi. Iegūtos rezultātus var izmantot zemas temperatūras radīto spriegumu analīzei, kas parāda temperatūru, kādā veidojas termiskās plaisas. Šī temperatūra tālāk tiek pielietota bitumena klasifikācijai pēc zemākās temperatūras. Galvenā *direct tension* testa un ar to saistīto analīžu priekšrocība, salīdzinājumā ar *BBR* testu, ir tā spēja precīzāk noteikt modificētu bitumenu zemākās temperatūras klasifikāciju. [39]



37. att. *Direct tension* testā izmantojamais paraugs, veidne un testēšanas iekārta [39]

6.2.4.7.RV tests

Rotācijas viskozometrs tiek pielietots, lai noteiktu bitumena viskozitāti augstās temperatūrās, kādām bitumens tiek pakļauts karstā asfaltbetona maisījuma ražošanas un izbūves laikā. RV testu var veikt dažādās temperatūrās, bet tā kā ražošanas un izbūves temperatūras visur ir diezgan līdzīgas un nav atkarīgas no klimata, parasti *Superpave PG* specifikācijās tests tiek veikts 135 °C. [40, 41]

Rotācijas viskozometrs nosaka griezes momentu, kāds ir nepieciešams, lai ar vienādu rotācijas ātrumu (20 apgriezieni minūtē) grieztu līdz 135 °C uzsildīta bitumena paraugā iegremdētu cilindrisku metāla vārpstu (skat. 38. att.). Dinamiskā viskozitāte, kas tiek mērīta Pa*s ir proporcionāla šim griezes momentam. Rotācijas viskozometrs automātiski konvertē griezes momentu uz dinamisko viskozitāti un parāda to uz iekārtas ekrāna. *Superpave* specifikācijās maksimālā RV vērtība nedrīkst pārsniegt 3 Pa*s. [40, 41]



38. att. Rotācijas viskozometrs, [41]

6.3. PG specifikācijas

Attēlos 39. – 41. parādītas prasības. kādām, saskaņā ar *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* specifikācijām, jāatbilst pēc PG klasificētam bitumenam. Šajās specifikācijās zemās temperatūras klasifikācija tiek noteikta pēc *BBR* testā iegūtā šļūdes stinguma un *m*-vērtības. Ja bitumena šļūdes stingums ir robežās no 300 līdz 600 MPa, šļūdes stinguma vietā var tikt lietotas *direct tension* testā iegūtās sabrukuma deformācijas vērtības. [42]

Binder Performance Grade:	PG 46			PG 52						PG 58					
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40
Design high pavement temperature, °C:	<46			<52						<58					
Design low pavement temperature, °C:	≥34	≥40	≥46	≥10	≥16	≥22	≥28	≥34	≥40	≥46	≥16	≥22	≥28	≥34	≥40
Test on Original Binder															
Flash Point Temperature (T 48), Min., °C	230														
Viscosity (T 316) Maximum value of 3 Pa-s at test temperature, °C	135														
Dynamic Shear (T 315) G*/sin δ, minimum value 1.00 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	46			52						58					
Tests on Residue from Rolling Thin Film Oven (T 240)															
Mass Loss, Maximum, %	1.00														
Dynamic Shear (T315) G*/sin δ, minimum value 2.20 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	46			52						58					
Tests on Residue from Pressure Aging Vessel (R 28)															
PAV Aging Temperature, °C	90			90						100					
Dynamic Shear (T 315) G* sin δ, maximum value 5,000 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Creep Stiffness (T 313) Stiffness, maximum value 300 Mpa m-value, minimum value 0.30, at 60 sec and Test Temperature, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30
Direct Tension (T 314) Failure strain, minimum value 1.0%, at 1.0 mm/min and Test Temperature, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30

39. att. PG bitumenu specifikācijas [42]

Binder Performance Grade:	PG 64						PG 70					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Design high pavement temperature, °C:	<64						<70					
Design low pavement temperature, °C:	≥10	≥16	≥22	≥28	≥34	≥40	≥10	≥16	≥22	≥28	≥34	≥40
Tests on Original Binder												
Flash Point Temperature (T 48), Min., °C	230											
Viscosity (T 316) Maximum value of 3 Pa-s at test temperature, °C	135											
Dynamic Shear (T 315) G*/sin δ, minimum value 1.00 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	64						70					
Tests on Residue from Rolling Thin Film Oven (T 240)												
Mass Loss, Maximum, %	1.00											
Dynamic Shear (T 315) G*/sin δ, minimum value 2.20 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	64						70					
Tests on Residue from Pressure Aging Vessel (R 28)												
PAV Aging Temperature, °C	100						100 (110)					
Dynamic Shear (T 315) G* sin δ, maximum value 5,000 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Creep Stiffness (T 313) Stiffness, maximum value 300 Mpa m-value, minimum value 0.30, at 60 sec and Test Temperature, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Direct Tension (T 314) Failure strain, minimum value 1.0%, at 1.0 mm/min and Test Temperature, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

40. att. PG bitumenu specifikācijas [42]

Binder Performance Grade:	PG 76					PG 82				
	−10	−16	−22	−28	−34	−10	−16	−22	−28	−34
Design high pavement temperature, °C:	<76					<82				
Design low pavement temperature, °C:	≥10	≥16	≥22	≥28	≥34	≥10	≥16	≥22	≥28	≥34
Tests on Original Binder										
Flash Point Temperature (T 48), Min., °C	230									
Viscosity (T 316) Maximum value of 3 Pa·s at test temperature, °C	135									
Dynamic Shear (T 315) G*/sin δ, minimum value 1.00 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	76					82				
Tests on Residue from Thin Film Oven (T 240)										
Mass Loss, Maximum, %	1.00									
Dynamic Shear (T 315) G*/sin δ, minimum value 2.20 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	76					82				
Tests on Residue from Pressure Aging Vessel (R 28)										
PAV Aging Temperature, °C	100 (110)					100 (110)				
Dynamic Shear (T 315) G* sin δ, maximum value 5,000 kPa, at 10 rad/s and Test Temperature, °C	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Creep Stiffness (T 313) Stiffness, maximum value 300 Mpa m-value, minimum value 0.30, at 60 sec and Test Temperature, °C	0	−6	−12	−18	−24	0	−6	−12	−18	−24
Direct Tension (T 314) Failure strain, minimum value 1.0%, at 1.0 mm/min and Test Temperature, °C	0	−6	−12	−18	−24	0	−6	−12	−18	−24

41. att. PG bitumenu specifikācijas [42]

PG priekšrocības

15. tabulā norādīti viskozitātes un penetrācijas klasifikācijas sistēmu trūkumi un kā PG sistēmas tos novērš.

Tabula 15

PG klasifikācijas sistēmas priekšrocības salīdzinājumā ar penetrācijas un viskozitātes klasifikācijas sistēmām [37]

Penetrācijas un viskozitātes klasifikācijas sistēmas	PG klasifikācijas sistēma
Penetrācijas un lokanības testi ir empīriski un nav tieši saistīti ar karstā asfaltbetona maisījuma ekspluatācijas īpašībām.	Noteiktās reoloģiskās īpašības ir tieši saistītas ar ekspluatācijas īpašībām.
Testēšana notiek vienā standarta temperatūrā, neņemot vērā klimata apstākļus, kādos tiks lietots bitumens.	Testēšanas kritēriji paliek nemainīgi, bet temperatūra, kādā tiem jāizpildās, mainās atkarībā no izvēlētas bitumena klases, kas noteikta atbilstoši klimata apstākļiem.
Netiek ievērtēts temperatūras diapazons, kādā darbosies bitumens.	Tiek ievērtēts viss temperatūras diapazons, kādā darbosies bitumens.
Tiek ņemta vērā tikai īslaicīgā novecošana.	Tiek simulētas un testētas trīs bitumena novecošanas stadijas - pirms sajaukšanas ar agregātu, pēc karstā asfaltbetona maisījuma izveides, pēc ilglaicīgās novecošanas.
Vienas klases bitumenu īpašības var ievērojami atšķirties.	Klasifikācijas ir daudz precīzāka un klašu pārklāšanās nav tik izteikta.
Modificētas saistvielas nav piemērotas šīm klasifikācijas sistēmām.	Klasifikācijas sistēma ir paredzēta gan parastiem, gan modificētiem bitumeniem.

6.4. PG sistēma Latvijā

6.4.1. Latvijas klimats

Latvijas teritorija atrodas mērenajā joslā Baltijas jūras un Rīgas jūras līča piekrastē, platuma grādos no 55 līdz 58 un garuma grādos no 20 līdz 28. Latvijas klimatu ietekmē tās ģeogrāfiskais stāvoklis un līdzenais reljefs, kas ļauj ieplūst dažādu virzienu atšķirīgām gaisa masām. Valdošās ir mēreno platumu gaisa masas (jūras un kontinentālās) un arktiskās gaisa masas. Latvijai raksturīga bieža gaisa masu maiņa, cikloniem mijoties ar anticikloniem. 150 – 160 dienu gadā Latvija atrodas anticiklonu ietekmē. Ar anticikloniem Latvijā ieplūst kontinentālās gaisa masas, kas siltajā periodā laikapstākļus padara karstākus un sausākus, bet aukstajā – aukstākus un saulainākus. Krasa temperatūras pazemināšanās (līdz -25°C , -30°C) ziemā visbiežāk ir saistīta ar anticiklonu ieplūšanu no Arktikas. [43]

Gaisa temperatūras atšķirību dažādās Latvijas vietās ietekmē reljefa lielformas. Augstienēs, sevišķi Vidzemes augstienē, atšķirībā no līdzenumiem raksturīga zemāka temperatūra un īsāks bezsala periods. Zemgales līdzenums, ko no jūras gaisa masām pasargā Kursas un Žemaitijas augstiene, ir siltākais un sausākais rajons Latvijā. Aukstākais gada mēnesis ir janvāris, bet karstākais – jūlijs. Gada vidējā temperatūra visaugstākā ir Baltijas jūras piekrastē un Austrumlatvijā, bet viszemākā Vidzemes augstienē.[43]

6.4.2. Seguma temperatūras noteikšana

Lai noteiktu asfaltbetona vidējo maksimālo septiņu dienu temperatūru un asfaltbetona minimālo temperatūru, no VSIA „Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs” tika iegūti dati par gaisa temperatūru 24 meteoroloģiskajās stacijās (Ainažos, Alūksnē, Bauskā, Daugavpilī, Dobelē, Gulbenē, Jelgavā, Kolkā, Liepājā, Madonā, Mērsragā, Pāvilostā, Priekullos, Rēzeknē, Rīgā, Rucavā, Rūjienā, Saldū, Skrīveros, Skultē, Stendē, Ventspilī, Zilānos un Zosēnos) laika periodā no 2005. gada 1. janvāra līdz 2009. gada 31. decembrim.

Asfaltbetona vidējā maksimālā septiņu dienu temperatūra tika noteikta pēc sekojoša algoritma:

- 1) Atrod katra gada karstāko septiņu dienu periodu;
- 2) No šī perioda augstākajām katras dienas gaisa temperatūras vērtībām aprēķina vidējo gada augstāko septiņu dienu gaisa temperatūru;

- 3) Aprēķina visu gadu vidējo gada augstāko septiņu dienu gaisa temperatūru vidējo vērtību un standartnovirzi;
- 4) Aprēķina vidējo maksimālo septiņu dienu gaisa temperatūru ar 98% ticamību;
- 5) Aprēķina asfaltbetona vidējo maksimālo septiņu dienu temperatūru. [44]
Asfaltbetona minimālā temperatūra tika noteikta pēc sekojoša algoritma:
 - 1) Atrod katra gada zemāko gaisa temperatūru;
 - 2) Aprēķina visu gadu zemāko gaisa temperatūru vidējo vērtību un standartnovirzi;
 - 3) Aprēķina minimālo gaisa temperatūru ar 98% ticamību;
 - 4) Aprēķina minimālo asfaltbetona temperatūru. [44]

16. tabulā dotas vidējās vērtības un standartnovirzes vidējai gada augstākajai septiņu dienu gaisa temperatūrai un zemākajai gaisa temperatūrai.

Tabula 16

Augstāko un zemāko gaisa temperatūru vidējās vērtības un standartnovirzes

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Augstākā gaisa temperatūra, °C		Zemākā gaisa temperatūra, °C	
	Vidējā vērtība	Standartnovirze	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Ainaži	25,30	2,23	-22,30	4,79
Alūksne	26,45	2,48	-24,14	4,48
Bauska	27,84	2,34	-22,52	5,97
Daugavpils	27,71	2,16	-25,22	5,05
Dobele	27,65	2,03	-21,40	4,61
Gulbene	27,00	2,61	-24,10	4,43
Jelgava	27,67	1,82	-23,70	5,61
Kolka	24,13	1,70	-14,24	3,85
Liepāja	25,86	1,09	-17,62	4,13
Madona	27,21	2,44	-23,36	5,83
Mērsrags	25,60	2,04	-19,30	5,49
Pāvilosta	25,47	1,78	-18,76	4,70
Priekuļi	26,65	2,44	-21,34	5,06
Rēzekne	27,35	2,09	-24,22	4,51

16. tabulas turpinājums.

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Augstākā gaisa temperatūra, °C		Zemākā gaisa temperatūra, °C	
	Vidējā vērtība	Standartnovirze	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Rīga	26,97	2,04	-19,56	4,61
Rucava	26,47	1,27	-19,36	3,80
Rūjiena	26,89	2,55	-23,58	4,54
Saldus	26,68	1,84	-22,06	4,78
Skrīveri	27,56	2,60	-24,00	4,96
Skulte	26,18	1,98	-21,32	5,01
Stende	26,30	2,08	-21,46	4,27
Ventspils	24,56	1,66	-16,82	3,83
Zīlāni	27,56	2,53	-23,66	5,09
Zosēni	26,17	2,70	-26,26	5,07

Vidējo maksimālo septiņu dienu gaisa temperatūru un minimālo gaisa temperatūru ar 98% uzticamību var aprēķināt, izmantojot vidējo vērtību un standartnovirzi. No statistikas ir zināms, ka 98% ticamība ir aptuveni divu standartnoviržu attālumā no vidējās vērtības. 17. tabulā dotas vidējās maksimālās septiņu dienu gaisa temperatūras un minimālās gaisa temperatūras ar 98% ticamību. [45]

Tabula 17

Maksimālo un minimālo gaisa temperatūru vērtības ar 98% ticamību

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Maksimālā gaisa temperatūra, °C	Minimālā gaisa temperatūra, °C
Ainaži	29,75	-31,88
Alūksne	31,41	-33,11
Bauska	32,52	-34,46
Daugavpils	32,03	-35,32
Dobele	31,71	-30,62
Gulbene	32,21	-32,97
Jelgava	31,32	-34,91
Kolka	27,52	-21,95
Liepāja	28,04	-25,89
Madona	32,08	-35,01
Mērsrags	29,69	-30,28
Pāvilosta	29,03	-28,16
Priekule	31,54	-31,46

17. tabulas turpinājums.

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Maksimālā gaisa temperatūra, °C	Minimālā gaisa temperatūra, °C
Rēzekne	31,53	-33,25
Rīga	31,06	-28,78
Rucava	29,00	-26,96
Rūjiena	31,98	-32,67
Saldus	30,35	-31,63
Skrīveri	32,75	-33,93
Skulte	30,14	-31,35
Stende	30,45	-30,01
Ventspils	27,88	-24,47
Zilāni	32,63	-33,85
Zosēni	31,57	-36,40

Asfaltbetona vidējo maksimālo septiņu dienu temperatūru 20 mm dziļumā var aprēķināt ar formulu:

$$T_{20\text{mm}} = 0.9545(T_{\text{air}} - 0.00618 * \text{lat}^2 + 0.2289 * \text{lat} + 42.2) - 17.78, \quad [46]$$

kur:

$T_{20\text{mm}}$ – asfaltbetona vidējā maksimālā septiņu dienu temperatūra 20 mm dziļumā (°C);

T_{air} – vidējā maksimālā septiņu dienu gaisa temperatūra (°C);

lat – platuma grādi.

Asfaltbetona minimālo temperatūru var aprēķināt ar formulu:

$$T_{\text{surf}} = 0.859 * T_{\text{air}} - 1.7, \quad [46]$$

Kur:

T_{surf} – asfaltbetona minimālā temperatūra (°C);

T_{air} – minimālā gaisa temperatūra (°C).

19. tabulā doti platuma grādi meteoroloģisko staciju atrašanās vietās, asfaltbetona vidējā maksimālā septiņu dienu temperatūra, asfaltbetona minimālā temperatūra un meteoroloģisko staciju atrašanās vietām atbilstošās bitumena PG klase.

Tabula 18

Platuma grādi, maksimālā un minimālā asfaltbetona temperatūra

Meteoroloģiskās stacijas atrašanās vieta	Platuma grādi	Maksimālā asfaltbetona temperatūra, °C	Minimālā asfaltbetona temperatūra, °C	PG bitumena klase
Ainaži	57,87	43,79	-25,68	PG 46-34
Alūksne	57,42	45,58	-26,74	PG 46-34
Bauska	53,92	48,18	-27,90	PG 52-28
Daugavpils	55,87	46,87	-28,64	PG 52-34
Dobele	51,50	48,37	-24,60	PG 52-28
Gulbene	57,17	46,46	-26,62	PG 52-28
Jelgava	56,65	45,84	-28,29	PG 46-34
Kolka	57,74	41,72	-17,15	PG 46-34
Liepāja	56,50	42,78	-20,54	PG 46-34
Madona	56,85	46,48	-28,38	PG 52-34
Mērsrags	57,33	43,97	-24,31	PG 46-34
Pāvilosta	56,89	43,54	-22,49	PG 46-34
Priekuļi	57,31	45,75	-25,32	PG 46-34
Rēzekne	56,50	46,11	-26,86	PG 52-28
Rīga	56,95	45,46	-23,02	PG 46-34
Rucava	56,16	43,84	-21,46	PG 46-34
Rūjiena	57,90	45,90	-26,36	PG 46-34
Saldus	56,67	44,91	-25,47	PG 46-34
Skrīveri	56,64	47,21	-27,45	PG 52-28
Skulte	57,32	44,41	-25,23	PG 46-34
Stende	57,15	44,79	-24,08	PG 46-34
Ventspils	57,38	42,22	-19,32	PG 46-34
Zīlāni	56,51	47,15	-27,38	PG 52-28
Zosēni	57,14	45,86	-29,57	PG 52-34

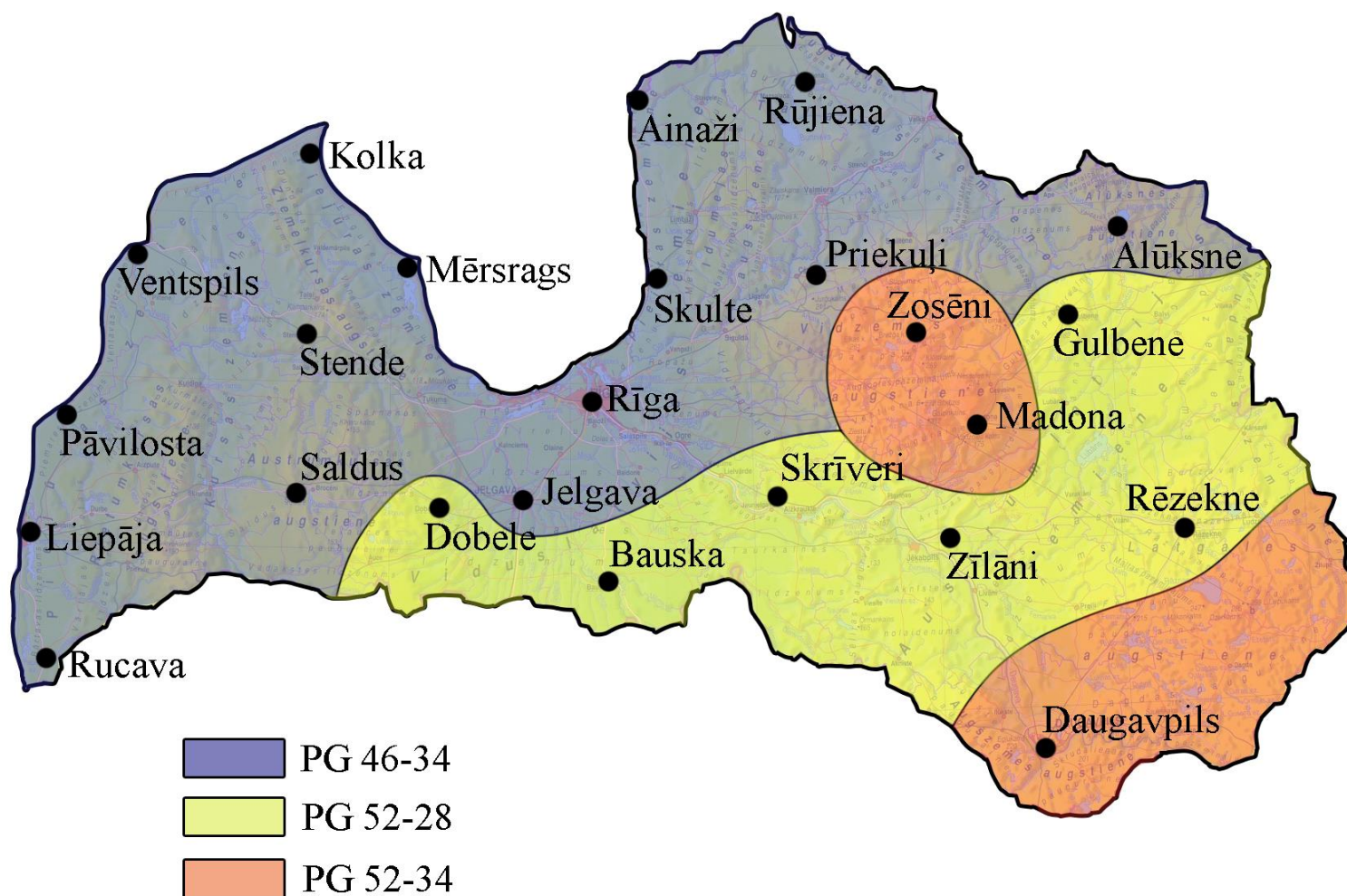
6.4.3. Bitumena klašu izvēle

Aprēķinātajām asfaltbetona temperatūrām atbilstoša bitumena izvēle tika veikta saskaņā ar *AASHTO* specifikācijām, kuras var apskatīt 16. – 18. tabulās.

Papildus asfaltbetona temperatūrai, izvēloties bitumena klases, *Superpave* piedāvā ņemt vērā transporta slodzes, kādas asfaltbetonam būs jāuzņem ekspluatācijas laikā. Ja tiek prognozēts, ka *Equivalent Single Axle Load (ESAL)* jeb ekvivalentās vienas standarta ass slodzes pārbraucieni skaits asfaltbetona kalpošanas laikā būs lielāks par 10 miljoniem, ieteicams izvēlēties 1 klasi augstāku bitumenu, bet, ja *ESAL* pārbraucieni skaits būs lielāks par 30 miljoniem - 2 klases augstāku bitumenu. Lēnas satiksmes gadījumā ieteicams izvēlēties 1 klasi augstāku bitumenu, bet stāvošas satiksmes gadījumā – 2 klases augstāku bitumenu. Tas nozīmē, ka, ja pēc klimata zonas jāizvēlas bitumena klase PG 52-34, bet asfaltbetonu paredzēts ieklāt vietā, kur paredzēta lēna satiksme, ieteicams izvēlēties bitumena klasi PG 58-34. [47]

6.5. Latvijas iedalīšana klimata zonās

Lai izveidotu Latvijas iedalījumu klimata zonās pēc *PG* sistēmas, ņemu vērā meteoroloģisko staciju informāciju un tām atbilstošās aprēķinātās bitumena klases. Veidojot klimata zonas, to robežas tika veidotas, ievērojot Latvijas klimata un reljefa īpatnības - analizētas augstieņu un zemieņu atrašanās vietas un to ietekme uz klimatu dažādos Latvijas reģionos. 42. attēlā redzams Latvijas iedalījums klimata zonās pēc *PG* sistēmas.



42. att. Latvijas iedalījums pēc PG sistēmas

6.6. Apkopojums un secinājumi par 6. nodaļu

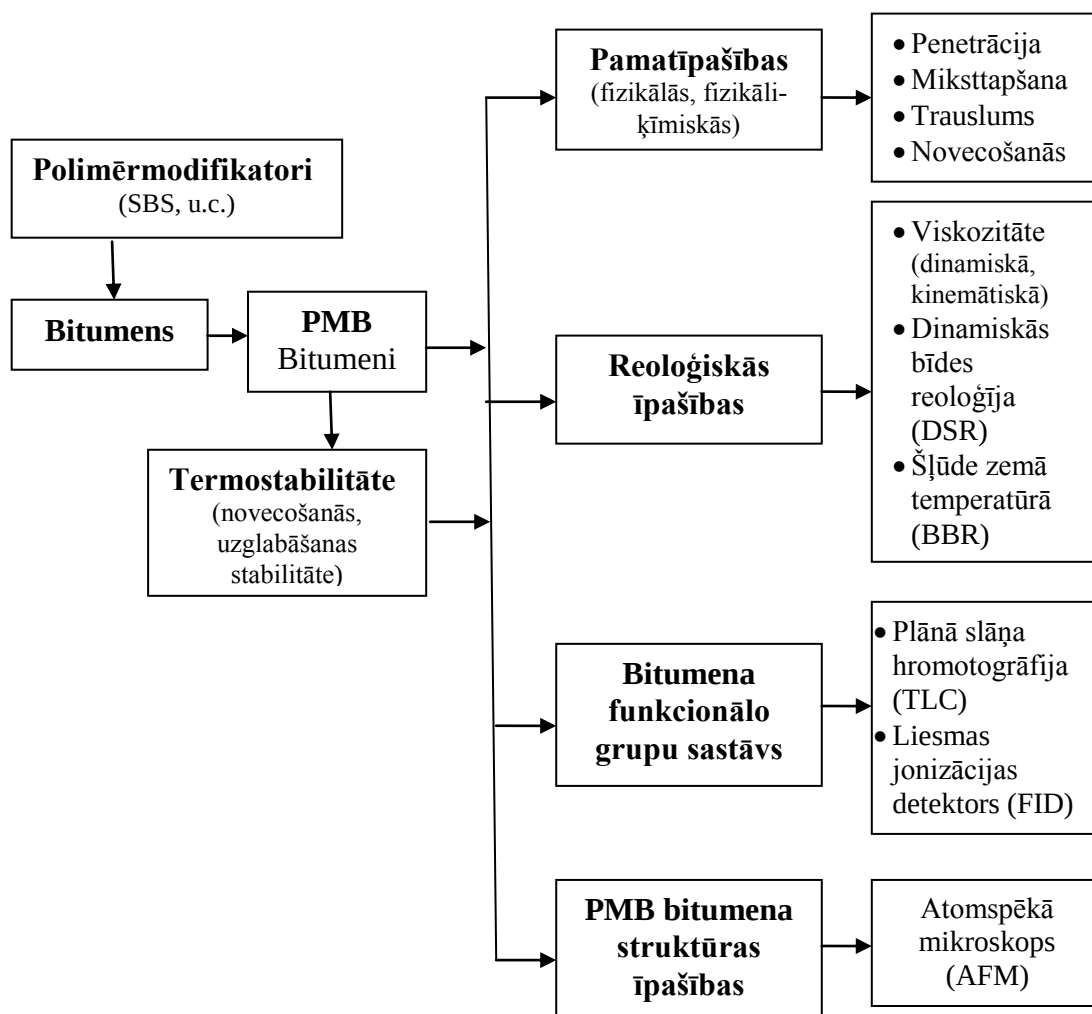
Pētījumā ir izveidots Latvijas iedalījums klimata zonās atbilstoši PG sistēmai - ir secināts, ka Latvijai ir piemērotas trīs PG bitumena klases, tas ir, PG 52 - 28, PG 52 - 34 un PG 46 - 34, un izveidota Latvijas teritorijas PG sistēmas karte. Pētījumā ir konstatēts, ka Kurzemē un Vidzemē ir piemērots PG 46 - 34 klases bitumens, Vidzemes augstienes teritorijā - PG 52 - 34, Latgalē - PG 52 - 34 un PG 52 - 28 bitumens, savukārt Zemgalē ir piemērots PG 46 - 34 un PG 52 - 28 bitumens.

Latvijas apstākļiem tradicionālais bitumens B70/100 (atbilstoši ražotāja sniegtai informācijai ([www. lotosasphalt.pl](http://www.lotosasphalt.pl))) atbilst PG 58 - 28 klasei, bitumens B50/70 atbilst PG 64 - 22 klasei, polimērmodificētais bitumens PMB 45/80-55, kuru plaši izmanto Latvijā, atbilst PG 72 - 22 (PG 72 - 28), savukārt HMAC tipa asfaltbetoniem plaši izmantotais bitumens PMB 25/50 - 60 atbilst PG 78 - 22 (PG 78 - 28) klasei, līdz ar to Latvijā izmantotie bitumeni atbilstoši PG sistēmas klasifikācijai ir noturīgi pret risu veidošanos, bet vienu klasi zemāki attiecībā uz seguma ekspluatāciju īpašībām zemā temperatūrā.

7. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

7.1. Eksperimentu plāns

Baltoties uz iepriekšējās nodaļās analizētām progresīvām testēšanas metodikām, sastādīts eksperimentālās daļas plāns (sk. 43. att.).



43. att. Eksperimentālās daļas plāns

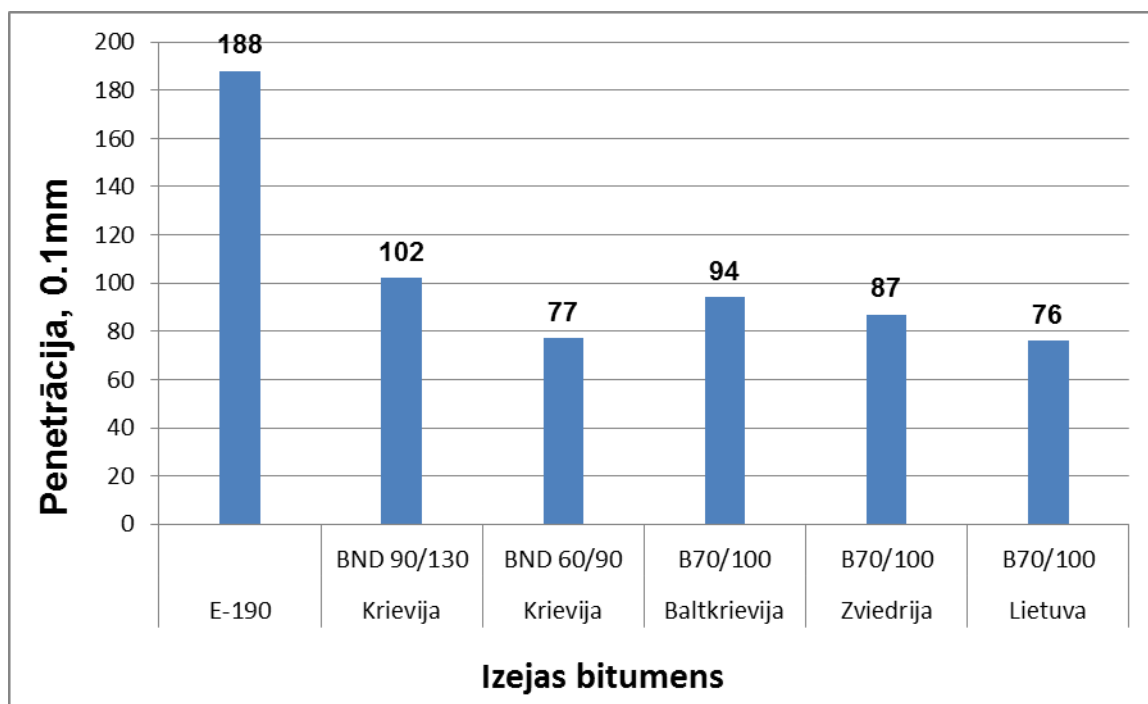
7.2. Nemodificēto bāzes bitumenu īpašības

19. tabulā un no 44. – 50. attēlos ir apkopoti nemodificēto izejas bitumenu pamatīpašības.

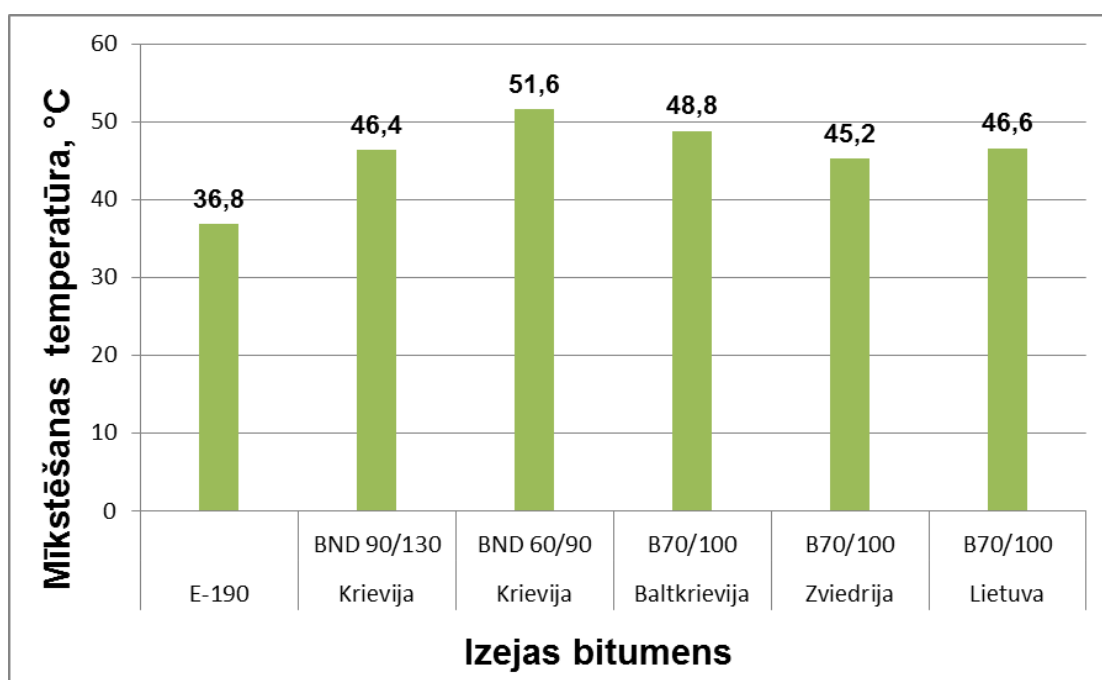
Tabula 19

Dažādas izcelsmes nemodificēto bāzes bitumenu īpašības

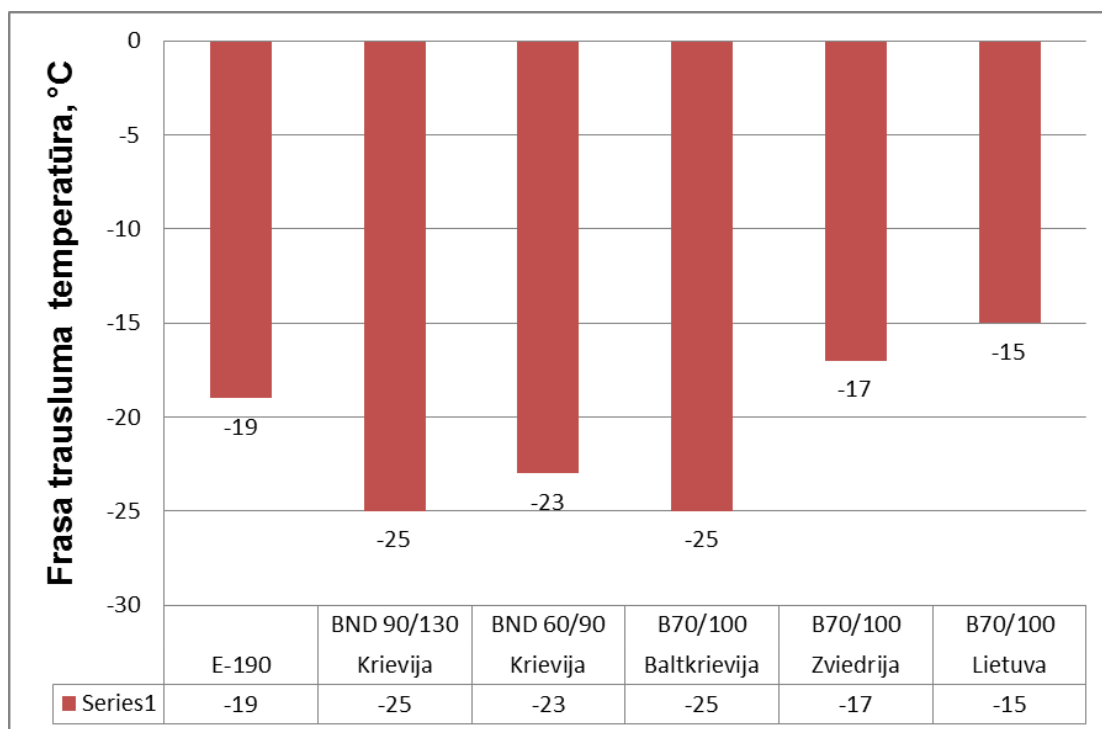
Nosākamais rādītājs	Bitumena izcelsme un tips					
	E-190	Krievija BND 90/130	Krievija B70/100	Baltkrievija B70/100	Zviedrija B70/100	Lietuva B70/100
Penetrācija, 0.1mm	188	102	77	94	87	76
Mīkstēšanas temperatūra, °C	36,8	46,4	51,6	48,8	45,2	46,6
Frasa trausluma temperatūra, °C	-19	-25	-23	-25	-17	-15
Dinamiskā viskozitāte, Pa·s	68,4	152,3	289,5	309,8	196,5	182,5
Novecošanās (cietejumpretestības) īpašību izvērtējums						
Mīkstēšanas temperatūra, °C pēc RTFOT	42,4	53,0	57,4	55,0	50,6	51,6
Mīkstēšanas temperatūras palielināšanās, °C	5,6	6,6	5,8	6,2	5,4	5,0
Bitumena masas izmaiņa, %	0%	-1%	0%	0%	0%	0%
Penetrācija pēc RTFOT, 0.1mm	111	68	53	64	59	52
Paliekošā penetrācija, %	59	67	69	68	68	68



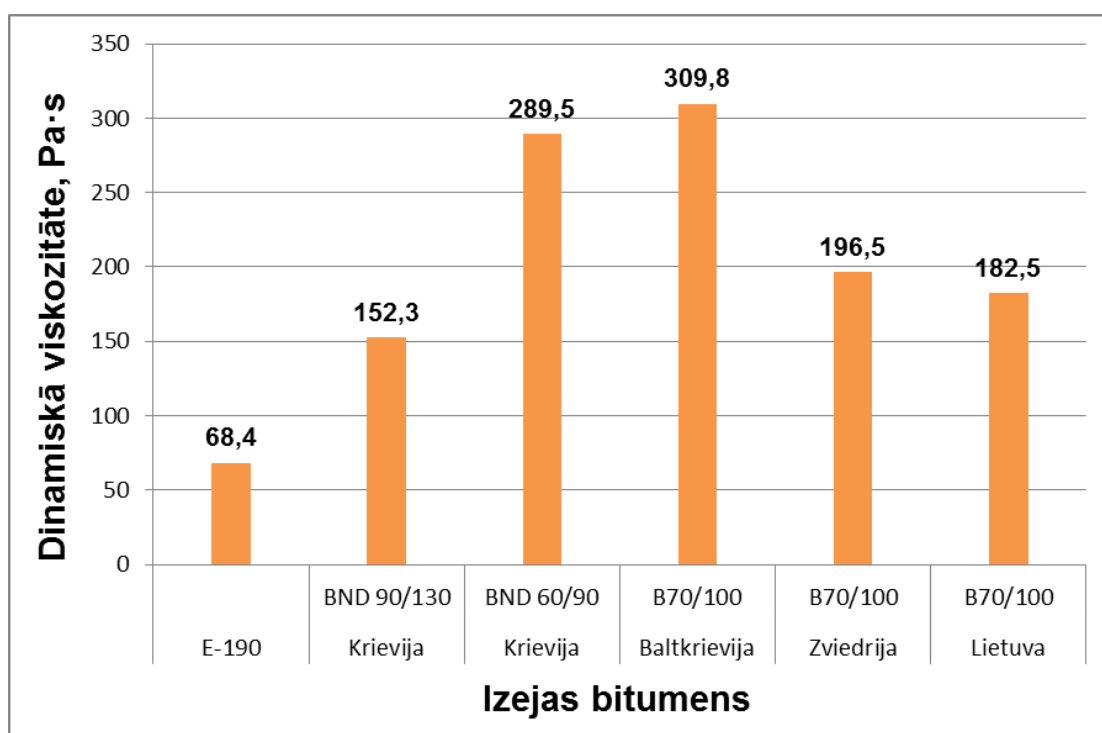
44. att. Izejas bitumenu penetrācijas rādītāju salīdzinājums



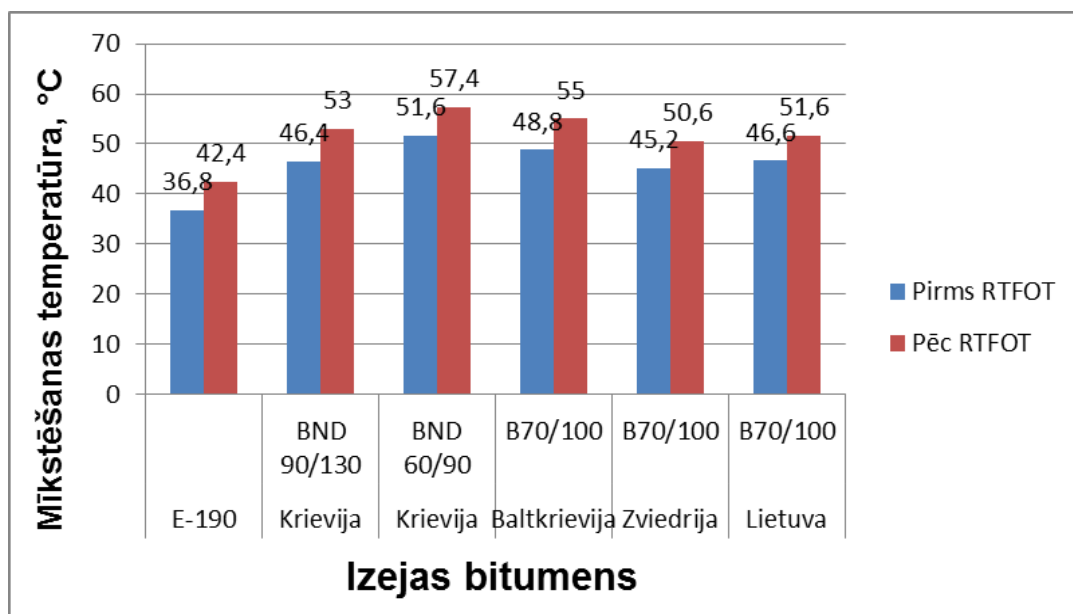
45. att. Izejas bitumenu mīkstēšanas temperatūras rādītāju salīdzinājums



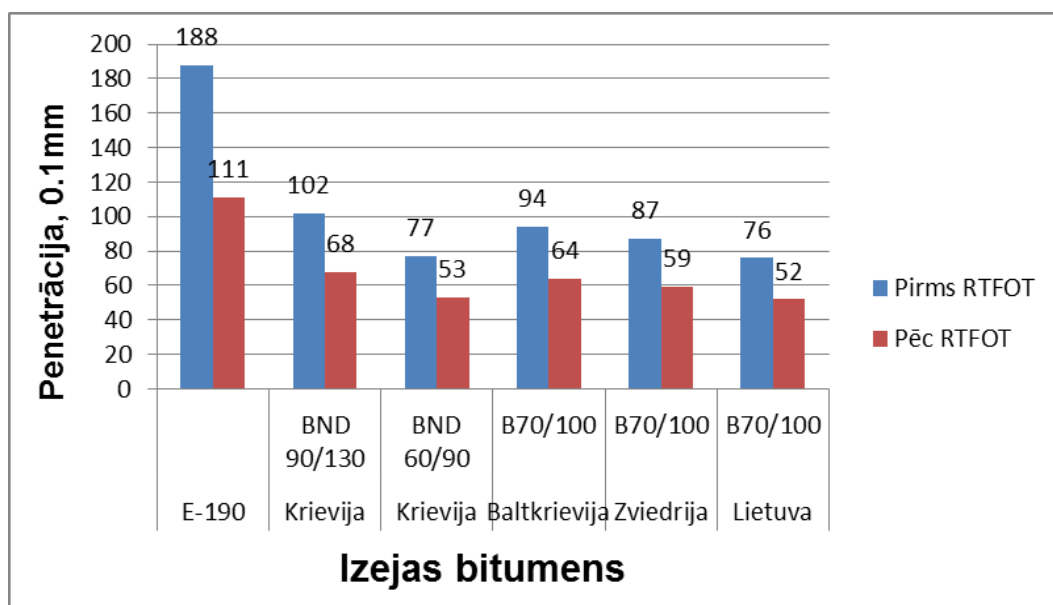
46. att. Izejas bitumenu Frasa trausluma temperatūras rādītāju salīdzinājums



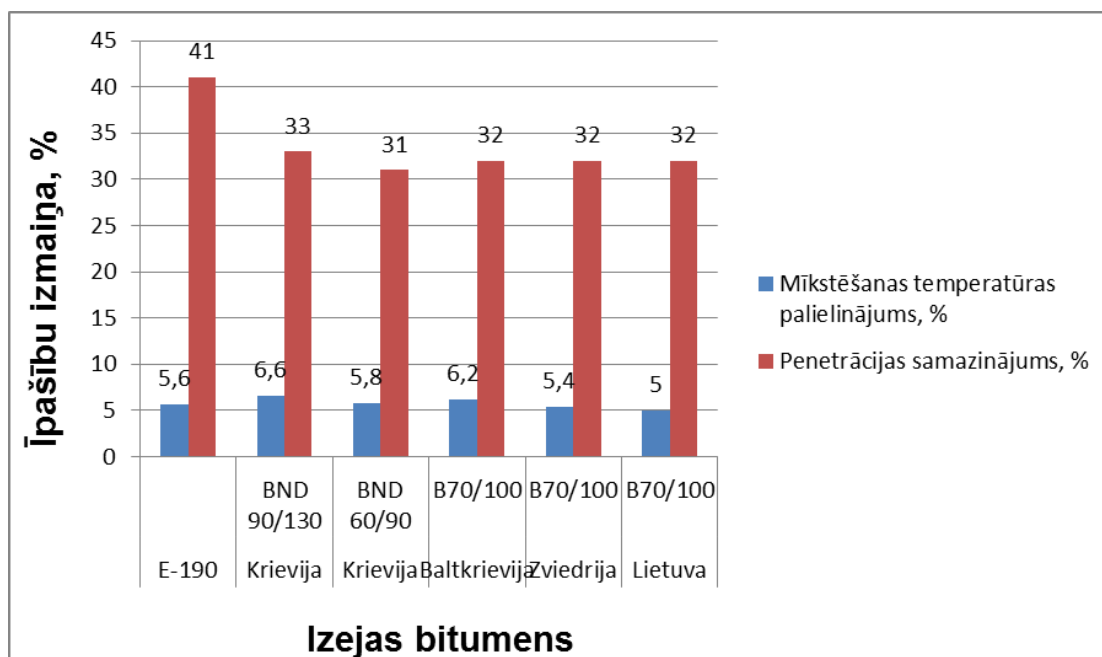
47. att. Izejas bitumenu dinamiskās viskozitāte temperatūras rādītāju salīdzinājums



48. att. Izejas bitumenu novecošanās pēc mīkstēšanas temperatūras salīdzinājums



49. att. Izejas bitumenu novecošanās pēc penetrācijas rādītāja salīdzinājums



50. att. Izejas bitumenu pamatīpašību izmaiņu dinamika pēc novecošanās

7.3. Modificēto bitumenu īpašības

Veiktajā pētījumā tika izmantoti 6 dažādas izcelsmes bitumēni (sk. 19. tabula), kuri tika modificēti ar dažādas izcelsmes polimēriem (SBS-1, SBS-2, SBS-3, SBS-4, Elvaloy[®] un PPA (STARPHOSE 04[®])). **PMB mērķa bitumena klase ir PMB 45/80-55.** Viena no svarīgākām polimērmodificētā bitumena (PMB) īpašībām ir uzglabāšanas stabilitāte. PMB sadalīšanās uzglabāšanas procesā ir parādība, kuras rezultātā uzbriesti polimēri paceļas augšup, un ar asfaltēniem piesātinātā fāze nosēdās apakšā. Uzglabāšanas stabilitātes tests ir bitumena pārbaude, kas nosaka bitumena spēju saglabāt savu struktūru ekspluatācijas apstākļos.

Uzglabāšanas stabilitātes testa gaita:

- 1) PMB paraugu ievieto kausā ar 300 ml apjomu, kur arī ir ievietota stieple.
- 2) Kausam virsū uzliek alumīnija foliju un uzglabā paraugu 170°C temperatūrā 7 dienās.
- 3) Pēc 7 dienām ļauj paraugam atdzēst līdz istabas temperatūrai 24 stundu laikā, tad kausa virsmu uzsilda un izņem paraugu ārā kopā ar stiepli. Atdala stiepli no parauga un ļauj paraugam pastāvēt istabas temperatūrā (15-25°C). Kad sadalīšanās parādās, materiāls ir sadalīts polimērfāzē un bitumena fāzē.
- 4) Sadalīšanās pakāpe ir novērtēta ar sekojošu formulu:

$$\text{Sadališanas pakāpe (\%)} = L1 \text{ (cm)} / L \text{ (cm)} * 100,$$

Kur L1 – polimērfāzes garums, L – saistvielas dziļums.

PMB sadalīšanas apstākļi var būt iedalīti trīs veidos:

1. 1. veids, kas izraisa sadalīšanu (polimērfāzei piemīt gumijas elastība un tā maina savu formu bez elastīgas deformācijas izsaukšanas, bet bitumena fāze elastīgi deformējas un pagarinās horizontālā virzienā);
2. 2. veids, kas neizraisa sadalīšanu (bitumens veido nepārtrauktu fāzi, tāpēc bitumena plastiskums kļūst par noteicošo. Materiāls pagarinās horizontālā virzienā, kas izraisa plastiskās deformācijas. Ja polimērs veido nepārtrauktu fāzi, tad materiāls uzglabā cilindrisku formu un plastiskās deformācijas neparādās).
3. 3. veids, kas parada neskaidru sadalīšanu (ir nenoteikta robeža starp polimēra fāzi un bitumena fāzi. Šajā gadījumā polimērfāzes garums nevar tikt noteikts pietiekami precīzi.) [17].

Tapāt uzglabāšanas stabilitāte ir atkarīga no polimērdaliņu izmēriem (dispersitātes):

- Ja polimērdaliņu izmēri ir mazāk par 0.001mm, tad šis maisījumam ir labi radītāji uzglabāšanas stabilitātes testā.
- Ja daļiņu izmēri ir 0.001-0.01mm, tad nepieciešamā uzglabāšanas stabilitāte nevar tikt sasniegta.
- Ja daļiņu izmēri pārsniedz 0.01mm, tad mēdz notikt absolūta sadalīšanās [17].

Modificēto bitumenu pamatīpašības un uzglabāšanas stabilitātes testu rezultāti ir apkopoti 20. un 22. tabulā. 21. un 23. tabulā ir apkopoti modificēto bitumenu novecošanās īpašības un reoloģisko (viskozitātes) testu rezultāti

Tabula 20

Modificēto bitumenu pamatīpašības un uzglabāšanas stabilitātes testu rezultāti

N.p.k.	Bitumens	Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C	Uzglabāšanas stabilitāte			
					Augša		Apakša	
					Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C
1.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-1	66	62,4	-21	66	67,6	57	67,4
2.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-2	52	63,2	-22	70	73,4	44	69,2
3.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-3	57	61,4	-24	118	66	37	71
4.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-4	57	66,6	-19	114	76,6	41	69,4
5.	E 190 + 3% SBS-1	122	47	-22	124	45,8	124	45,6
6.	Krievija B70/100 + ELVOLOY AM [®] 1% + STARPHOS 04 [®] 0.3%	49	72,8	-22	53	66,4	53	66,8
7.	Zviedrija B70/100 + 2.5% SBS-1	71	52	-22	73	50,6	73	50,8
8.	Krievija B70/100 + STARPHOS 04 [®] 0.3%	58	58	-25	-	-	-	-

Tabula 21

Modificēto bitumenu novecošanās īpašības un reoloģisko (viskozitātes) testu rezultāti

N.p.k.	Bitumens	RTFOT						Dinamiskā viskozitāte, Pa·s	Kinematiskā viskozitāte, mm ² /s ²
		Penetrācija, 0.1mm	Paliekošā penetrācija, %	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Mīkstēšanas temperatūras palielināšanās, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C	Bitumena masas izmaiņa, %		
1.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-1	sk. 25. tabulu						-	-
2.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-2	37	71,1%	73,4	10,2	-16	-0,13	5127	2041
3.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-3	36	61,1%	71,4	10	-14	-0,17	3363	2130
4.	Krievija B70/100 + 2.5% SBS-4	35	61,4%	74	7,4	-19	-0,22	2785	1733
5.	E 190 + 3% SBS-1	84	68,9%	50,6	3,6	-24	-0,34	195,2	474,6
6.	Krievija B70/100 + ELVOLOY AM [®] 1% + STARPHOS 04 [®] 0.3%	33	67,3%	77	4,2	-18	-0,24	15318	2135
7.	Zviedrija B70/100 + 2.5% SBS-1	-	-	-	-	-	-	-	-
8.	Krievija B70/100 + STARPHOS 04 [®] 0.3%	36	62,1%	72,2	14,2	-18	-0,27	3648	1137

Tabula 22

Modificēto bitumenu pamatīpašības un uzglabāšanas stabilitātes testu rezultāti

N.p.k.	Bitumens	Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C	Uzglabāšanas stabilitāte			
					Augša		Apakša	
					Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C
1.	Krievija BND90/130 + 2.5% SBS-2	71	60,4	-21	124	74,8	51	62,6
2.	Krievija BND 90/130 + 2.5% SBS-4	69	58,2	-23	117	71	48	64,6
3.	Krievija BND 90/130 + 2.5% SBS-3	75	54,6	-22	134	59,6	46	61,6
4.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-2	64	67,2	-20	152	75,6	36	74,8
5.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-4	61	64,4	-22	152	70,4	36	73,8
6.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-3	62	60	-25	164	64	36	72,4
7.	Baltkrievija B70/100 + STARPHOS 04 [®] 0.3%	67	56,8	-28	71	55,4	71	55,6

Tabula 23

Modificēto bitumenu novecošanās īpašības un reoloģisko (viskozitātes) testu rezultāti

N.p.k.	Bitumens	RTFOT						Dinamiskā viskozitāte, Pa·s	Kinematiskā viskozitāte, mm ² /s ²
		Penetrācija, 0.1mm	Paliekošā penetrācija, %	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Mīkstēšanas temperatūras palielināšanās, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C	Bitumena masas izmaiņa, %		
1.	Krievija B90/130 + 2.5% SBS-2	52	73,2%	66,2	5,8	-23	-0,54	784,2	1232
2.	Krievija BND 90/130 + 2.5% SBS-4	51	73,90%	64,4	8,2	-19	-0,4	837,6	1165
3.	Krievija BND 90/130 + 2.5% SBS-3	54	72%	63,6	9	-21	-0,48	743	1038
4.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-2	50	78,10%	69,6	2,4	-20	0,02	2352	2192
5.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-4	50	82%	70	5,6	-20	0,01	2210	2193
6.	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-3	50	80,60%	67,8	7,8	-19	-0,01	2306	2499
7.	Baltkrievija B70/100 + STARPHOS 04 [®] 0.3%	50	74,60%	65,4	8,6	-25	-0,05	1352	1081

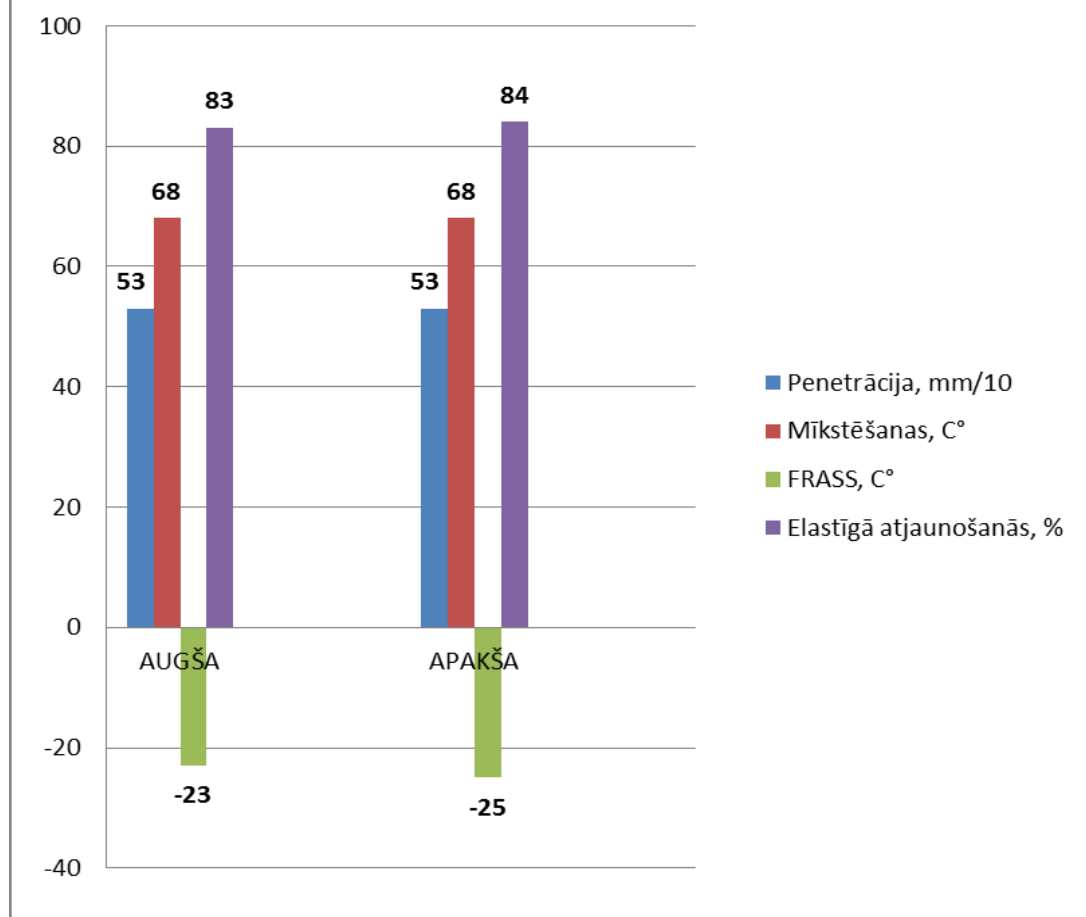
Analizējot 20. – 23. tabulas rezultātus, konstatēts, ka augstākais termostabilitātes un uzglabāšanas rādītājs tiek sasniegts izmantojot polimēru SBS-1. Turpmākajā pētījumā stabilākā bitumena un polimēra kombinācija tika testēta agresīvākos apstākļos, nekā to nosaka standarta LVS EN 13399:2010 procedūra (3 diennaktis) – pēc 6 un 7 diennaktīm. Iegūtie rezultāti rāda, ka stabilākā bitumena un SBS kombinācija agresīvākos apstākļos (pēc 6 un 7 diennaktīm) uzrāda augstu uzglabāšanas stabilitāti. Rezultāti apkopoti 24. tabulā un 51. un 52. attēlos.

Tabula 24

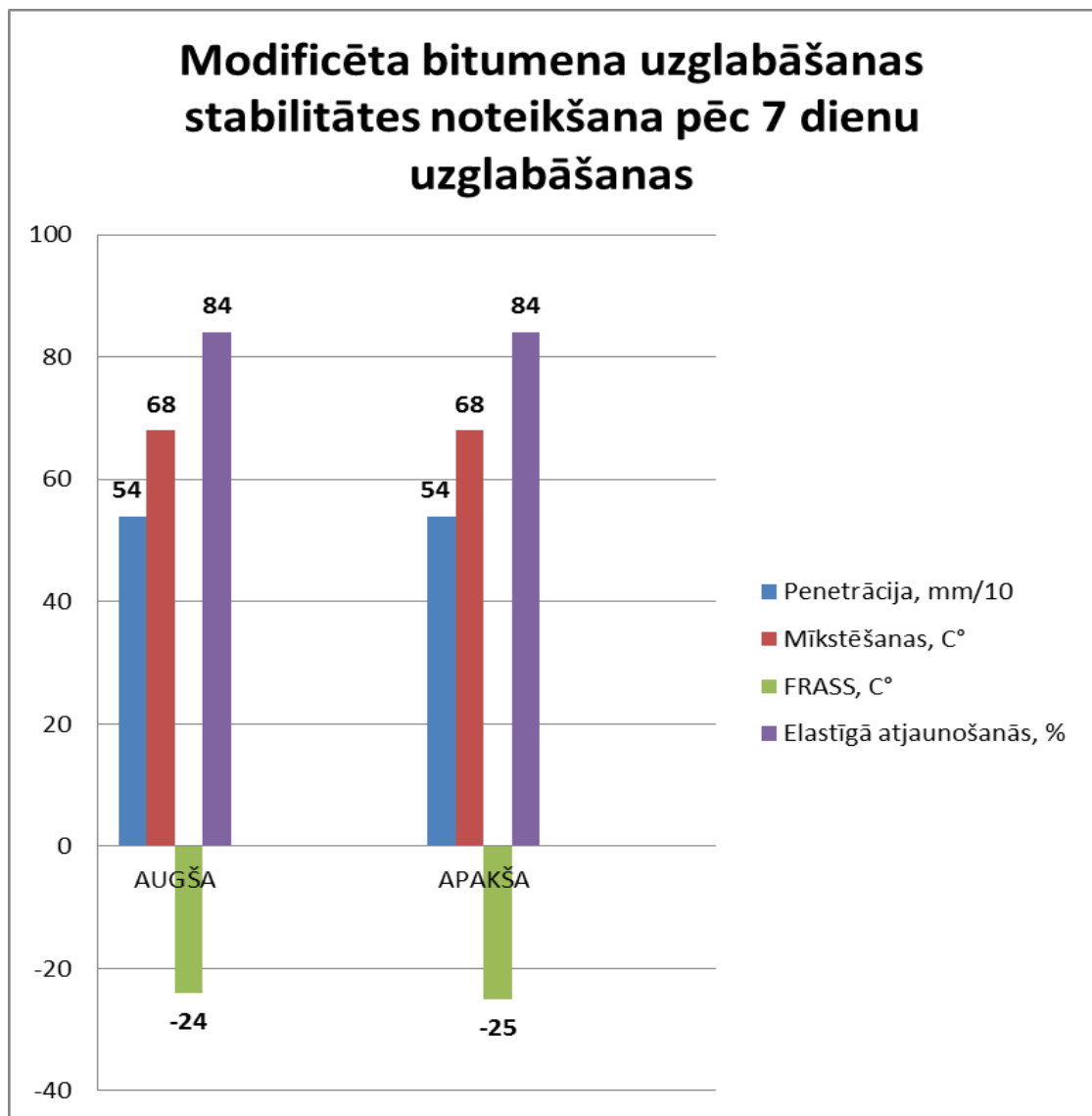
Baltkrievijas bitumena B70/100 un SBS-1 kombinācijas uzglabāšanas stabilitāte pēc 6 un 7 diennaktīm

Testēšanas dienu skaits	Bitumena marka	Amplitūda	Penetrācija, mm/10	Mīkstēšanas, C°	FRASS, C°	Elastīgā atjaunošanās, %
6	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-1	AUGŠA	53	68	-23	83
		APAKŠA	53	68	-25	84
7	Baltkrievija B70/100 + 2.5% SBS-1	AUGŠA	54	68	-24	84
		APAKŠA	54	68	-25	84

Modificēta bitumena uzglabāšanas stabilitātes noteikšana pēc 6 dienu uzglabāšanas



51. att. Baltkrievijas bitumena B70/100 un SBS-1 kombinācijas uzglabāšanas stabilitāte pēc 6 diennaktīm



52. att. Baltkrievijas bitumena B70/100 un SBS-1 kombinācijas uzglabāšanas stabilitāte pēc 7 diennaktīm

7.4. Nemodificētā un modificētā bitumena struktūras izpēte ar atomspēka mikroskopu (AFM)

7.4.1. Nepārtraukta kontakta metode

Bitumens ir komplekss maisījums, kas sastāv no tūkstošiem dažādu ogļūdeņražu molekulām, kuras parasti tiek iedalītas divās klasēs: asfaltēni un maltēni. Maltēni, savukārt tiek iedalīti piesātinātos ogļūdeņražos, aromatizētos ogļūdeņražos un sveķos. Dažādas izcelsmes bitumeniem ir atšķirīga struktūra un piemīt dažādas fizikāli ķīmiskās īpašības. Bitumens ir asfaltēnu dispersija maltēnu nepartrauktā fāzē. Sveķi (maltēnu komponentes ar lielāku aromātiskumu) darbojas kā asfaltēnu fāzes aktivētāji. Nepārtraukta aromātiskuma samazināšanās pastāv starp asfaltēniem un mazāk aromātiskiem maltēnu komponentiem – sveķiem.

Bitumena ķīmiska sastāva kontrole ir galvenā atslēga bitumena mikrostruktūras un tādējādi arī gala īpašību noteikšanai nemainīgos apstākļos.

Balstoties uz literatūras analīzi, var secināt, ka ar atomspēku mikroskopa palīdzību (AFM – Atomic Force Microscope) var konstatēt 3 dažādu veidu mikrostruktūras: katanas fāze (catana phase; bites veida fāze), peri-fāze (peri phase; bites veida fāze ir izkliedēta peri fāzē) un para-fāze (para phase). Fāžu savstarpējas proporcijas ir atkarīgas no izejas bitumena dabas, modifikatora daudzuma, kā arī no maisījuma novecošanas pakāpes. [49]

Veiktajā pētījumā bitumena morfoloģija tika raksturota ar atomspēka mikroskopa palīdzību (AFM) – mikroskopu ar ļoti augstu izšķirtspēju, kas sniedz informāciju par pārauga virsmu. AFM metodes aprobēšana veikta, izmantojot PMB bitumenu, modificētu ar SBS un nemodificētu bitumenu B20/30. Šobrīd turpinās eksperiments stabilu un nestabilu bitumena kombināciju (sk. 20.- 23. tab.) izpētei ar AFM metodi.

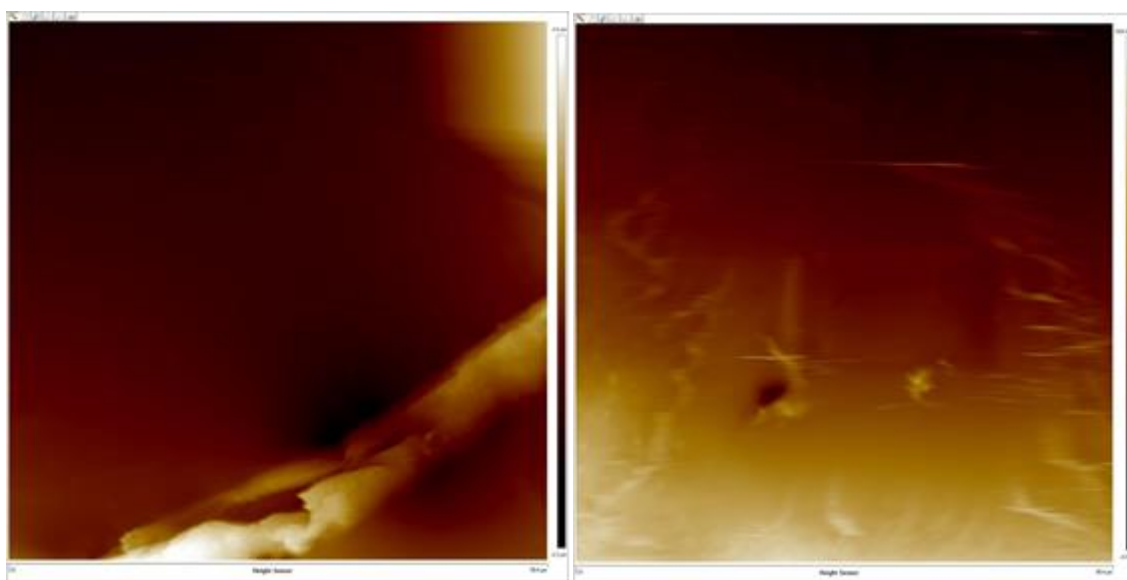
Viens no vissvarīgākajiem eksperimenta posmiem ir pārauga sagatavošana. Līdz 130°C sakarsēta bitumena piliens tika novietots uz aplveida metāliskas plāksnes (rādiuss 5mm), un bitumens izplūda pa visu plāksnes virsmu. Pēc tam pāraugu atstāja vismaz uz 24 stundām atdzēst līdz istabas temperatūrai. Lai iegūtu visprecīzākos attēlus, svarīgi ir panākt pārauga vienmērīgu izplūšanu, lai tā virsma būtu glūda.

Visi attēli tika iegūti, izmantojot 125 µm garas silikona adatas. Adata materiāls – silikons - tika izvēlēts atbilstoši pētāmā materiāla – bitumena – dabai. Tieši ar silikona adatām var reducēt iespējamību, ka mikroskopa darbības gaitā tā saplīst. Mikroskops darbojas nepārtraukta kontakta režīmā (contact mode) – adata nepārtraukti pārvietojas pa parauga virsmu. Adata pārvietojuma frekvence 260 kHz.

Tika apskatīti divu dažādu bitumenu paraugi: ciets bitumens B20/30 un polimērmodificēts PMB 25/55-60. Tika iegūti divu veidu bildes: augstuma attēli (height mode) un novirzes attēli (deflection mode). Katra veida bildes tika iegūti divos virzienos (atkarībā no adatas pārvietojuma virziena) – no labas puses pa kreisi un no kreisas puses pa labi.

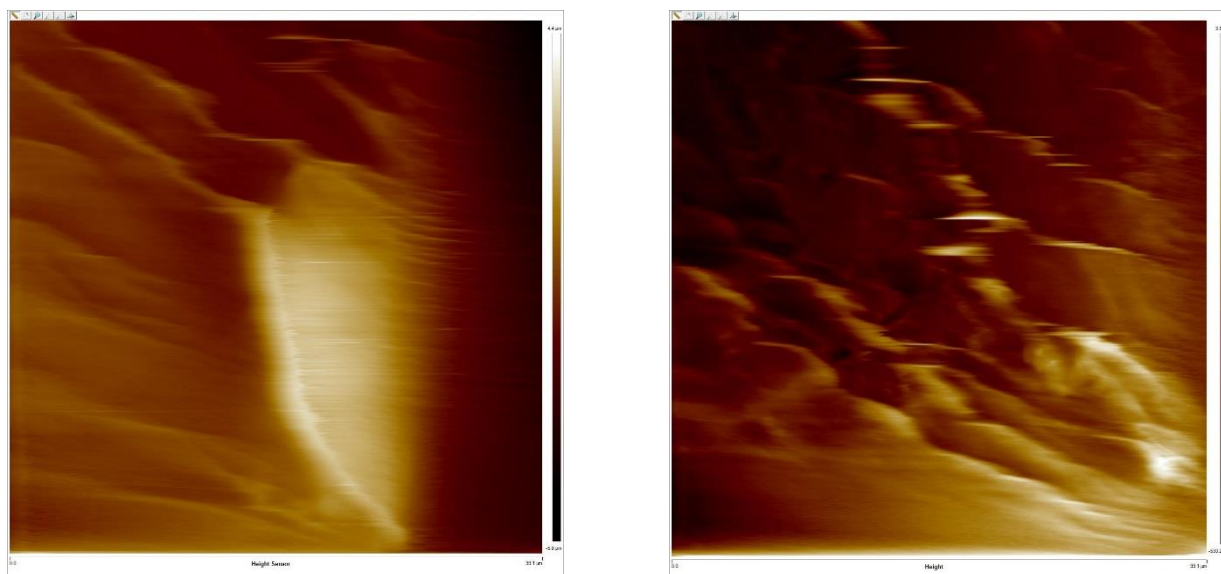
Tika izvēlētas 2 dažādas vietas uz bitumena parauga virsmas, ļoti uzmanīgi (lai nesaplīstu adata) tika novietota adata uz tās. Tad adata pārvietojās pa neliela kvadrāta laukumu (10 µm × 10 µm). Adata pārvietojuma laikā svarīgi saglabāt klusumu telpā, kur notiek pētījums, jo mikroskops ir ļoti jūtīgs pret apkārtējas vides skaņas viļņiem.

Vienas bildes tapšanas ilgums sastāda 45 minūtes, tāpēc process bija samērā laikietilpīgs. 53. attēlā ir bitumena 20/30 augstuma attēli (divās dažādās vietās):



53. att. Bitumena B20/30 augstuma attēli

54. attēlā ir bitumena PMB 25/55-60 augstuma attēli (divās dažādās vietās):



54. att. Bitumena B20/30 augstuma attēli

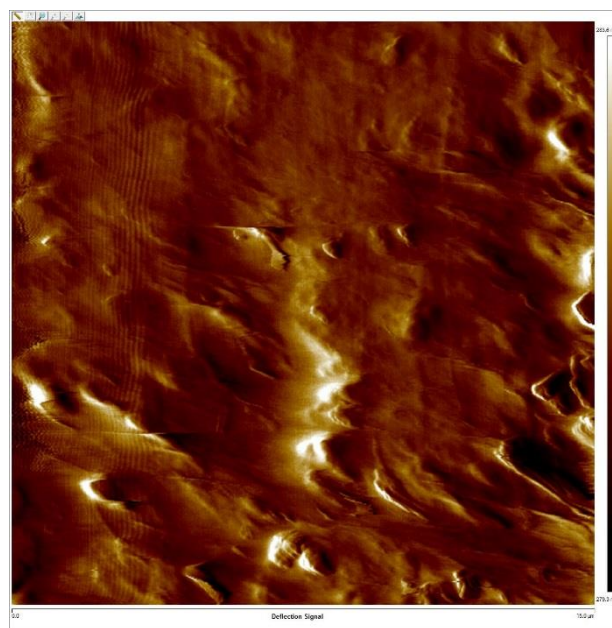
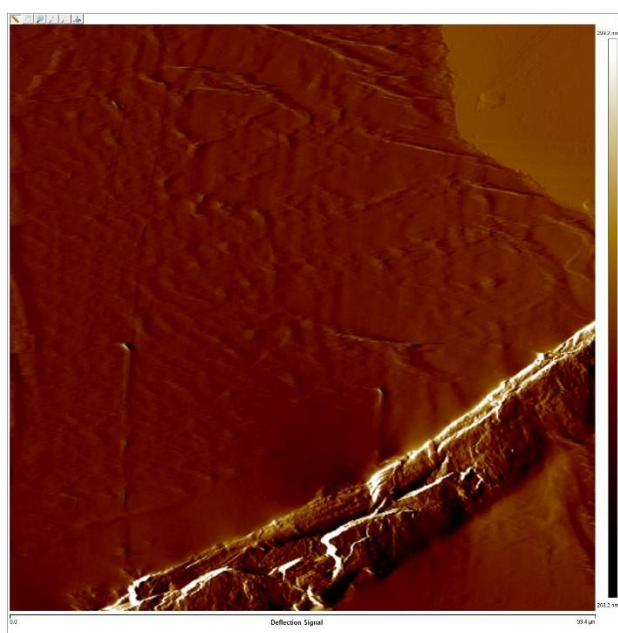
Krāsu atšķirības norāda augstumu vērtību amplitūdu – jo gaišāka krāsa, jo augstāks ir punkts, jo tumšāka – jo zemāk ir punkts (pa kreisi no attēla ir augstumu vērtību amplitūdas).

Kā var redzēt, iegūtas bildes abos gadījumos ir diezgan izplūdušas. Iespējams, to veicināja izvēlēts mikroskopa darbības režīms (nepārtraukta kontakta režīms), jo bitumenam piemīt viskozitāte. Var pieļaut, ka cits režīms – periodiskās pieskaršanas (tapping mode) sniegtu labākus un precīzākus attēlus.

Tomēr acīmredzama ir augstumu atšķirības gan bitumenam 20/30, gan PMB bitumenam. Bitumenam 20/30 pirmajā gadījumā ir redzams ar ievērojamu augstumu atšķirību līnijveidīgs veidols. Tā kā apskatāmais paraugs netika modificēts, tā nevar būt polimēra šķiedra. Iespējams, tas ir veidols uz parauga virsmas, kas izveidojas parauga sagatavošanas procesā. Otrajā gadījumā parauga virsma ir diezgan vienmērīga ar pakāpenisku augstuma samazinājumu/palielinājumu.

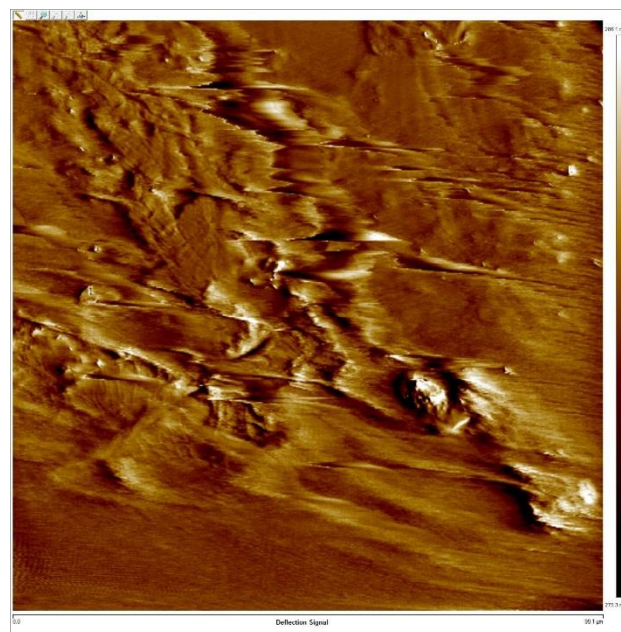
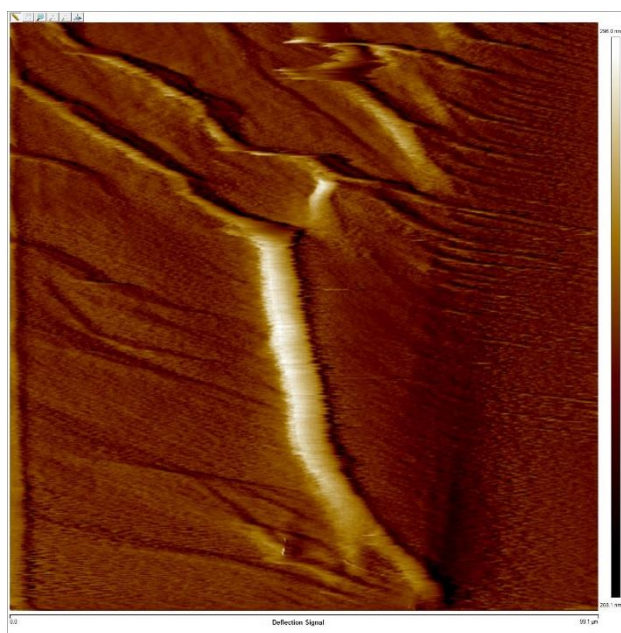
Bitumenam PMB 25/55-60 pirmajā gadījumā arī ir redzams taisnas līnijas veidols, kas šajā gadījumā varētu būt polimēra šķiedra. Otrajā gadījumā ir viļņu veida augstuma izmaiņas, kurā var saredzēt dažādas fāzes (peri fāzi un para fāzi).

55. attēlā ir parādīti bitumena 20/30 novirzes attēli (divās dažādās vietās).



55. att. Bitumena B20/30 novirzes attēli

56. attēlā ir parādīti bitumena PMB 25/55-60 novirzes attēli (divās dažādās vietās).



56. att. Bitumena PMB 50/55-60 novirzes attēli

Kā var redzēt, iegūtas bildes ir ar lielu kontrastu un ir precīzas. Tas liecina par to, ka izvēlēts režīms – kontakta metode – ir piemērots novirzes attēla iegūšanai.

Bitumenam 20/30 pirmajā gadījumā var atkal redzēt veidojumu. Novirzes attēli tikai apstiprina, ka šis veidols parādījās parauga sagatavošanas procesā, t.i., tam nav saistības ar bitumena morfoloģiju. Toties var redzēt atšķirīgas fāzes (precīza augstumu atšķirība). Otrajā gadījumā var redzēt, ka šis bitumens ir ar zemu penetrāciju, t.i., ar lielāku viskozitāti – adatas pārvietojuma rezultātā bitumena virsmas “sekošana” bija samērā maza.

Bitumenam PMB 25/55-60 pirmajā gadījumā atkal var redzēt taisnas līnijas veidolu, kas varētu būt polimēra šķiedra. Otrajā gadījumā var redzēt, ka šis bitumens ir ar lielāku penetrāciju, t.i., mazāku viskozitāti nekā iepriekšēja bitumena paraugs, jo parauga virsma “seko” adatas pārvietojumam tālāk.

Pirms praktiskas daļas uzsākšanas tika paredzēts, ka iegūtās attēlos būs iespējams *saredzēt katanas fāzi, t.i., bites veida fāzi. Bet tā netika konstatēta.* Iespējams, tas ir izvēlēta nepārtraukta kontakta darbības režīma rezultāts. Turpmāk eksperiments tiks veikts ar pārtraukta kontakta metodi (tapping mode).

7.4.2. Pārtraukta kontakta metode

Atomspēku mikroskops AFM ir ierīce ar ļoti augstu izšķirtspēju, kas sniedz informāciju par parauga virsmas morfoloģiju. Ir vairāki darbības režīmi, ar kuriem ir iespējams veikt parauga izpēti. Darbības režīma izvēlei ir noteicošā loma, tā kā no tā ir atkarīga bilžu kvalitāte.

Ir trīs galvenie darbības režīmi:

1. Nepārtrauktā kontakta metode (sk. 8.4.1. nodaļa);
2. Pārtraukta kontakta metode;
3. Bezkontakta metode.

Turpmāk pētījumā tika izvēlēts pārtraukta kontakta metodes darbības režīms – režīms, kurš pēc definīcijas atrodas starp nepārtrauktā kontakta un bezkontakta metodi. Tas nozīmē, ka *adata ar noteiktu biežumu pieskaras kontakta virsmai.*

Pārtraukta kontakta metode ir piemērota bitumenam, jo tiek novērsta problēma, kas saistīta ar adatas piesārņojumu, kā arī tiek iegūtas augstas

izšķirtspējas bildes ar minimāliem parauga bojājumiem. It īpaši šīs metodes atbilstību var konstatēt, strādājot ar mīkstiemi bitumeniem.

Svarīga loma ir adatas izvēlei. Katram darbības režīmam atbilst noteikts adatas tips ar noteiktiem parametriem (garums, springa konstante, rezonanses frekvence). Pētījumā tika izvēlēta pārtraukta kontakta metodei atbilstoša adata ar sekojošiem parametriem:

- springa konstante – 40 N/m;
- garums – 125 μm;
- frekvence – 300 kHz.

Springa konstante ir viens no svarīgākajiem adatas izvēles faktoriem. Noteiktas slodzes ietekmē adata izliecas:

$$F = -k \cdot s,$$

kur

k – springa konstante, N/m,

s – adatas izliece, m,

F – pieliktais spēks, N.

Springa konstante izsaka attiecību starp pielikto spēku un adatas izlieci. Jo lielāka ir springa konstantes vērtība, jo stingāka ir adata, t.i., grūtāk pakļaujas izliecei. Mūsu pētījumā sākumā tika izvēlēts nepārtraukta kontakta darbības režīms (contact mode), un tam atbilstoša adata no silikona materiāla, kuras springa konstante bija 230 kN/m. *Šis darbības režīms nesniedza vēlamus rezultātus, jo bildes nebija pietiekami precīzas.*

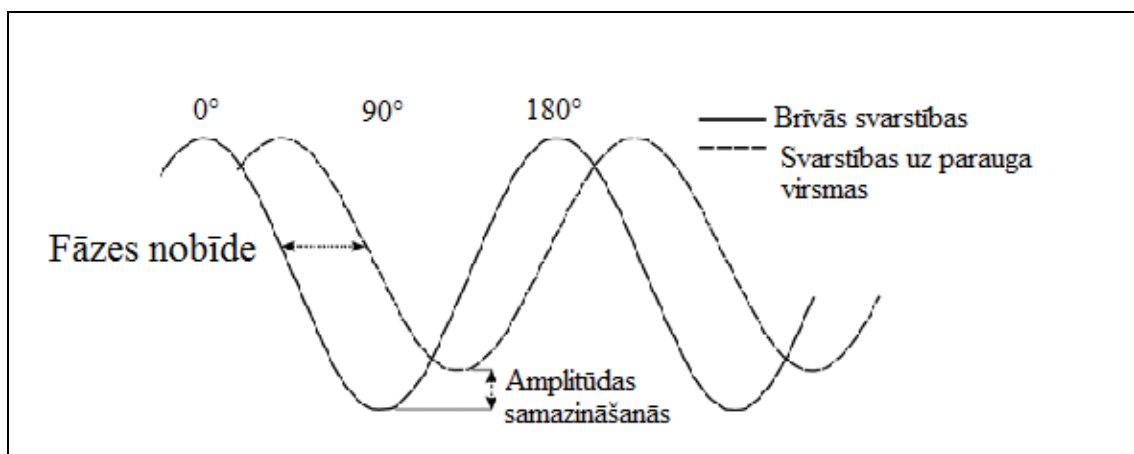
Šajā pētījuma etapā tika turpināta divu nemodificētu bitumenu (B20/30 un B70/100), vienu polimermodificētu (PMB 25/55-60, kas ražots Polijā), kā arī viena stabila un viena nestabila polimērmodificēta bitumena (PMB 45/80-55, kas ražots Latvijā) izpēte ar ATM metodi.

Ar ATM mikroskopu tika iegūti augstuma attēli (high mode), fāžu attēli (phase mode), kā arī pieskaršanas amplitūdas attēli (tapping amplitude). Augstuma attēli parāda parauga virsmas dažādu punktu augstumu atšķirību. Ar tumšāku krāsu tiek atzīmēti zemāki punkti, ar gaišāku – augstāki. Tāpēc tika iegūti cita veida attēli – pieskaršanas amplitūdas attēli. Pēc būtības no šīm bildēm var nolasīt tādu pašu informāciju par parauga virsmu, kā no augstuma attēliem. Pieskaršanas amplitūda – viens no harmonisko svārstību parametriem. Tā izmainās, ja mainās parauga virsma

(paliek vai nu mazāka, vai lielāka). Jo mazāka ir amplitūda, jo augstāk ir punkts, un otrādi – jo lielāka ir amplitūda, jo zemāk ir punkts.

Fāžu attēli parāda dažādas fāzes bitumenā. Faktiski tiek attēlota starpība starp svārstības signālu, kas tiek sūtīts uz adatu, un faktisko adatas svārstību, kas veidojas, adatai saskaroties ar parauga virsmu. Pēc būtības fāžu bildes attēlo dažādas fāzes bitumenā, un katrai fāzei ir savas reoloģiskas un adhēzijas īpašības. Papildus fāžu bildes norāda uz to, ka bitumens ir komplekss oglekļaūdeņražu maisījums, kurš nav perfekti homogēns, un kā ne visi oglekļaūdeņraži savstarpēji izšķīst istabas temperatūrā [50].

Fāžu bildes tiek izmantotas, lai atspoguļotu tādu virsmas īpašību dažādību, kā elastība, adhēzija un berze, un visu šo īpašību atšķirība var izraisīt attēloto fāžu nobīdi (sk. 57 att.).



57. att. Svārstību grafiska attēlošana [52].

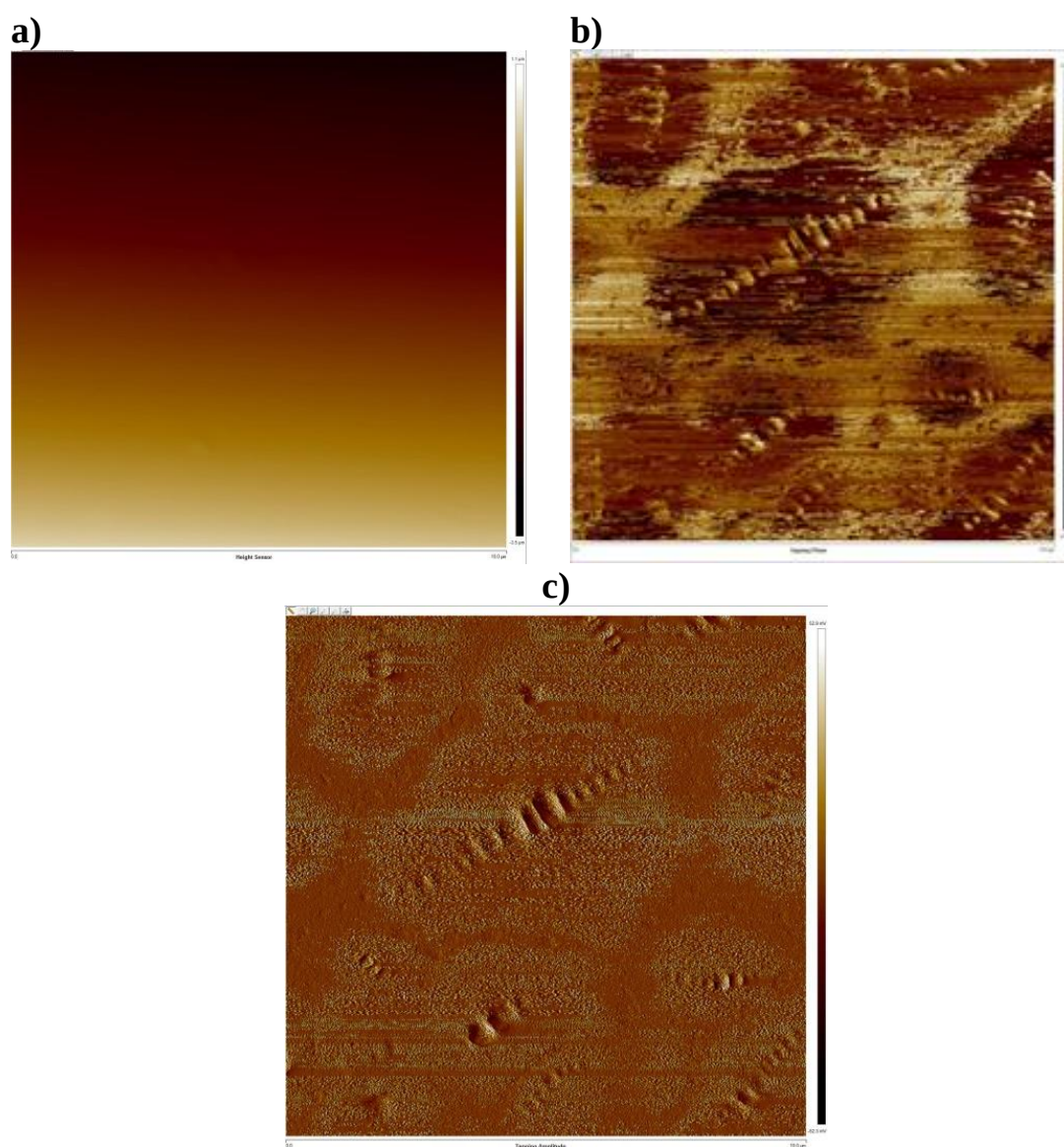
Ar atomspēku mikroskopu ir iespējams ieraudzīt 4 galvenās fāzes bitumenā:

1. Katanas fāze (catana phase),
2. Perifāze (Periphase),
3. Parafāze (Paraphase),
4. Sals fāze (Sal phase).

Katanas fāze (no grieķu „cata” – no augšas uz leju, un „ana” – no lejas uz augšu) tiek atspoguļota kā glūda fāze, kurā ir izkliedēta citā fāzē. Izkliedēta fāze tiek atspoguļota kā gaišo un tumšo līniju secība. Šo fāzi sauc arī par „bītes” fāzi sava ārēja izskata dēļ. **Tiek pieņemts, ka katanas fāzi veido asfaltēni** [50]. Apkārt katanas fāzei ir **perifāze, kuru veido ar augstu molekulāru masu aromātiskie oglekļaūdeņraži**

– **sveķi** [53]. Tad seko parafāze, kuru veido ar zemāku molekulāro masu aromātiskie **ogļūdeņraži – aromātiskie ogļūdeņraži – eļļas** [53].

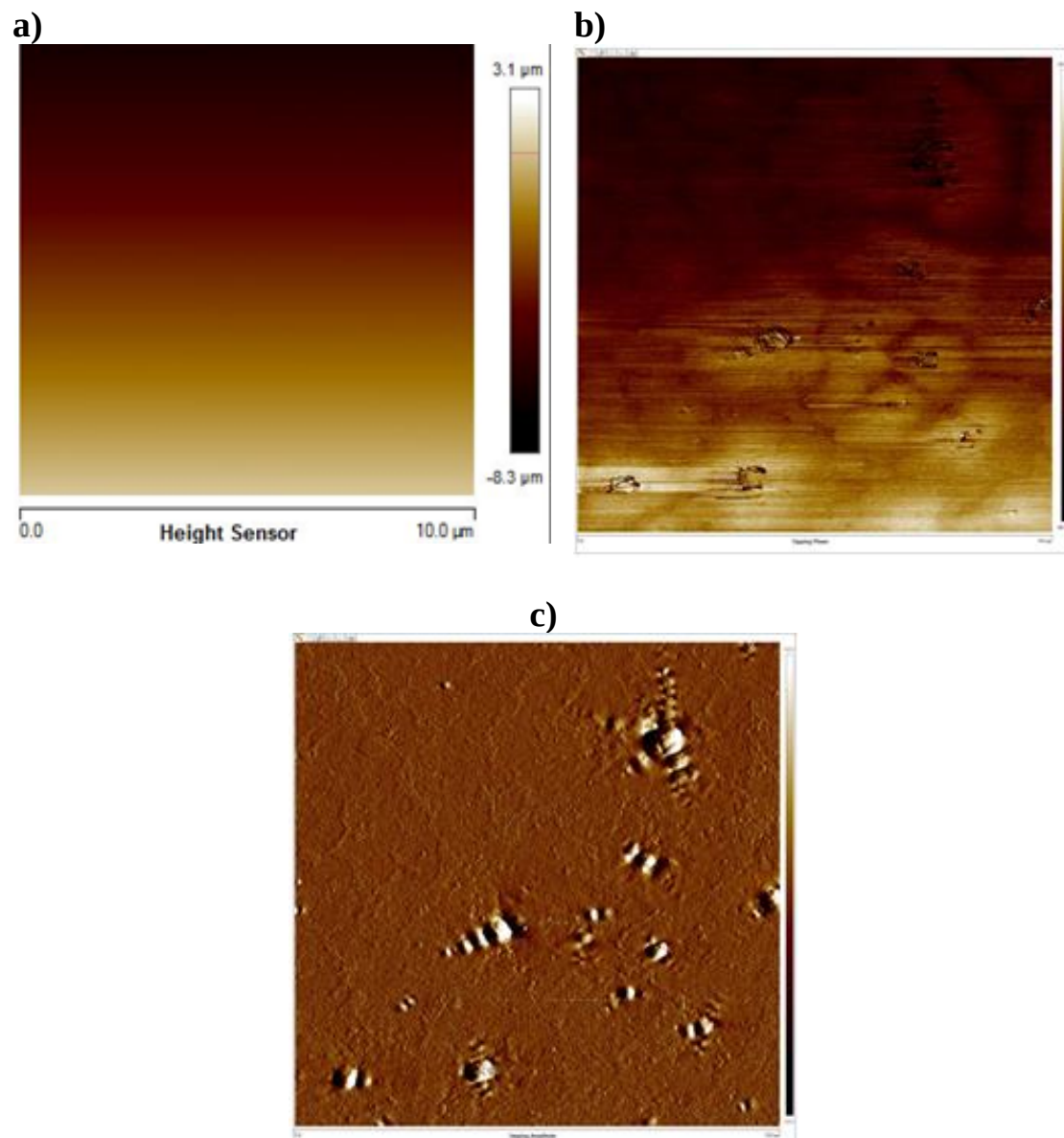
Bitumenam B20/30 ir saredzamas visas trīs fāzes – katanas fāze, perifāze un parafāze. Fāžu savstarpējais daudzums ir vienmērīgs, katanas fāze, t.i., asfaltēni, veido garas virknes. Apkārt katanas fāzei perifāze, kuru veido augstmolekulāri ogļūdeņraži sveķi, ir plaša un pēc pieskārsanas amplitūdas attēla var arī spriest, ka perifāze ir lipīgāka, t.i., ar lielākiem adhēzijas spēkiem salīdzinājumā ar citām fāzēm. Trešā fāze ir parafāze, kuru veido mazmolekulāri ogļūdeņraži – aromātiski maltēni (sk. 58. att.)



58. att. Bitumena B20/30 struktūra

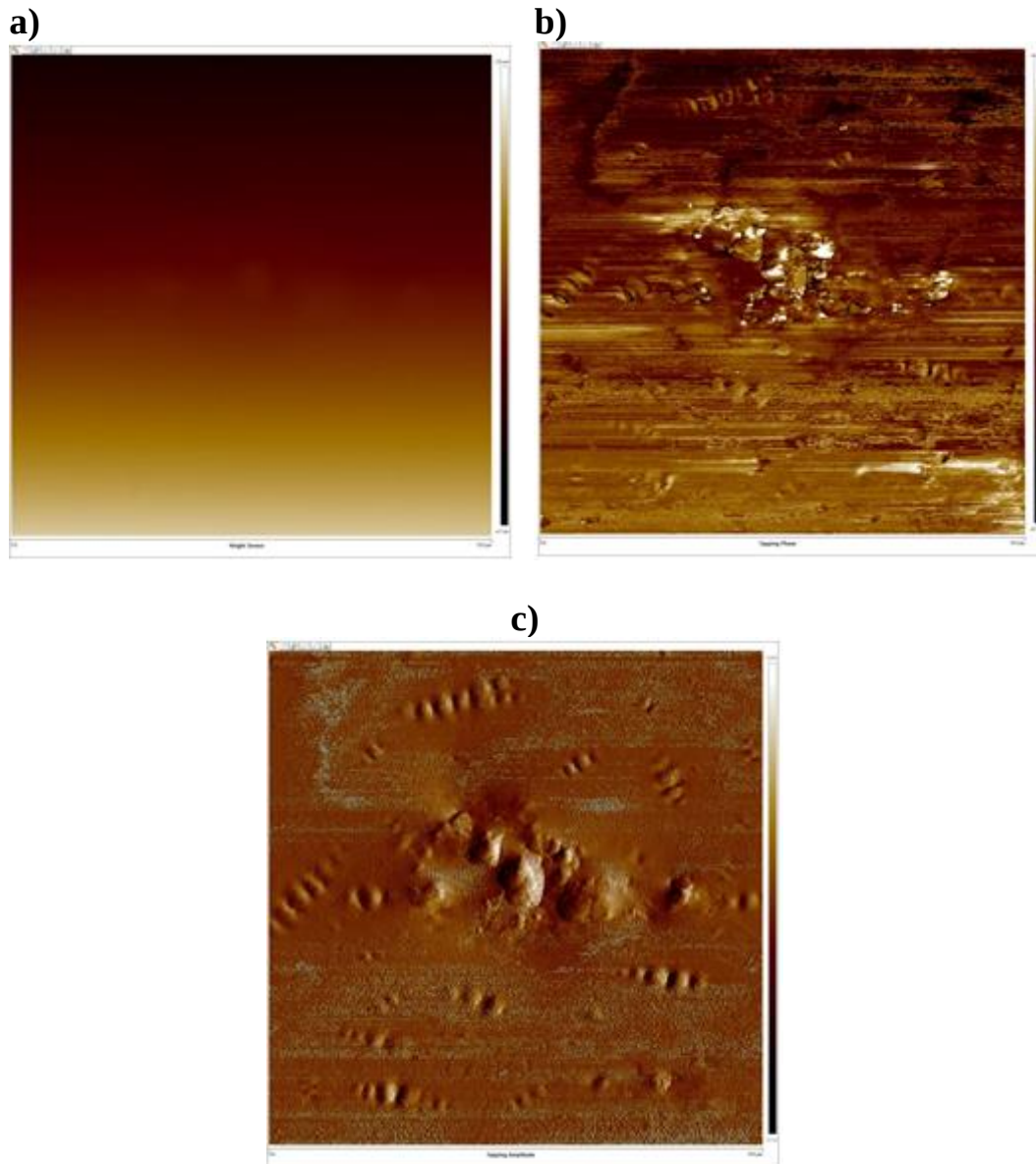
a) Augstuma attēls; b) Fāžu attēls; c) Pieskārsanas amplitūdas attēls

Salīdzinājumā ar iepriekšējo paraugu, bitumenam B70/100 ir augstāka penetrācija, t.i., šis bitumens ir mīkstāks. Pēc ATM bildēm var konstatēt, ka fāzes nav izkliedētas tik vienmērīgi kā bitumenā B20/30. Atsevišķas katanas fāzes saiet kopā, veidojot zvaigzveida savienojumus. Liels pārsvars ir perifāzes un parafāzes daudzumam, t.i., liels maltēnu daudzums (sk. 59. att.). Tas atbilst bitumenam ar zemāko viskozitāti.



59. att. Bitumena B70/100 struktūra
a) Augstuma attēls; b) Fāžu attēls; c) Pieskārsanas amplitūdas attēls

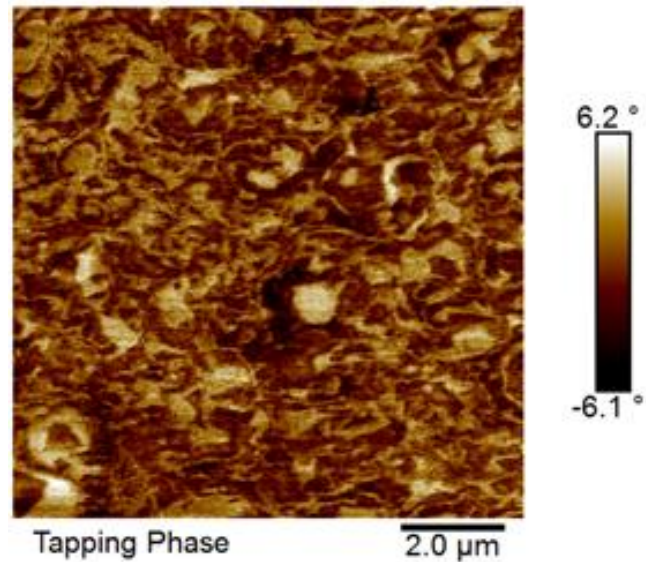
Polimērmodificētam bitumenam PMB 25/55-60 var konstatēt lielāku katanas fāzes daudzumu salīdzinājumā ar parastiem bitumeniem B20/30 un B70/100. Tas liecina par lielāku asfaltēnu daudzumu, ko izraisīja polimēru piedeva, t.i., šī bitumena viskozitāte palielinās. Dažām katanas fāzēm nav perifāzes, bet uzreiz parafāze, t.i., ap asfaltēniem uzreiz tiek izvietoti aromātiski maltēni (sk. 60. att.).



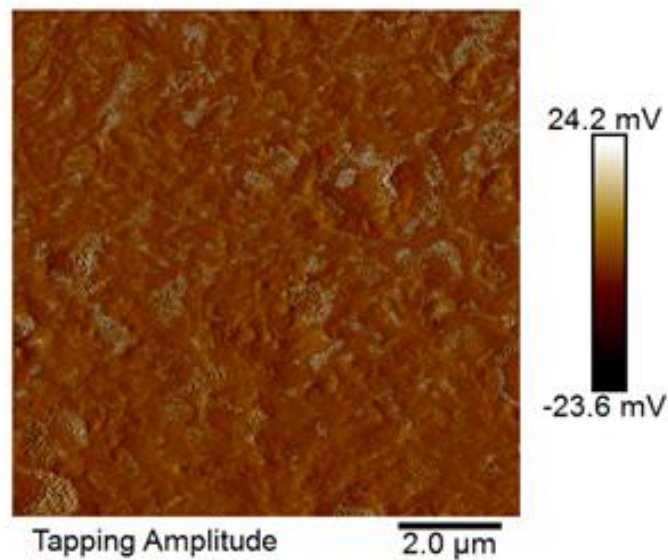
60. att. Bitumena PMB 25/55-60 struktūra
a) Augstuma attēls; b) Fāžu attēls; c) Pieskārsšanas amplitūdas attēls

Stabilam polimērmodificētam bitumenam PMB 45/80-55 (bitumenam, kura īpašības nemainās) var saredzēt divas dažādas fāzes – perifāzi un parafāzi, tomēr katanas fāze bildēs neparādās (sk. 61. att.). Fāzes ir izkliedētas vienmērīgi. Parafāze, t.i., fāze, kura bildēs ir gaišākā krāsā, ir lipīgāka, t.i., ar augstu adhēziju.

a)



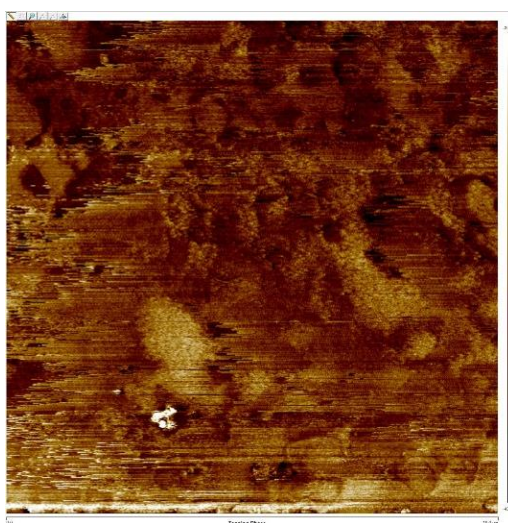
b)



61. att. Stabila bitumena PMB 45/80-55 struktūra
a) Fāžu attēls; b) Pieskārsanas amplitūdas attēls

Nestabilam polimērmodificētam bitumenam PMB 45/80-55 ir konstatēts ievērojami liels peri- un parafāzes daudzums (sk. 62. att.). Šim paraugam salīdzinājumā ar stabilo bitumenu gan peri-, gan parafāze ir „lipīga” (ar augstu adhēziju). Tas liecina par nestabila bitumena definīcijas pareizību – mainās bitumena īpašības, jo mainās arī bitumena komponentu īpašības. Rezultātā notiek bitumena noslāņošanās – lielāks maltēnu daudzums izraisa asfaltēnu noslāņošanos, un *visas fāzes bitumenā vairs nav vienmērīgi izvietotas*. Tāpēc nestabilam bitumenam, veicot uzturēšanas stabilitātes testus, tika iegūti krasi atšķirīgas vērtības starp parauga augšu un apakšu.

a)



b)



62. att. Nestabila bitumena PMB 45/80-55 struktūra
a) Fāžu attēls; b) Pieskārsanas amplitūdas attēls

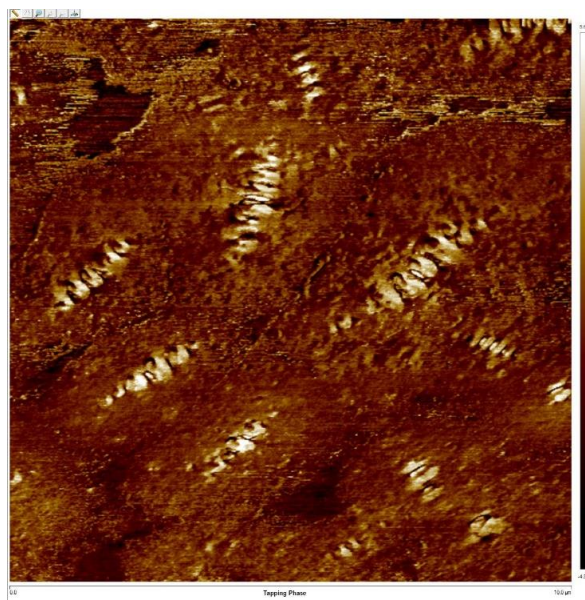
Turpinot ATM metodes aprobēšanu, veikta struktūras izpēte trīs polimērmodificētiem bitumeniem:

- a) 1. paraugs – PMB bitumens 45/80-55,
- b) 2. paraugs – PMB bitumens 45/80-65,
- c) 3. paraugs – PMB bitumens 45/80-80.

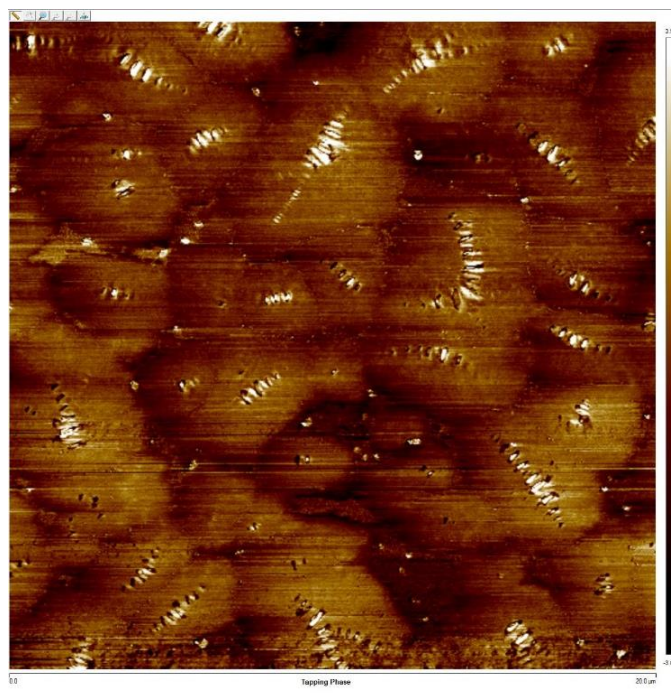
Šiem bitumeniem ir vienāds penetrācijas rādītājs, bet atšķiras mīksttāpšanas temperatūras.

Bitumenam PMB 45/80-55 tika uzņemtas bildes dažādās temperatūrās – istabas temperatūrā (+24°C) un parauga attiecīgajā mīksttāpšanas temperatūrā +55° C. Abos gadījumos tika iegūti pieskārsanas amplitūdas attēli (tapping amplitude) un fāžu attēli (tapping phase). Pieskārsanas amplitūdas attēli parāda adatas pieskārsanas amplitūdu parauga virsmai, t.i., jo mazāka ir amplitūda, jo augstāks ir punkts un otrādi, jo lielāka ir amplitūda, jo zemāks ir punkts. Tāpēc nav nepieciešamības pēc atsevišķo augstuma attēlu uzņemšanas.

Paraugam tika uzņemtas bildes divās dažādās temperatūrās ar nolūku, atkarībā no temperatūras, noteikt izmaiņas bitumena virsmas morfoloģijā – kā mainās fāžu daudzums, izvietojums un to esamība. Zemāk ir parādīti fāžu attēli PMB 45/80-55 paraugam +24°C temperatūrā (sk. 63. att.) un +55°C temperatūrā (sk. 64. att.).



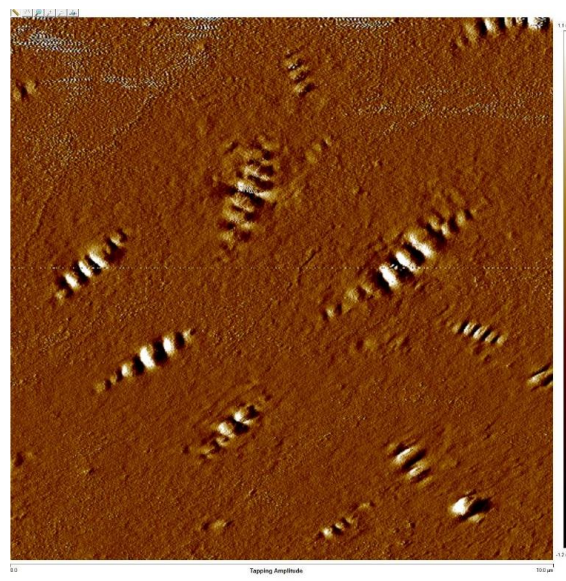
63. att. Bitumena PMB 45/80-55 fāžu nobīdes attēls +24°C temperatūrā.



64. att. Bitumena PMB 45/80-55 fāžu nobīdes attēls +55°C temperatūrā.

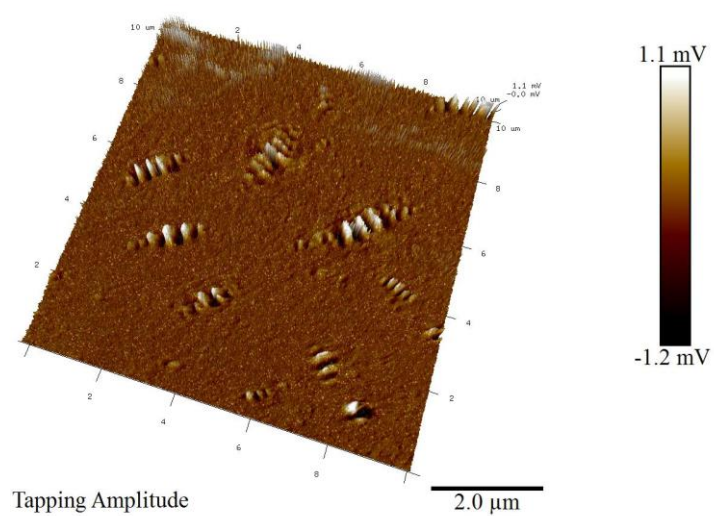
Analizējot ATM attēlus +55°C temperatūrā, konstatēts, ka visas bitumenā esošās fāzes paliek vieglāk saredzamākas, t.i., starp fāzēm ir lielāks kontrasts. Tas liecina par to, ka, paaugstinoties temperatūrai līdz bitumena mīksttāpšanas stāvokļa ieņemšanai, notiek bitumena morfoloģijas maiņa – saikne starp fāzēm samazinās. Šajā temperatūrā var redzēt visas fāzes, kas tika konstatētas paraugā +24°C temperatūrā. Tapāt konstatēts neliels perifāzes (sveķu) īpatsvars. +55°C temperatūrā saglabājas līdzīgs fāžu izvietojumu. Tā kā izvietojums mainās atkarībā no fāžu savstarpēja daudzuma, t.i., ja viena fāzes īpatsvars palielinās, citas fāzes tiek nobīdītas. Līdz ar to var pieļaut, ka augstākajā temperatūrā kāda no fāzēm varētu izzust.

Zemāk var redzēt iegūto pieskārsanas amplitūdas bildi PMB 45/80-55 paraugam istabas temperatūrā, t.i., +24°C (sk. 65. att., 66. att. – 3D modelis) un +55°C temperatūrā (sk. 67. att.).

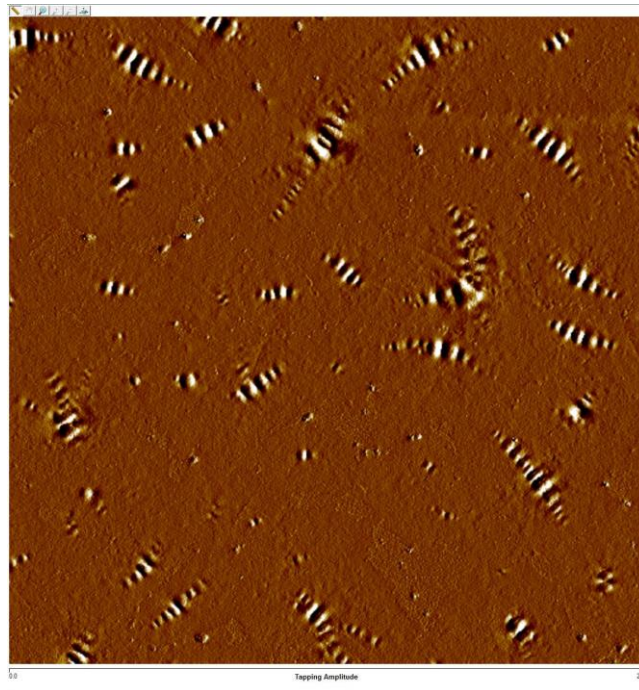


65. att. Bitumena PMB 45/80-55 pieskārsanas amplitūdas attēls +24°C temperatūrā

45__80_55.SIG_TM_AMPLITUDE_BKW.ftt



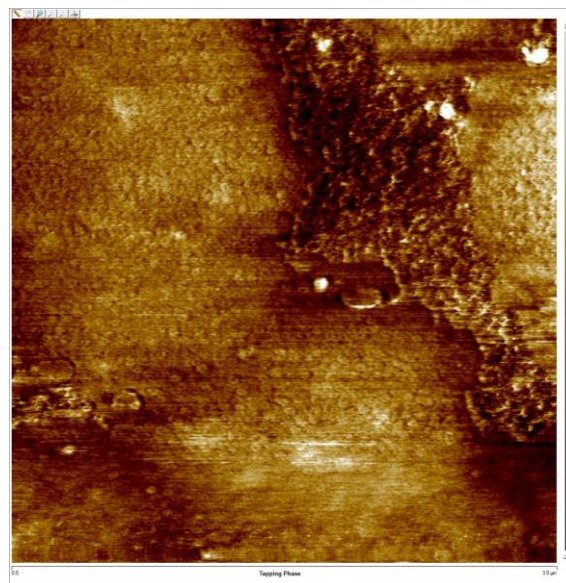
66. att. Bitumena PMB 45/80-55 pieskārsanas amplitūdas 3D modeļa attēls +24°C temperatūrā



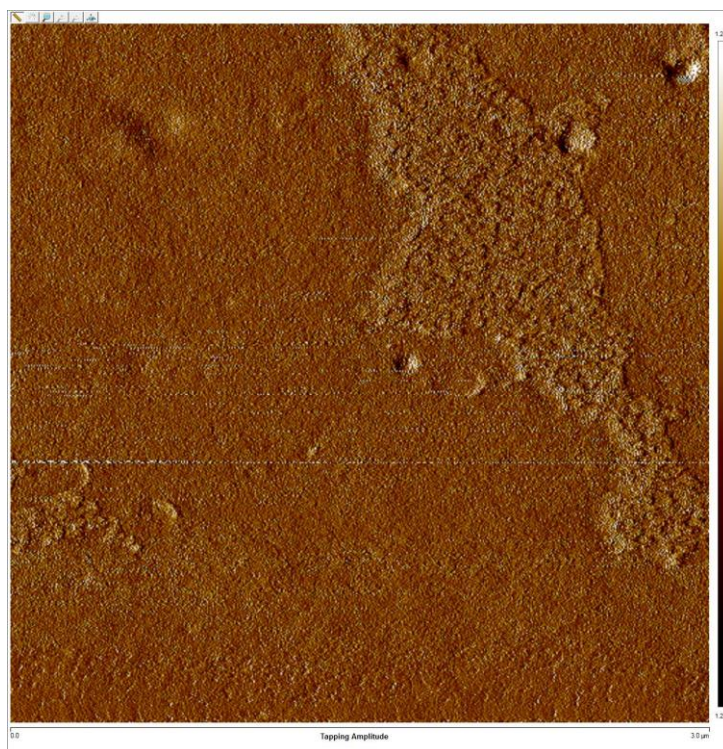
67. att. Bitumena PMB 45/80-55 pieskārsanas amplitūdas attēls +55°C temperatūrā

Paaugstinoties temperatūrai, tiek novērota dažu katanas fāžu (asfaltēnu) savienošanās. Var pieņemt, ka temperatūras ietekmē tādā veidā fāzes atdalās viena no otras, tāpēc tiek novērots tik iespaidīgs fāžu kontrasts fāžu nobīdes attēlos.

Papildus tika iegūtas pietuvinātas PMB 45/80-55 parauga bildes +55°C temperatūrā. Zemāk ir pievienoti iegūti fāžu nobīdes (sk. 68. att.) un pieskārsanas amplitūdas (sk. 69. att.) attēli.



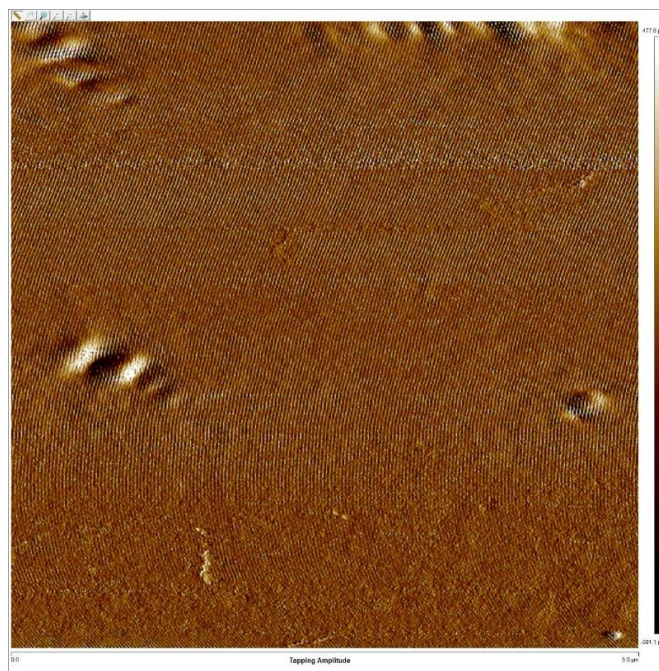
68. att. Bitumena PMB 45/80-55 fāžu nobīdes attēls +55°C temperatūrā
(pietuvinājums)



69. att. Bitumena PMB 45/80-55 pieskaršanas amplitūdas attēls +55°C temperatūrā
(pietuvinājums)

Sākotnēji tika ieplānots iegūt katanas fāzes (asfaltēnu) pietuvinātas bildes, bet tas diemžēl neizdevās. Rezultātā tika iegūtas pietuvinātas bildes katanas fāzes tuvumā. Pieskaršanas amplitūdas attēlā var redzēt fāzi, kas ir zemāka par blakus esošo fāzi, tomēr arī tai ir ekstrēmpunkti. Tā kā apskatāmais paraugs ir polimērmodificētais bitumens, tad var pieļaut, ka fāze, kas pēc augstuma ir zemāka, t.i., faktiski nosēdās apkārt esošajā fāzē, ir polimēra šķiedra.

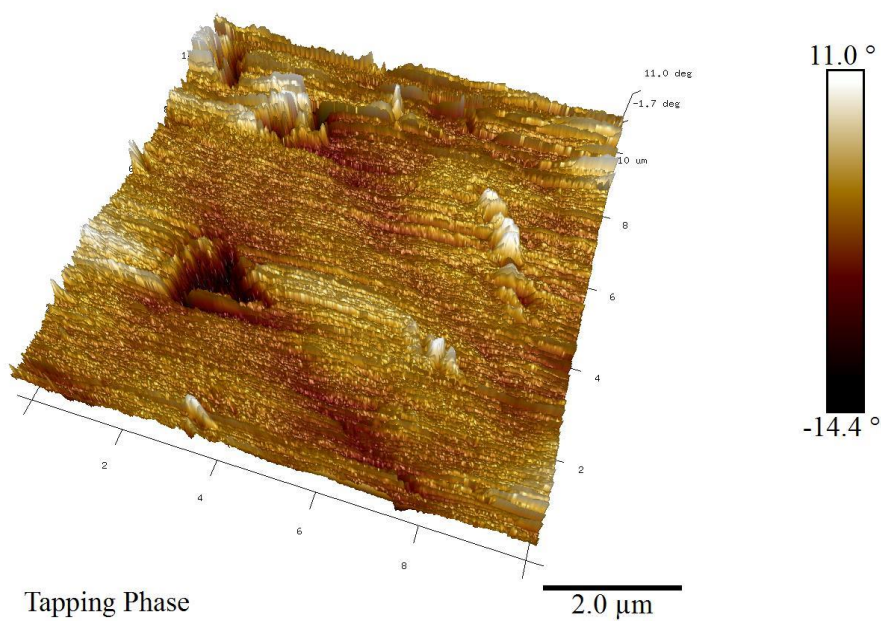
Līdzīgi kā PMB 45/80-55, PMB 45/80-65 paraugam tika iegūtas fāžu nobīdes bildes un pieskaršanas amplitūdas bildes istabas temperatūrā +24°C. Bilžu kvalitāte nav pietiekami augsta, kas liecina par iespējamu neatbilstošas adatas izvēli dotajam paraugam. Analizējot pieskaršanas amplitūdas, attēlos var redzēt, ka dotā parauga virsma ir samērā lipīga, kas nosaka zemu iegūtu bilžu kvalitāti. Arī pēc šīm bildēm var spriest, ka paraugam ir augstas adhēzijas spējas. Zemāk 70. attēlā ir parādīts PMB 45/80-65 parauga pieskaršanas amplitūdas attēls.



70. att. Bitumena PMB 45/80-65 pieskaršanas amplitūdas attēls +24°C temperatūrā

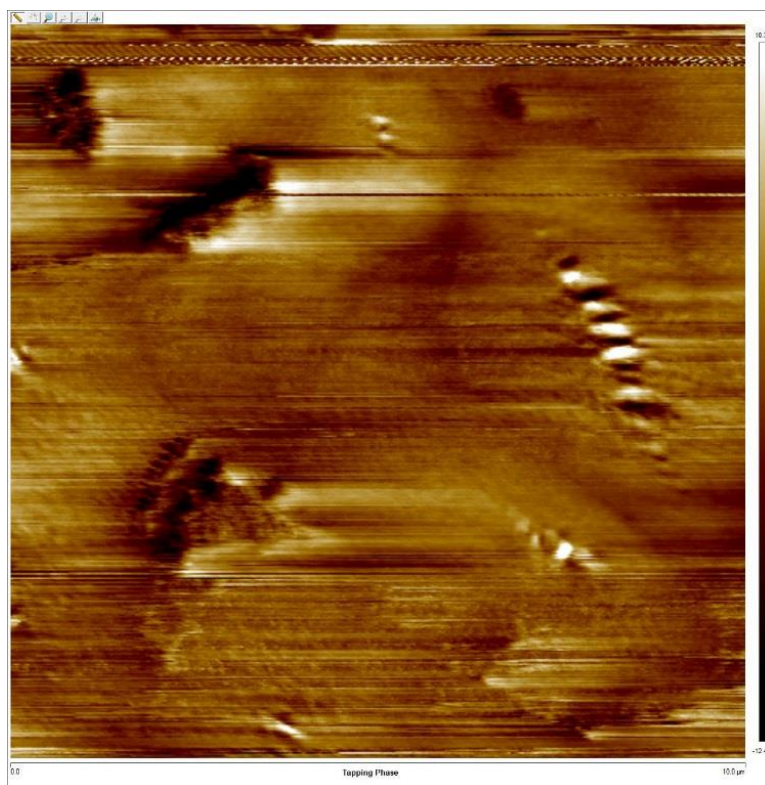
71. attēlā ir parādīts dota parauga fāžu nobīdes bildes 3D modelis:

45__80__65.SIG_TM_PHASE_BKW.flr



71. att. Bitumena PMB 45/80-65 fāžu nobīdes 3D modeļa attēls +24°C temperatūrā

72. attēlā ir PNB 45/80-65 parauga fāžu nobīdes 2D modelis:

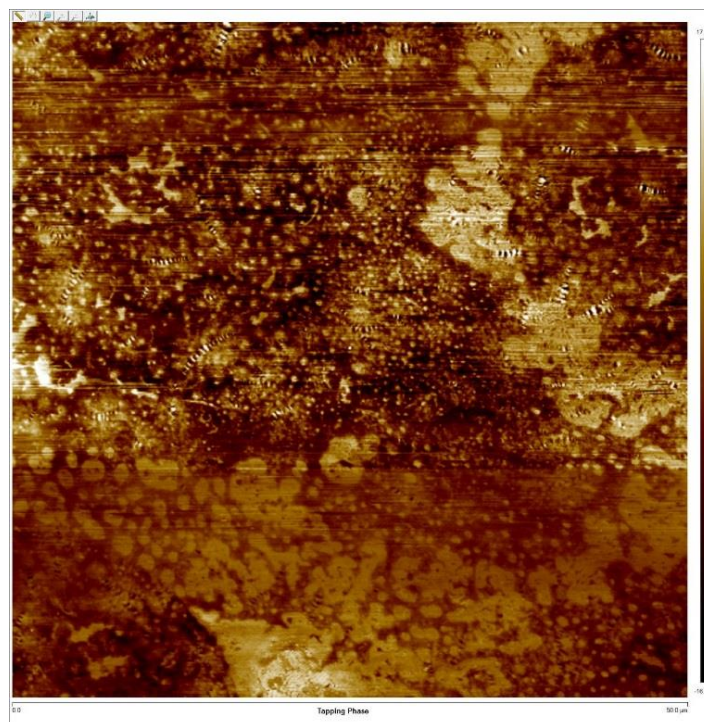


72. att. Bitumena PMB 45/80-65 fāžu nobīdes attēls +24°C temperatūrā

Kaut arī fāžu nobīdes attēlu kvalitāte nav tik augsta, ir saredzama gan katanas fāze (asfaltēni), gan perifāze (sveķi) un parafrāze (eļļas). Ir ievērojams perifāzes īpatsvars. To var izskaidrot ar to, kā parafrāzi – eļļas ir absorbējušās polimēra tilpumā.

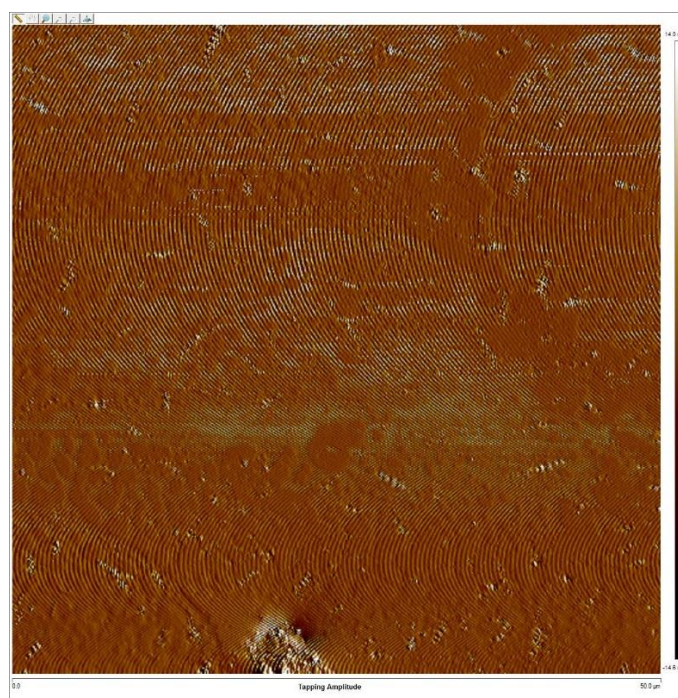
Trešajam paraugam - PMB 45/80-80 bitumenam tika uzņemtas fāžu nobīdes un pieskaršanas amplitūdas bildes. Bildes tika uzņemtas 2 vietās, dažādos izmēros (50μm×50μm un 20μm×20μm). Mazāka izmēra bildes nozīmē, ka paraugs tika apskatīts pietuvinājumā.

73. attēlā ir parādīta PMB 45/80-80 parauga fāžu nobīde (50μm×50μm).



73. att. Bitumena PMB 45/80-80 fāžu nobīdes attēls +24°C temperatūrā
(50μm×50μm)

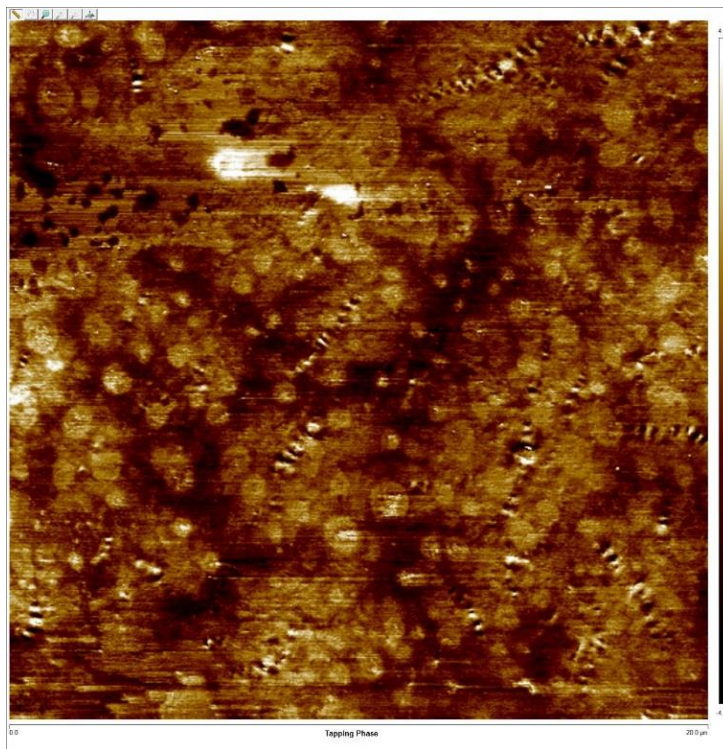
74. attēlā var redzēt PMB 45/80-80 parauga pieskaršanas amplitūdas bildi (50μm×50μm).



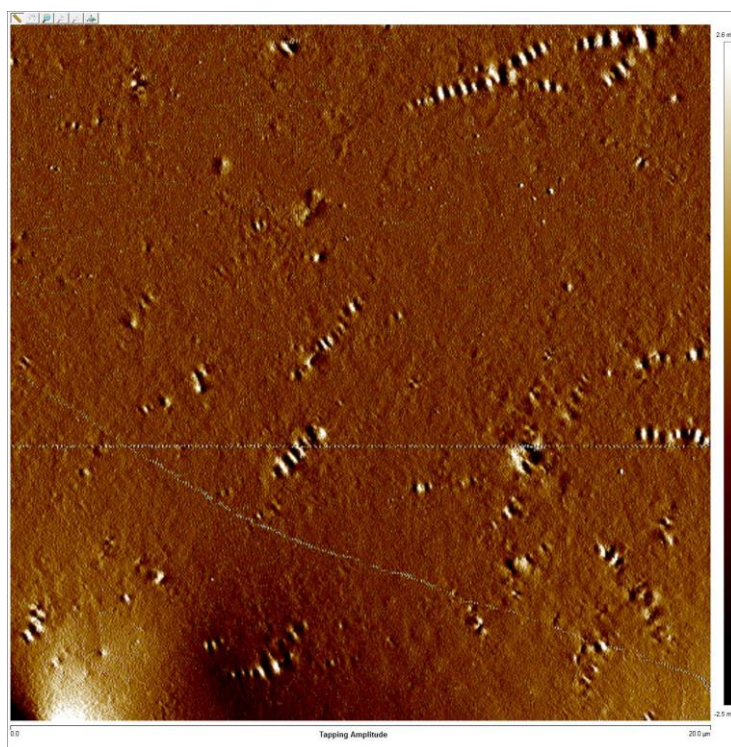
74. att. Bitumena PMB 45/80-80 pieskaršanas amplitūdas attēls +24°C temperatūrā
(50μm×50μm)

PMB 45/80-80 paraugā ir saskatāmas visas 3 fāzes (katanas fāze, perifāze un parafāze). Katanas fāzes izvietojums ir vienmērīgs, tomēr peri- un parafāzes izvietojums ir atšķirīgs - tiek novērota perifāzes (sveķi) īpatsvars noteiktos apgabalos. Parafāze (eļlas), spriežot pēc pieskaršanas amplitūdas attēliem, ir diezgan lipīga, t.i., apskatāmajam paraugam ir augstas adhēzijas spējas.

Paraugam PMB 45/80-80 tika iegūti arī pietuvinājuma attēli ($20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$). Zemāk var redzēt iegūto rezultātu (sk. 75. att. – fāžu nobīdes bilde un 76. att. – pieskaršanas amplitūdas bilde). No attēla var redzēt, ka, pietuvinot paraugu, konstatēts vienmērīgu fāžu izvietojumu.



75. att. Bitumena PMB 45/80-80 fāžu nobīdes attēls +24°C temperatūrā
($20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$)



76. att. Bitumena PMB 45/80-80 pieskaršanas amplitūdas attēls +24°C temperatūrā
(20μm×20μm)

7.5. Bitumena un minerālmateriāla adhēzija

Ar adhēzijas jēdzienu apzīmē divu dažādu materiālu savstarpējas pielipšanas spēkus. Kad viens cietvielu materiāls nonāk kontaktā ar citu ciet-/šķidra-/gāzveida materiālu, starp to pieskārsšanās virsmām darbojas savstarpējas pievilkšanās spēki. Šos pievilkšanās spēkus sauc par adhēzijas spēkiem.

Pastāv:

- Aktīvā pielipšana;
- Pasīvā pielipšana.

Ar aktīvu pielipšanu saprot minerālmateriāla virsmas slapināšanu ar saistvielu. Ar pasīvu pielipšanu saprot saistvielas slāņa nobīdes pretestību no minerālmateriāla virsmas ūdens ietekmē asfaltseguma ekspluatācijas apstākļos.

Adhēzijas spēkiem starp bitumenu un minerālmateriālu ir liela nozīme, tā kā tas tieši ietekmē ceļu kvalitāti un ilgmūžību. Mūsdienās pastāv problēma ar ceļu būvniecībai atbilstošākas naftas trūkumu, precīzi sakot, naftēnu saturošas naftas. Tāpēc biežāk un biežāk tiek izmantota nafta, kurā ir liels parafīnu daudzums. Liels parafīnu daudzums ietekmē bitumena kvalitāti, samazinot bitumena un minerālmateriāla adhēziju.

Adhēzija tiek veidota abu vielu mijiedarbības rezultātā. Tāpēc kā bitumena, tā arī minerālmateriāla ķīmiskais sastāvs un īpašības ietekmē adhēzijas saites stiprību. Runājot atsevišķi par bitumenu, tika konstatēts, ka bitumena ķīmiskais sastāvs ietekmē adhēzijas spēju [62]. Jo lielāks ir aromātisku ogļūdeņražu saturs bitumenā, jo lielāki ir adhēzijas spēki. Jo lielāka ir parafīnu koncentrācija bitumenā, jo vairāk pasliktinās adhēzija.

Tiek pieņemts optimāls parafīna daudzums bitumenā, kas apmierina adhēzijas spējas – maksimāli liels saturs ir 2% [62].

Atkarībā no naftas izcelšanās mainās bitumena ķīmiskais sastāvs. 25. tabulā ir apkopoti dati par dažādas izcelsmes bitumenu parafīnu daudzumu:

Parafīnu saturs dažādas izcelsmes bitumenos [62]

Bitumena izcelsme	Parafīnu saturs, %
Krievija	2,8
Tuvie Austrumi	1,8
Venecuēla	0,1
Ķīna	1,7

Runājot par minerālmateriālu, svarīga nozīme ir materiāla polaritātei. Polārām vielām ir raksturīgi stiprākie adhēzijas spēki nekā nepolārām. Polaritāte nosaka papildus virsmas enerģijas vērtību. Var konstatēt, ka tikko saplēstam minerālmateriālam ir lielāka virsmas enerģija nekā minerālmateriālam, kurš tika glabāts ilgāku laiku. Kad minerālmateriāls sabrūk, uz tas virsmas sakās polāro daļiņu reorganizācijas process. Adsorbējot dažādus gaisa komponentus (ūdeni, putekļus), samazinās minerālmateriāla virsmas enerģija līdz tam brīdim, kad tā sasniedz stabilu stāvokli.

Lai būtu iespējams izskaidrot adhēzijas raksturu starp bitumenu un minerālmateriālu, tika izstrādāti dažādas adhēzijas teorijas – mehāniskā, ķīmiskā, molekulāras orientēšanas teorija, termodinamiskā, atdalīšanas procesa teorija (poru spiediena teorija, izspiešanās teorija, infiltrācijas teorija, slāņa slapšanas teorija).

Pēc mehāniskās teorijas adhēzijas spēki ir lielāki minerālmateriālam ar lielāku porainību, jo tad ir lielāks divu vielu kontakta laukums (kontakta virsma).

Pēc molekulāras orientēšanas teorijas bitumenam un minerālmateriāla virsmai ir dažādi lādiņi. Kad vielas savstarpēji pieskaras, molekulas sāk pārvietoties robežvirsmas virzienā. Šo kustību izraisa minerālmateriāla virsmas vajadzība pēc enerģijas. Tādā veidā minerālmateriāla molekula ar negatīvo lādiņu tiek neitralizēta ar bitumena pozitīvi uzlādētu molekulu.

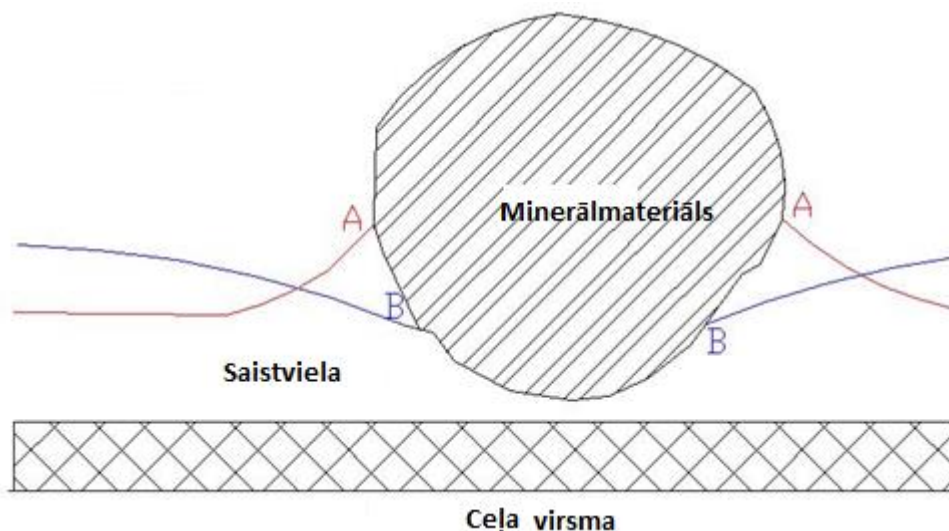
Atdalīšanas procesu teorijā ir izvirzīti divi adhēzijas spēku samazināšanas galvenie iemesli:

- Bitumena nepietiekama kohēzija;
- Nepietiekama adhēzija uz robežvirsmas starp bitumenu un minerālmateriālu.

Atdalīšanas procesu teorijas liecina par to, ka galvenais faktors, kas izraisa adhēzijas spēku samazināšanos, ir ūdens ietekme. Gadījumā, ja adhēzijas spēki nav pietiekami

lieli, bet netiek novērota ūdens ietekme, šo parādību izskaidro ar maziem bitumena kohēzijas spēkiem.

77. attēlā parādīts kā mainās bitumena un minerālmateriāla saskāršanas ūdens ietekmē:



A: Saistvielas un minerālmateriāla kontakts sausa stāvoklī,
B: Saistvielas un bitumena kontakts ūdens klātbūtnē.

77. att. Bitumena un minerālmateriāla saskāršanas ūdens ietekmē

Metodes adhēzijas spēka noteikšanai starp bitumenu un minerālmateriālu

Zemāk ir aprakstīta metode adhēzijas noteikšanai, kuru izstrādāja Transporta un Ceļu būves pētīšanas sabiedrība (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen). Šī metode ir plaši izmantota Vācijā.

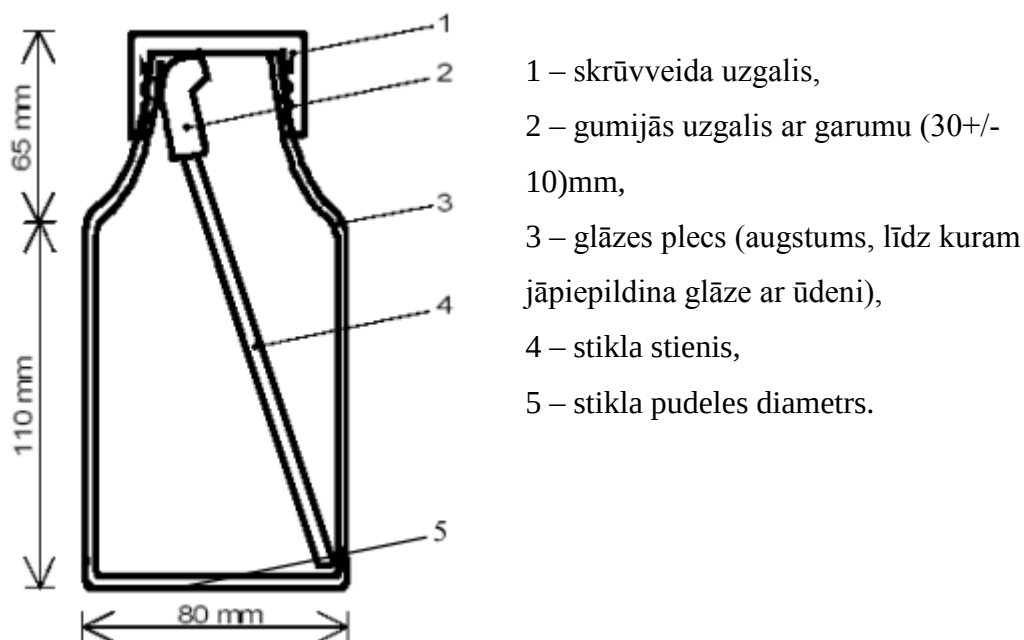
Ar šo metodi adhēzija starp bitumenu un minerālmateriālu tiek novērtēta vizuāli pēc minerālmateriāla un bitumena pārseguma pakāpes (%). Kā paraugs kalpo minerālmateriāli ar frakciju 8/11, kā alternatīva var būt minerālmateriāli ar frakciju 5/8.

Minerālmateriālu notīra no putekļiem un tiek pilnībā izžāvēta (lai parauga masa būtu nemainīga). Pēc izžūšanas minerālmateriālu ieliek krāsnī, kurā ir uzturēta noteikta maisīšanās temperatūra, kura ir atkarīga no bitumena tipa (jo lielāka penetrācija, jo zemāka ir maisīšanās temperatūra) uz vismaz 3 stundām. Bitumens ir ieslēgts metāliskā glāzē ar vāku un tiek turēts 3+/-1 stundu krāsnī maisīšanas

temperatūrā. Pirms minerālmateriāls tiek samaisīts ar bitumenu, vispirms samaisa pašu bitumena, lai panāktu to homogēnu vidi. Nepieciešams bitumena daudzums frakcijai 8/11 ir $\alpha \cdot (16.0 \pm 0.2)g$ un frakcijai 5/8 ir $\alpha \cdot (18.0 \pm 0.2)g$, kur α ir korekcijas koeficients, kurš mainās atkarībā no minerālmateriāla blīvuma.

Tad minerālmateriālu samaisa ar bitumenu tā, lai tas pilnībā pārklātu katru minerālmateriāla daļiņu. Tad paraugu novieto uz metāla plāksnes vai ar silikonu pārklātu papīru, lai nodrošināt, ka katra minerālmateriāla daļiņa ir atdalīta (lai daļiņas nesalīptu kopā), un atstāj no saules stariem un putekļiem izolēta vietā uz 12 – 64 stundām.

Tad paraugs tiek ievietots 3 stikla glāzēs (katrā glāze ir vienāds parauga daudzums). Katru glāzi līdz pusei piepildina ar aukstu destilētu ūdeni (5 ± 2)°C. Tik auksta temperatūra ir nepieciešama, lai novērstu daļiņu salīpšanu. Katru minerālmateriāla daļiņu, kas ir pārklāta ar bitumenu, ievieto glāze atsevišķi, lai novērstu salīpšanu. Tad glāzes piepildina līdz noteiktai atzīmei ar aukstu destilētu ūdeni (5 ± 2)°C. Glāzē ir ievietots stikla stienis ar gumijas uzgali, kurš jānovieto tā, lai stienis būtu nofiksēts un nekustētos (sk. 78. att.). Tas ir veikts daļiņu savstarpējas salīpšanas novēršanai.



78. att. Stikla glāze adhēzijas testa veikšanai:

Visas trīs ar paraugiem un ūdeni piepildītas stikla glāzes tiek novietotas rotējošā aparātā (rotācijas ātrums ir atkarīgs no bitumena tipa). Pārbaude tiek veikta istabas temperatūrā no saules stariem pasargātā telpā. Ūdens temperatūra glāzēs sākumā ir 5°C, bet pārbaudes gaitā tā tiek paaugstināta līdz istabas temperatūrai. Rotācija ilgst (6+/-0.25)h. Tad paraugu izņem no pudeles, izskalo ar svaigu destilētu ūdeni un novieto uz tīras, baltas apakšvirsmas. Tad tiek veikts vizuāls novērtējums. Pārbaudi var turpināt otro reizi, liekot paraugam rotēt (18+/-0.25)h (kopā ar pirmo pārbaudi 24h). Glāzēs ievieto svaigu destilētu ūdeni. Var turpināt pārbaudi arī trešo (lai kopā būtu 48h) un ceturto (72h) reizi.

Vizuāls novērtējums tiek izteikt procentos (cik % no visa minerālmateriāla daļiņu daudzuma palika pilnībā pārklāti ar bitumenu). Rezultātus var apkopot grafikā, atspoguļojot minerālmateriāla daļiņu pārklāšanas ar bitumenu pakāpi (%) atkarībā no rotācijas ilguma (h).

Latvijā pašlaik tiek izmantotas tādas adhēzijas noteikšanas metodes kā Violita plātnes metode un vārīšanas metode. Salīdzinot iepriekš aprakstīto, Vācijā pielietoto metodi un Latvijā pielietoto vārīšanas metodi, var konstatēt, ka metodes ir līdzīgas, tomēr Vācijā tika veiktas dažas modifikācijas. Galvenā atšķirība ir tāda, ka Vācijas metode vārīšanas process kā tāds nenotiek. Paraugi tiek rotēti 25°C siltā ūdenī 6 stundu laikā, un ūdens sākuma temperatūra ir 5°C, un rotēšanas procesā ūdens sasilst līdz istabas temperatūrai, t.i., līdz apmēram 25°C. Galvenā priekšrocība šai metodei ir tāda, ka apstākļi, kuros pārbaude tiek veikta, ir atbilstošāki apstākļiem, kuros ceļa segums atrodas ikdienas ekspluatācijā. Vārīšanas metodē, kas ir pielietojama Latvijā, šķembas, kuru virsma ir pārklāta ar bitumenu, ir pakļautas ekstrēmiem apstākļiem, t.i., 100°C temperatūrai.

No vienas puses, vārot šķembas, var noteikt adhēzijas spēkus ekstrēmās situācijās. No otras puses, pārsvarā maksimāla temperatūra, kuru sasniedz ceļa segums gada laikā, ir ap 50-60°C. Tāpēc vērts aizdomāties, vai ir vērts pārbaudīt adhēzijas spēkus tik augstā temperatūrā.

Cita priekšrocība ir tāda, ka rotēšanas process ir draudzīgāks un labvēlīgāks apkārtējai videi nekā vārīšanas process, kurā tiek patērēts lielāks enerģijas daudzums. Rotēšanas procesā ūdens netiek sasildīts, notiek tikai siltumapmaiņa starp ūdeni un apkārtējo vidi.

Metodes precizitāti uzlabo tas fakts, ka vienlaicīgi tiek rotētas 3 pudeles, t.i., tiek pārbaudīti trīs paraugi.

Galvenais trūkums metodei, kas tiek pielietota Vācijā, ir tas, ka ļoti svarīgi ir novērst šķembu salipšanu. Svarīgi ir nodrošināt tādu temperatūru apkārtējā vidē, kura nav pārāk augsta. Ja darba apstākļos temperatūra ir virs 30°C, kas var notikt vasarā, tad var gadīties tā, ka pārbaude neizdosies un būs jāveic viss process vēlreiz no paša sākuma.

Cits trūkums ir tāds, kas šī pārbaude prasa daudz laika. Sākumā paraugs ir jāsagatavo, jāatļauj šķembām un bitumenam pilnīgi salipt kopā, un tikai nākamajā dienā var veikt pārbaudi.

Parauga sagatavošanā jābūt precīzam un jāievēro visas prasītās vielu temperatūras. Ja šķembas vai bitumens nebūs pietiekami silti, jau pašā sākumā salipšana starp divām vielām var būt nepietiekami laba, kas novedīs pie šķembu salipšanas rotēšanas laikā.

Viena no visplašāk lietotajām metodēm adhēzijas starp bitumenu un mēģenām materiālu novērtēšanai Eiropā ir rotējošo stikla pudeļu (rolling bottle) metode atbilstoši LVS EN 12697-11 standarta prasībām. Testēšanas gaitā pildvielas daļiņas pārklāj ar bitumenu un novieto stikla pudelēs ar dejonizēto ūdeni, kurā atrodas stikla nūja. Stikla pudeles ar paraugu novieto rotācijas iekārtā un noteiktu laiku veic pudeļu rotāciju, pakļaujot materiālu mehāniskai maisīšanai ūdens klātbūtnē (sk. 79. att.). Pēc 6 un 24 stundām divi operatori veic paraugu vizuālu novērtējumu, nosakot procentuālu pildvielas daļiņu pārklājumu ar bitumenu ar precizitāti 5%.



79. att. Rotējošu pudeļu tests adhēzijas starp šķembu daļiņām un bitumenu noteikšanai

26. tabulā apkopoti rezultāti, nosakot dažādas izcelsmes pildvielu adhēziju ar bitumenu B70/100.

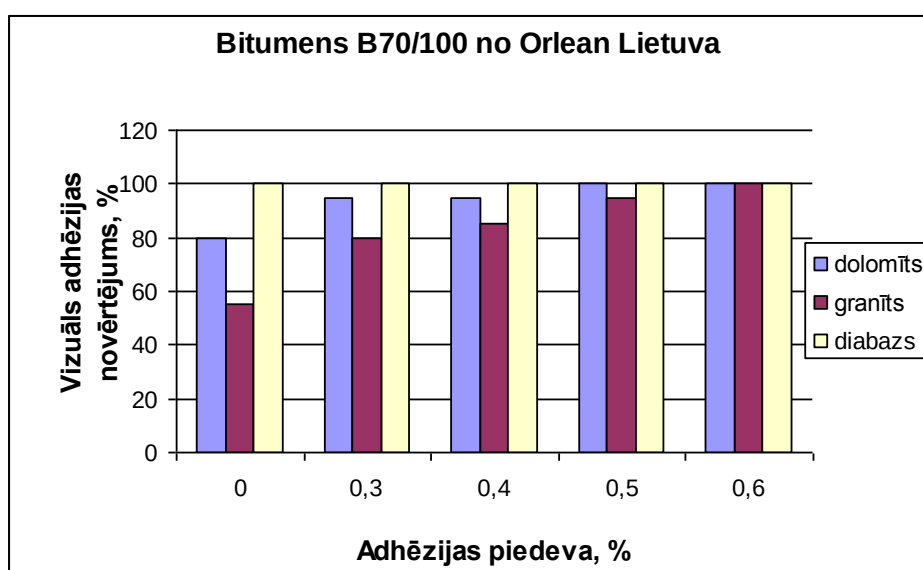
Tabula 26

Adhēzijas īpašību salīdzinājums

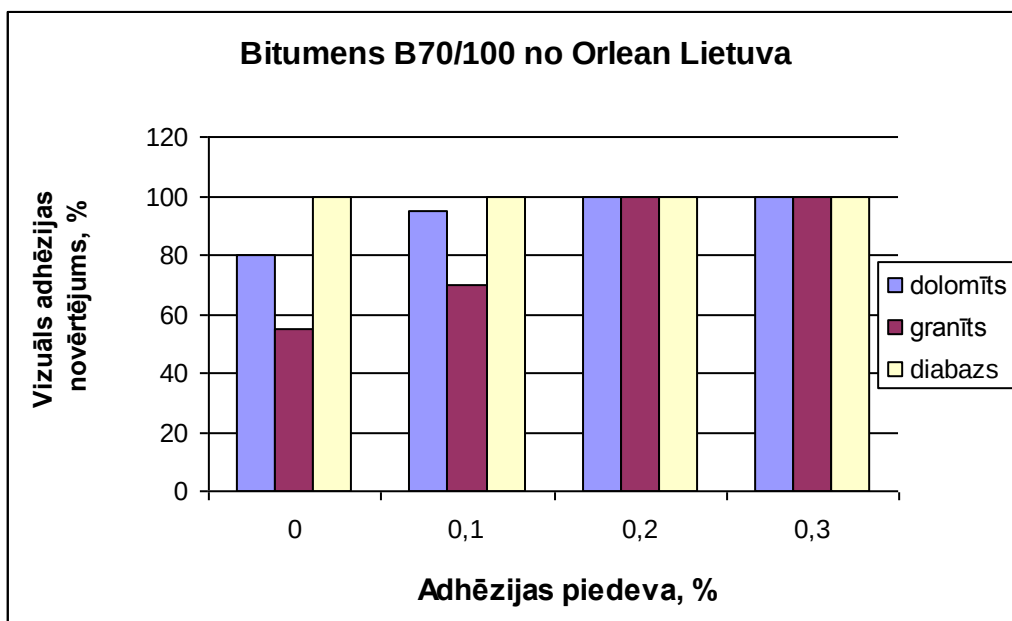
Materiāls	Testēšanas metode un daļiņu % pārklājums ar bitumenu		
	Vārīšanas tests	Vācu tests	Rotācijas pudeļu tests
Granīts	50	45	45
Dolomīts	80	85	90
Diabazs	100	95	100

Analizējot rezultātus, konstatēts, ka rezultātu atšķirība, veicot bitumena un pildvielas adhēzijas īpašību noteikšanu, var atšķirties līdz pat 10%. Šo atšķirību veido testēšanas metožu atšķirība, kā arī tas, ka vizuālo novērtējumu veica dažādi operatori, dažādas laboratorijas.

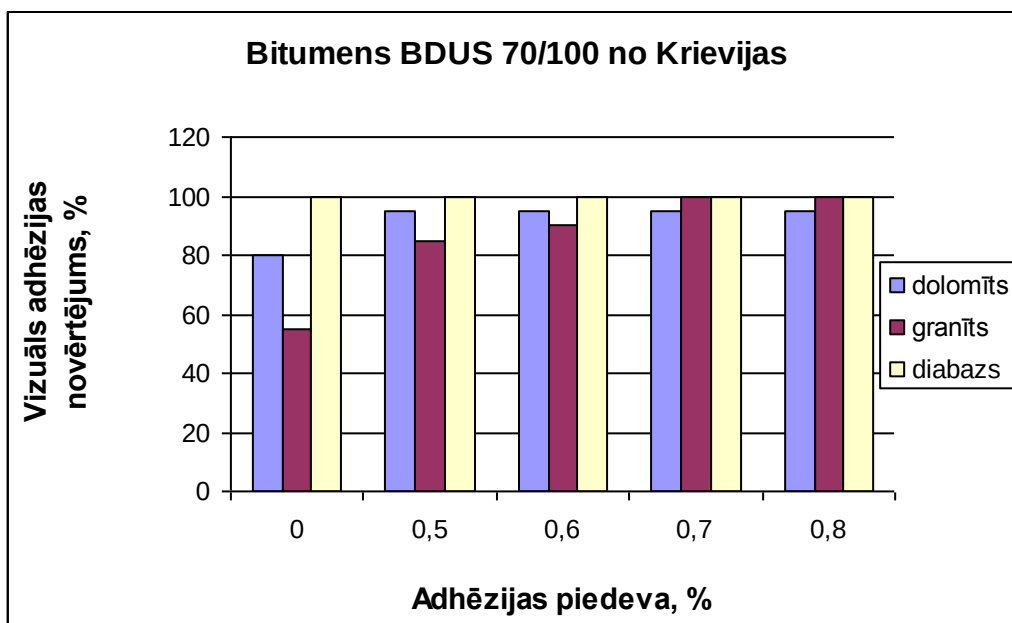
Adhēzijas īpašību izpēte ir svarīgs priekšizpētes posms, lai radīt asfaltbetona maisījumus ar augstām ekspluatācijas īpašībām. Svarīgi novērtēt izvēlēta bitumena adhēzijas īpašības ar izvēlēto minerālmateriālu, lai, neatbilstošu rezultātu gadījumā, izvēlēties piemērotu adhēzijas piedevu. 80. – 83. attēlos, izmantojot dažādu ražotāju bitumenus B70/100 ar dažādas izcelsmes minerālmateriālus, apkopoti adhēzijas īpašību testu (vārīšanas metode) rezultāti. Adhēzijas uzlabošanai pielietotas divu veidu adhēzijas piedevas – uz amīnu un polifosforskābes bāzēm. Izejmateriāli un piedevas ņemtas no Latvijas ceļu būvniecības uzņēmumiem.



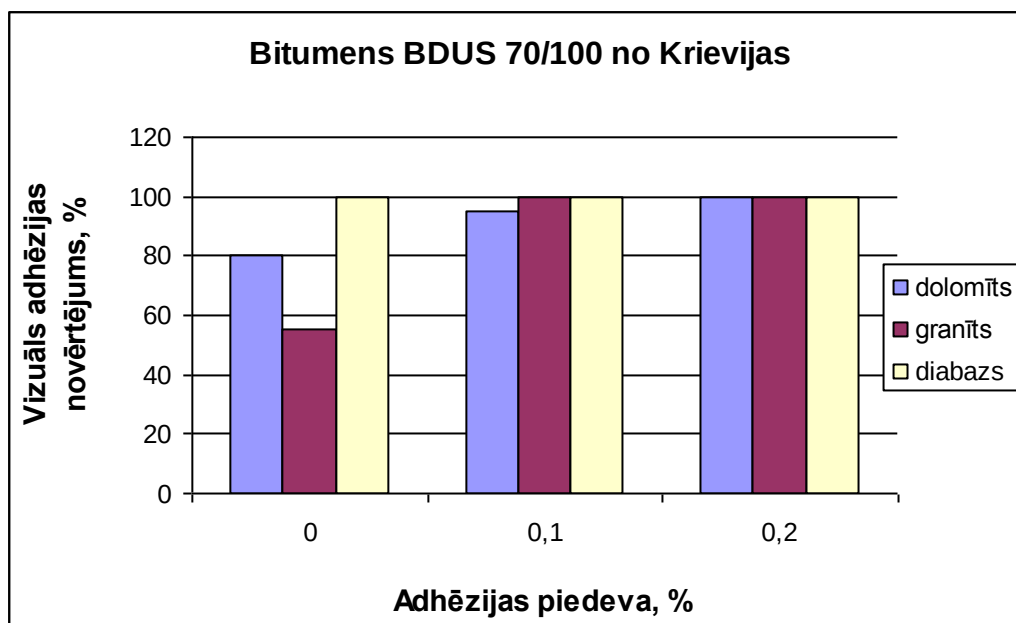
80. att. Adhēzijas īpašības dažādas izcelsmes minerālmateriāliem ar bitumenu B70/100 no Orlean Lietuva ar polifosforskābi



81. att. Adhēzijas īpašības dažādas izcelsmes minerālmateriāliem ar bitumenu B70/100 no Orlean Lietuva un adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes



82. att. Adhēzijas īpašības dažādas izcelsmes minerālmateriāliem ar bitumenu B70/100 no Krievijas un adhēzijas piedevu uz polifosforskābes bāzes



83. att. Adhēzijas īpašības dažādas izcelsmes minerālmateriāliem ar bitumenu B70/100 no Krievijas un adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes

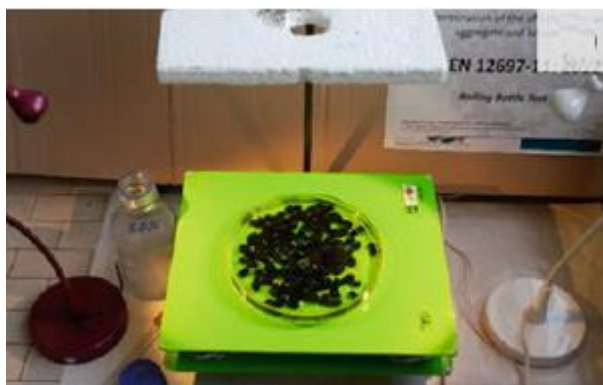
Analizējot rezultātus konstatēts, ka labākas adhēzijas īpašības ar bitumenu B70/100 (neatkarīgi no izcelsmes) ir diabaza šķembām, kuras uzrāda augstāko adhēziju (100%) bez piedevas. Dolomīts bez adhēzijas piedevas uzrāda 80% augsto adhēzija rādītāju. Pievienojot dolomītam adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes 0,2% no bitumena masas tiek sasniegts maksimālais adhēzijas rādītājs (100%). Tapāt augstākais adhēzijas rādītājs tiek sasniegts bitumenam no Orlean (Lietuva), ja 0,5% daudzumā no bitumena masas pievieno piedevu uz polifosforskābes bāzes. Dolomīta šķembām ar Krievijas bitumenu B 70/100 un adhēzijas piedevu uz polifosforskābes bāzes sasniegts 95% augsts adhēzijas rādītājs. Zemāko adhēziju – 50% bez piedevas uzrāda granīta šķembas. Tomēr, pievienojot adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes 0,1 - 0,2% vai 0,6 - 0,7 uz polifosforskābe bāzes, tiek sasniegts granīta un bitumena maksimālais adhēzijas rādītājs.

Apskatītājām metodēm, tajā skaitā vārīšanas testam, kuru izmanto Latvijā, ir vairākas priekšrocības, kā, piemēram, izpildes ātrums, zemas iekārtu izmaksas un piemērotība rutīnu testu veikšanai. Tomēr vizuālam novērtējumam ir daži būtiski trūkumi, kā, piemēram, cilvēciskais faktors, apgaismojums un pildvielas daļiņu krāsa. Tumšā vai pelēkā krāsā pildvielas daļiņas (bazalts, diabazs, tērauda sārņi utt.) var sajaukt ar bitumenu. Tāpēc nepieciešama šo metožu pilnveidošana, jo pārāk

optimistisks adhēzijas novērtējums var samazināt ceļa seguma kalpošanas laiku, savukārt pesimistisks novērtējums var prasīt nepamatotu adhēzijas piedevu izmantošanu, kas veicinās izmaksu palielinājumu.

Viens no viegli realizējamiem bitumena un pildvielas adhēzijas novērtēšanas paņēmieniem, pēc iepriekš apskatīto testu veikšanas, ir uzņemt notestētu paraugu digitālos foto attēlus un veikt to datorizētu apstrādi un analīzi.

Rikardo Lampereti (Riccardo Lampereti) no Boloņas universitātes (Itālija) izstrādāja vienkāršu paņēmieni digitālās fotogrāfijas uzņemšanai un apstrādei. Paraugs, kurš atrodas caurspīdīgā stikla traukā ar dejonizētu ūdeni, ir novietots uz plātnes ar gaiši zaļo fonu (sk. 84. att.). Plātnei apgaismo 2 lampas ar gaismas krišanas leņķi 45°, kas ļauj izvairīties no ēnas veidošanās. Digitālo fotogrāfiju uzņem ar 10MP kameru ar ISO 100 no 30cm attāluma.



84. att. Iekārtas un paraugs digitālā attēla uzņemšanai [63]

Digitālo fotogrāfiju apstrādei izmanto uz Java bāzes internetā brīvi pieejamo attēlu apstrādes programmas. Starp dažādām pieejamām krāsu telpām (colours spaces) tika izvēlēta YUV krāsu telpa. YUV krāsu telpa sadala RGB (red, green, blue) attēlu uz spilgtumu (luminance) un krāsu signālu (chrominance) ar nosacījumu viens spilgtums Y (luma) un divi krāsu signāli UV. Luma nodrošina spilgtumu, savukārt U un V nodrošina krāsu informāciju un ir „krāsu starpības” signāli - zilā krāsa mīnus luma (B-R) un sarkanā krāsa mīnus luma (R-Y). YUV izvēlēts, jo attēlu apstrādes procesā spēj atšķirt spilgtumu (luminance) no krāsu informācijas, neietekmējot citas krāsu komponentes. Digitālu attēlu apstrādes programma ļauj definēt sākumstāvokli visām Y, U un V komponentēm, kuri veido attēlu. Tad tiek noņemts zaļais fons, lai

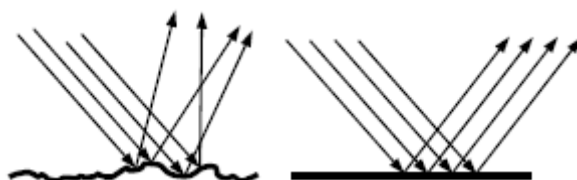
attēlā būtu tikai pildvielas daļiņas un bitumens. Pēc tam Y,U un V komponentu diapazons tiek samazināts, lai iegūt tikai bitumena attēlu (sk. 85. att.).



85. att. Digitālā attēla apstrādes process [63].

Salīdzinot adhēzijas testu rezultātus, noteiktus tikai ar vizuālu novērtējumu un noteiktus veicot digitālo attēlu uzņemšanu un analīzi, konstatēts, ka, salīdzinājumā ar tradicionālo metodi, pilnveidotā metode uzrāda līdz pat 23% lielāko bitumena pārklājumu uz tumšām un pelēkām pildvielu daļiņām [63].

Kristiāns Mulsovs no Dresdēnas Tehniskās universitāte, Fotogrammetrijas institūta piedāvā bitumena un pildvielu pārklājuma vizuālo novērtējumu veikt ar vairāku virzienu (multi-directional) atstarošanas mērījumu metodi. Ar atstarošanas īpašībām novērtējot gan raupjas šķembu daļiņas, gan gludu bitumena virsmu. Raupjai virsmai izstarota gaisma būs izkliedēta (sk. 86. att.)



86. att. Atstarojošās īpašības raupjai virsmai (pa kreisi) un gludai bitumena virsmai (pa labi)

Atstarošanās īpašības efektīvāk novērtēt ar lāzera palīdzību. 87. attēlā var redzēt, ka, veicot digitālās fotogrāfijas uzņemšanu, bitumens un pildvielu daļiņas ir grūti atšķiramas, jo pelēkā un melnā krāsa saplūst vienā krāsā. Savukārt, veicot apgaismojumu ar lāzera gaismu (viļņu garums 660nm), atšķirība ir daudz izteiktāka.



87. att. Digitālas fotogrāfijas uzņemtas dienas gaismā (pa kreisi) un ar lāzera palīdzību (pa labi) [64]

7.6. Apkopojums un secinājumi par 7. nodaļu

Modificēto un nemodificēto bitumenu struktūras un funkcionālo grupu sastāva noteikšana ar ATM metodi

Pētījumā tika veikti eksperimentālie testi ar atomspēka mikroskopa (AFM – Atomic force microscope) palīdzību, kur tika iegūti divu dažādu bitumenu paraugu (nemodificēta bitumena 20/30 un polimērmodificēta bitumena PMB 25/55-60) virsmas morfoloģijas attēli, kuros iespējams saskatīt dažādās fāzes bitumenā. Svarīgi ir sagatavot paraugus ar gludu virsmu, lai iegūtie attēli būtu kvalitatīvi un atbilstu patiesai situācijai. Spriežot par iegūto attēlu kvalitāti, var secināt, ka bitumena PMB 25/55-60 paraugi tika sagatavoti atbilstoši prasībām – ar vienmērīgu struktūru un gludu virsmu, bet nemodificēta bitumena 20/30 parauga virsma nebija pietiekami gluda. Bitumenam 20/30 augstumu attēlos pirmajā iegūtajā attēlā (55.att) ir redzams līnijveidīgs veidols ar ievērojamu augstuma atšķirību. Tā kā apskatāmais paraugs netika modificēts, tad tā nevar būt polimēra šķiedra. Iespējams, ka tas ir parauga sagatavošanas procesā izveidojies veidojums (attēla fragments) uz virsmas. Novirzes attēli tikai apstiprina, ka šis veidojums (attēla fragments) parādījās parauga sagatavošanas procesā, t.i., tam nav saistības ar bitumena morfoloģiju.

Pētījumā tika konstatēts, ka piemērotākais atomspēka mikroskopa darbības režīms augstumu attēlu iegūšanai ir periodiskās pieskaršanas (tapping mode) režīms, kas sniedz labākus un precīzākus attēlus salīdzinājumā ar nepārtrauktas pieskaršanās darbības režīmu.

Eksperimentā iegūtie attēli, izmantojot nepārtrauktas pieskaršanas darbības režīmu, sniedza izplūdušus augstumu attēlus, bet precīzus un ar lielu kontrastu novirzes attēlus. Tomēr no iegūtiem attēliem nav iespējams noteikt bitumena funkcionālo grupu sastāvu.

Veicot testus ar atomspēka mikroskopa ATM, izmantojot pārtraukto kontakta darbības režīmu, iegūti precīzi bitumena struktūras attēli, kur pētījuma veikšanai izvēlēta atbilstoša adata, kurai ir sekojoši parametri: 40 N/m (springa konstante), – 125 μm (garums), 300 kHz (frekvence). Analizējot iegūtos attēlus ar šo režīmu, noteikta bitumena funkcionālo grupu (asfaltēnu, sveķu un eļļu) sastāvs. Noteikta stabilā un nestabilā bitumena struktūra. Stabilam polimērmodificētām bitumenam ATM bildēs (sk. att. 58 - 60) ir saredzamas vienmērīgi izkliedētas bitumena funkcionālās grupas, savukārt nestabilam bitumenam funkcionālās grupas izvietotas nevienmērīgi.

Tā kā bitumena īpašības vislielākā mērā ietekmē asfaltbetona īpašības, šo metodi ir lietderīgi izmantot praktiskiem un zinātniskiem nolūkiem, lai izstrādātu

ilgmūžīgus asfaltbetonus, piemērām, ar PMB un RAP bitumeniem, kā arī bitumena kvalitātes pārbaudēm no ķīmiskā un fizikāli ķīmiskā aspektiem.

Adhēzijas īpašības

Darbā analizētas trīs adhēzijas noteikšanas metodes - vārīšanas metode (plaši izmanto Latvijā), rotējošo stikla pudeļu (rolling bottle) metode atbilstoši LVS EN 12697-11 standarta prasībām un metode adhēzijas noteikšanai, kuru izstrādāja Vācu Transporta un Ceļu būves pētīšanas sabiedrība Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Svarīgi atzīmēt, ka rotējošo stikla pudeļu metode ir viena no visplašāk lietotajām metodēm adhēzijas starp bitumenu un mēnērālmateriālu novērtēšanai Eiropā.

FGSV un rotējošo pudeļu metodēm, salīdzinājumā ar tradicionālo vārīšanas metodi, noteiktas galvenās priekšrocības un trūkumi:

Priekšrocības:

1. Apstākļi, kuros pārbaude tiek veikta, ir atbilstošākie apstākļiem, kuros ceļa segums atrodas ikdienas ekspluatācijā.
2. Rotēšanas process ir draudzīgāks un labvēlīgāks apkārtējai videi nekā vārīšanas process, kurā tiek patērēts lielāks enerģijas daudzums. Rotēšanas procesā ūdens netiek sasildīts, notiek tikai siltumapmaiņa starp ūdeni un apkārtējo vidi.
3. Metodes precizitāti uzlabo tas fakts, ka vienlaicīgi tiek rotētas 3 pudeles, t.i., tiek pārbaudīti trīs paraugi.

Trūkums:

Pārbaude salīdzinājumā ar vārīšanas metodi prasa daudz laika.

Visām apskatītājām metodēm, tajā skaitā vārīšanas testam, kuru izmanto Latvijā, ir vairākas priekšrocības, kā, piemērām, izpildes ātrums, zemas iekārtu izmaksas un piemērotība rutīnu testu veikšanai. Tomēr vizuālam novērtējumam ir daži būtiski trūkumi, kā, piemērā, cilvēciskais faktors, apgaismojums un pildvielas daļiņu krāsa. Tumšā vai pelēkā krāsā pildvielas daļiņas (bazalts, diabazs, tērauda sārņi utt.) var sajaukt ar bitumenu. Šo trūkumu dēļ nepieciešama apskatīto metožu

pilnveidošana, jo pārāk optimistisks adhēzijas novērtējums var samazināt ceļa seguma kalpošanas laiku, savukārt pesimistisks novērtējums var prasīt nepamatotu adhēzijas piedevu izmantošanu, kas veicinās izmaksu palielinājumu. Rekomendēts izmantot viegli realizējamu bitumena un pildvielas adhēzijas novērtēšanas paņēmieni pēc iepriekš apskatīto testu veikšanas - uzņemt notestēta parauga digitālos foto attēlus un veikt to datorizētu apstrādi un analīzi.

Analizējot adhēzijas testu rezultātus, konstatēts, ka labākas adhēzijas īpašības ar bitumenu B70/100 (neatkarīgi no izcelsmes) ir diabaza šķembām, kuras uzrāda augstāko adhēziju (100%) bez piedevas. Dolomīts bez adhēzijas piedevas uzrāda 80% augsto adhēzijas rādītāju. Pievienojot dolomītam adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes (0,2% no bitumena masas), tiek sasniegts maksimālais adhēzijas rādītājs (100%). Tapāt augstākais adhēzijas rādītājs tiek sasniegts bitumenam no Orlean (Lietuva), ja 0,5% daudzumā no bitumena masas pievieno piedevu uz polifosforskābes bāzes. Dolomīta šķembām ar Krievijas bitumenu B 70/100 un adhēzijas piedevu uz polifosforskābes bāzes sasniegts 95% augsts adhēzijas rādītājs. Zemāko adhēziju – 50% bez piedevas uzrāda granīta šķembas. Tomēr, pievienojot adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes (0,1 - 0,2 %) vai (0,6 - 0,7 %), uz polifosforskābe bāzes tiek sasniegts granīta un bitumena maksimālais adhēzijas rādītājs.

Uzglabāšanas stabilitāte

Analizējot uzglabāšanas stabilitātes rezultātus, konstatēts, ka dažādas izcelsmes (dažādu ražotāju) SBS polimēru viena un tā paša bāzes bitumena modifikācijai iegūst modificētus bitumenus ar krasi atšķirīgiem uzglabāšanas stabilitātes rādītājiem.

8. NOVECINĀTO UN NENOVECINĀTO MODIFICĒTO BITUMENU IETEKME UZ ASFALTBETONA SASTĀVU EKSPLOATĀCIJAS ĪPAŠĪBĀM

8.1. Izejmateriālu īpašības

Balstoties uz iegūtiem modificētā bitumena termostabilitātes rezultātiem (sk. 20. – 23. tabulas), asfaltbetona sastāvu projektēšanai izvēlēts B 70/100 (Baltkrievija). Izvēlētam bitumenam noteiktas pamatīpašības (sk. 27. tab.).

Tabula 27

Bitumena B 70/100 īpašības

Nosākamais parametrs	Standarts	Rezultāts
Penetrācija, 0,1mm	LVS EN 1426	85
Mīkstēšanas t°C	LVS EN 1427	46
Trausluma temperatūra, t°C	LVS EN 12593	-22

Bitumena B70/100 modifikācija veikta ar dažādas izcelsmes SBS modifikatoriem (SBS-1, SBS-2, SBS-3 un SBS-4). 28. tabulā apkopotas polimērmodificēto bitumenu pamatīpašības

Tabula 28

SBS modificēto bitumenu īpašības

N.p.k.	Bitumens	Penetrācija, 0.1mm	Mīkstēšanas temperatūra, °C	Frasa trausluma temperatūra, °C
1.	B70/100 + 2.5% SBS-1	58	63,7	-23
2.	B70/100 + 2.5% SBS-2	52	63,2	-22
3.	B70/100 + 2.5% SBS-3	57	61,4	-24
4.	B70/100 + 2.5% SBS-4	57	66,6	-19

Asfaltbetona AC-11 sastāvu projektēšanai izvēlētās kvarcdiorīta šķembas, kuru īpašības apkopotas 29. un 30. tabulās.

Tabula 29

Minerālmateriālu fizikālās un mehāniskās īpašības

Nosākamais parametrs	Standarts	Rezultāts	„Ceļu specifikācijas 2015”		
			Prasība		Atbilstoši
			S-I	S-II	
Los Angeles koeficients (LA), %	LVS EN 1097-2	11	LA ₂₀	LA ₂₅	6.2-7 tabula
Smilts ekvivalents (SE), %	LVS EN 933-8	88	-	-	-
Nordiskā abrazīvā vērtība (AN), %	LVS EN 1097-9	8	≤10	≤14	6.2-7 tabula
Plūšanas koeficients (Ecs), sek	LVS EN 933-6	35	≥ 30		6.2-6 tabula
Ūdens absorbcija (WA), %	LVS EN 1097-6	0,2	≤ 1		6.2-7 tabula
Plāksņainības indekss (FI), %		5	≤ 20		
Magnija sulfāta rādītājs (MS), %	LVS EN 1367-2	8	≤18	≤25	6.2-7 tabula
Metilēnzilā vērtība (MB), g/kg	LVS EN 933-9	0,5	≤10		6.2-5 tabula

Tabula 30

Minerālmateriālu granulometriskais sastāvs

Caur sietiem izgājušī masas procentuālā daļa

Frakcija, d/D	Caur sietiem izgājušī masas procentuālā daļa												Kat. LVS EN 13043
	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
Kvarca diorīta šķembas 8/11	100	100	88,3	4,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	G _C 85/15
Kvarca diorīta šķembas 5/8	100	100	100	84,0	21,5	1,9	1,2	1,4	1,1	1,3	1,0	0,7	G _C 85/15
Kvarca diorīta šķembas 2/5	100	100	100	100	99,1	73,2	15,7	2,4	2,4	2,2	1,2	1,1	G _C 90/15
Kvarca diorīta šķembas 0/2	100	100	100	100	99,9	99,1	91,1	64,1	42,8	33,2	17,8	4,2	G _F 85

8.2. Asfaltbetona sastāvu īpašības

Kopā laboratorijas apstākļos izgatavoti 4 asfaltbetona sastāvi izmantojot modificēto bitumenu, kurš modificēts ar dažādas izcelsmes SBS polimēriem (sk. 31. tabula).

Tabula 31

AC-11 darba formula

Pielietojamie minerālie materiāli	Daudzumi, masas %
Kvarcdiorīta šķembas 8/11	28
Kvarcdiorīta šķembas 5/8	9
Kvarcdiorīta šķembas 2/5	27
Kvarcdiorīta šķembas 0/2	30
Aizpildītājs – dolomīta milti Saulkalne	6

Projektēto maisījumu optimālais saistvielas saturs noteikts, izejot no šādiem iepriekš uzdotiem kritērijiem:

- granulometriskais sastāvs;
- tilpuma parametri - Va, VMA un VFB (sk. 32. tab.);
- paraugu izgatavošanas nosacījumi – triecienu skaits (2×50) un sablīvēšanas temperatūra (135°C).

Tabula 32

AC-11 pamatīpašības

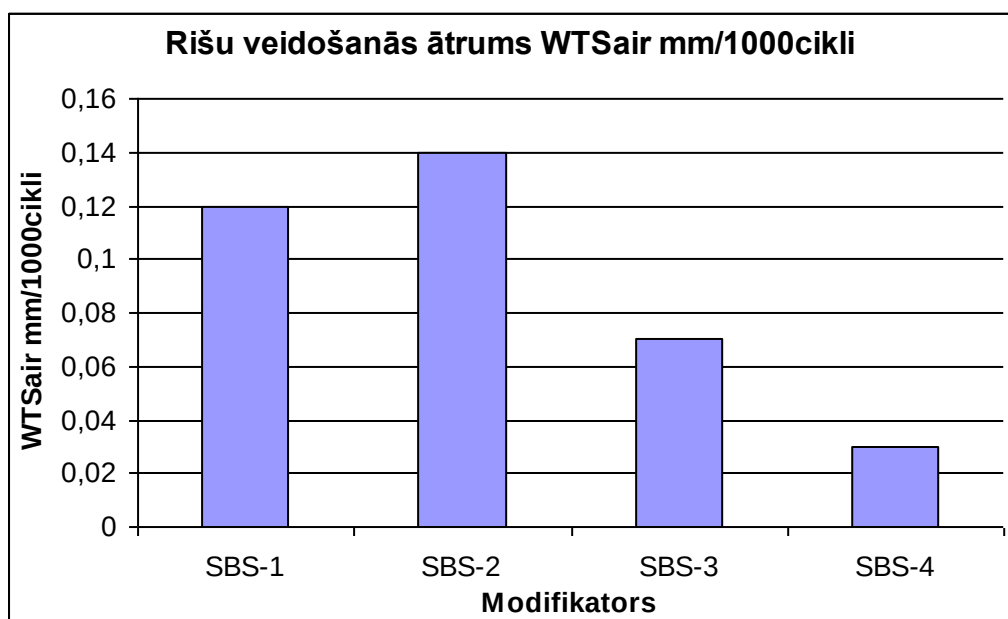
Parametrs	Mērvienība	Bitumens			
		SBS-1	SBS-2	SBS-3	SBS-4
Bitumena daudzums	masas %	5.3	5.3	5.2	5.1
Poru saturs (Va)	%	4.4	3.2	3.9	4.7
Karkasa porainība (VMA)	%	25.9	24.6	25.2	25.7
Ar bitumenu aizpildītas poras (VFB)	%	83.1	85.4	83.3	81.7

Izmantojot standartizētas ekspluatācijas īpašību testēšanas metodes, asfaltbetona sastāviem ar nenovecinātu un novecinātu bitumenu noteikta risu noturība (LVS EN 12697-22), nogurumizturība (LVS EN 12697-24) un stingums (LVS EN 12697-25). Bitumena novēsināšana veikta, izmantojot RTFOT metodi atbilstoši LVS EN 12607-1 standarta prasībām (sk. 33. un 34. tab.).

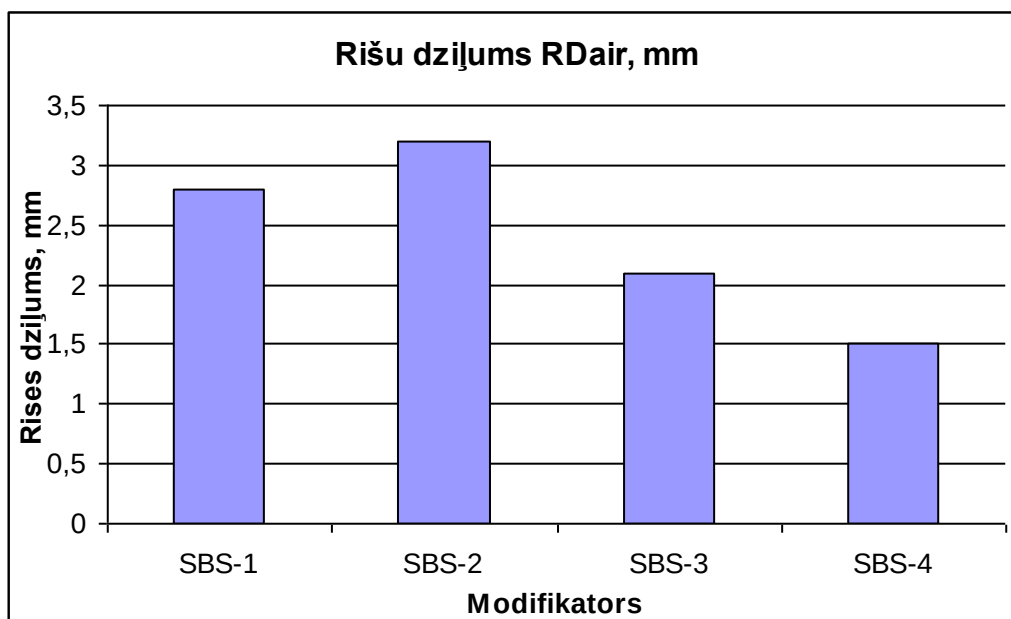
Tabula 33

Asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašības pirms novecošanās

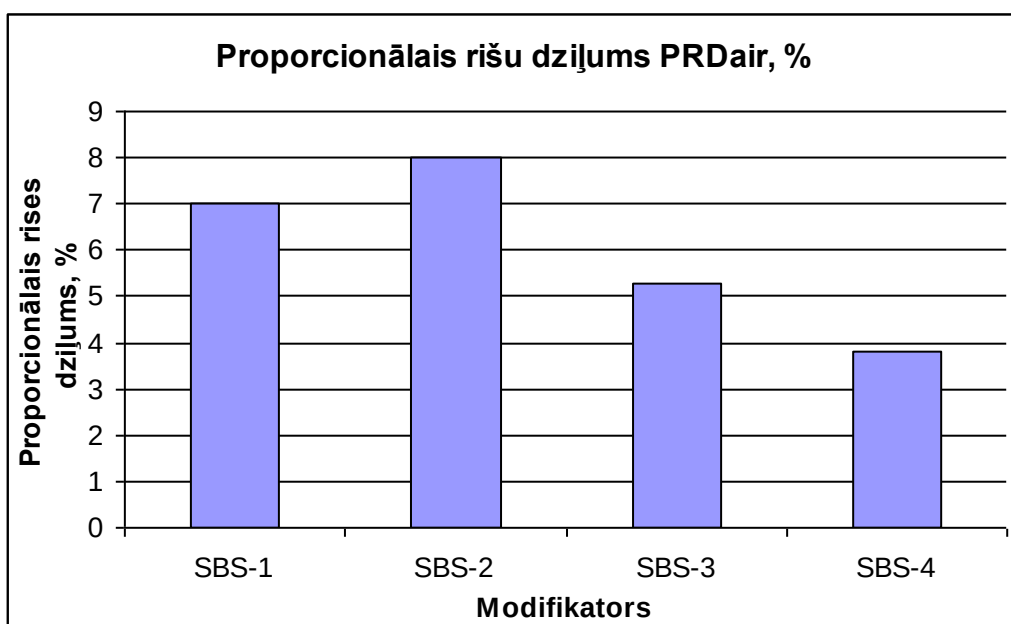
Asfaltbetona tips	Modifikators	Risu noturība			Nogurumizturība 10°C, 10Hz,		
		WTS _{air}	RD _{air}	PRD _{air}	ε ₆ -90	ε ₆ -130	ε ₆ -190
AC-11	SBS-1	0.12	2.8	7.0	+	+	+
	SBS-2	0.14	3.2	8.0	+	+	-
	SBS-3	0.07	2.1	5.3	+	+	-
	SBS-4	0.03	1.5	3.8	+	+	-



88. att. Rišu veidošanās ātrums



89. att. Rišu dziļums



90. att. Proporcionālais rišu dziļums

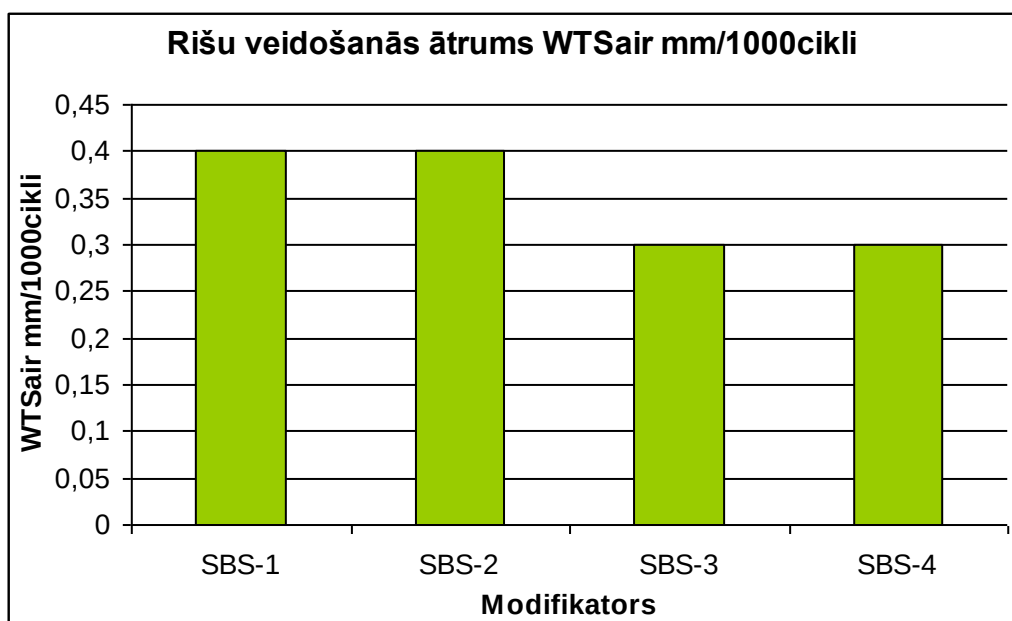
Analizējot asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašību rezultātus, konstatēts, ka augstāka risu noturība ir sastāviem ar nestabilu polimērmodificētu bitumenu, kurš modificēts ar SBS -3 un SBS-4. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka bitumena uzglabāšanas stabilitātei nav ietekmes uz risu veidošanos (sk. 88. – 90. att.). Tomēr,

analizējot nogurumizturības rezultātus, konstatēts, ka asfaltbetona sastāvs ar stabilu polimērmodificētu bitumenu (SBS-1) uzrāda augstāku nogurumizturības kategoriju - ϵ_6 -190. Savukārt asfaltbetona sastāvi ar nestabilu polimērmodificētu bitumenu (SBS-3 un SBS-4) atbilst kategoriju - ϵ_6 -130.

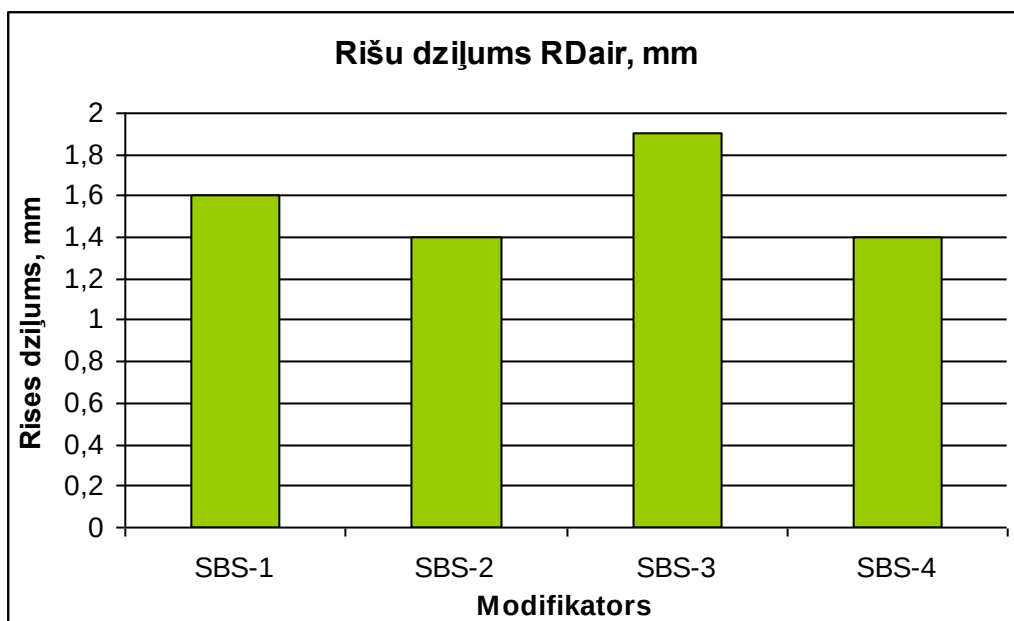
Tabula 34

Asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašības pēc novecošanās

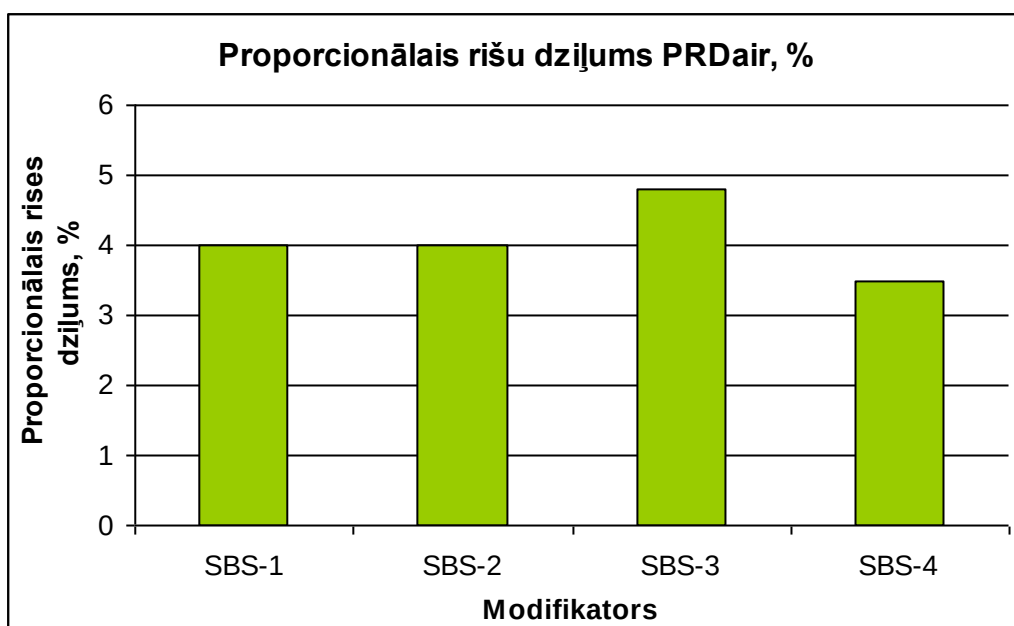
Asfaltbetona tips	Modifikators	Risu noturība			Nogurumizturība 10°C, 10Hz,		
		WTS _{air}	RD _{air}	PRD _{air}	ϵ_6 -90	ϵ_6 -130	ϵ_6 -190
AC-11	SBS-1	0.04	1.6	4.0	+	+	+
	SBS-2	0.04	1.4	4.0	+	-	-
	SBS-3	0.03	1.9	4.8	+	-	-
	SBS-4	0.03	1.4	3.5	+	-	-



91. att. Rišu veidošanās ātrums



92. att. Rišu dziļums



93. att. Proporcionālais rišu dziļums

Analizējot asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašības ar novecinātu bitumenu, konstatēts, ka visi sastāvi uzrāda līdzīgus un augstus risu noturības rādītājus (sk. 91. - 93. att.) Salīdzinot asfaltbetona sastāvu īpašības ar novecinātu un nenovecinātu bitumenu, secināts, ka augstākā risu noturība ir sastāviem ar novecinātu bitumenu. Tas izskaidrojams ar bitumenu ciettapšanu (oksidāciju) pēc novecošanās. Nav novērota polimērmofifikatora tipa un uzglabāšanas stabilitātes ietekme uz risu noturības rādītājiem. Analizējot nogurumizturības rezultātus, konstatēts, ka

asfaltbetona sastāvs ar stabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-1), līdzīgi kā nenovecināts, uzrāda augstāku nogurumizturības kategoriju - ϵ_6 -190. Savukārt asfaltbetona sastāvi ar nestabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-3 un SBS-4) atbilst kategorijai - ϵ_6 -90. Līdz ar to var secināt, ka nogurumizturība ir atkarīga no bitumena un polimēra koloidālās sistēmas stabilitātes (uzglabāšanas stabilitātes) un ciettapšanas (novecošanās) īpašībām.

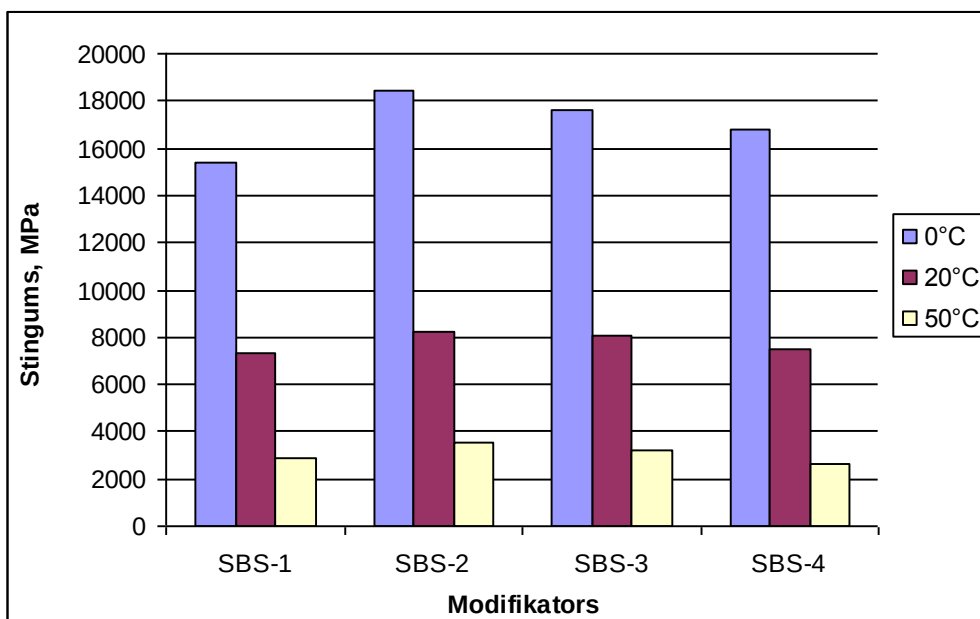
Elastības moduļi ir noteikti no asfalta plātnēm izgrieztam sijām. Asfalta plātnes tika izgatavotas ar veltņa blīvētāju ar standarta LVS EN 12697-33 metodi. Paraugu stinguma moduļi noteikti dažādās temperatūrās (0°C, 20°C un 50°C) 10Hz frekvencē ar četru punktu lieces (4PB) slogošanas metodi atbilstoši LVS EN 12697-26 standartam.

Tabula 35

Stingumu vērtības dažādās temperatūrās

Asfaltbetona tips	Modifikators	Stingums, 10Hz,		
		Temperatūra, °C		
		0°C	20°C	50°C
AC-11	SBS-1	15350	7300	2900
	SBS-2	18420	8250	3540
	SBS-3	17640	8050	3220
	SBS-4	16830	7460	2650

Analizējot stinguma moduļu rezultātu, konstatēts, ka tas strauji samazinās palielinoties temperatūrai (sk. 35. tab.). Tas saistīts ar bitumena viskozitātes samazinājumu. Tapāt nav novērota uzglabāšanas stabilitātes un modifikatora tipa ietekme uz stinguma moduļa vērtībām (sk. 94. att.).



94. att. Stingumu vērtības dažādās temperatūrās

8.3. Apkopojums un secinājumi par 8. nodaļu

Analizējot asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašības ar novecinātu bitumenu, konstatēts, ka visu sastāvi uzrāda līdzīgus un augstus risu noturības rādītājus. Salīdzinot asfaltbetona sastāvu īpašības ar novecinātu un nenovecinātu bitumenu secināts, ka augstākā risu noturība ir sastāviem ar novecinātu bitumenu. Tas izskaidrojams ar bitumenu cietaipšanu (oksidāciju) pēc novecošanās. Nav novērota polimērmodifikatora tipa un uzglabāšanas stabilitātes ietekme uz risu noturības rādītājiem. Analizējot nogurumizturības rezultātus, konstatēts, ka asfaltbetona sastāvs ar stabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-1), līdzīgi kā nenovecināts, uzrāda augstāku nogurumizturības kategoriju - ϵ_6 -190. Savukārt asfaltbetona sastāvi ar nestabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-3 un SBS-4) atbilst kategorijai - ϵ_6 -90. Līdz ar to var secināt, ka nogurumizturība ir atkarīga no bitumena un polimēra koloidālās sistēmas stabilitātes (uzglabāšanas stabilitāte) un cietaipšanas (novecošanās) īpašībām.

GALVENIE SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

1. Veiktie pētījumu apstiprina, ka izejvielai ir liela ietekme uz bitumena īpašībām - vienam un tam pašam bitumena tipam, piemēram, B70/100 vai B50/70, iegādātam no viena un tā paša ražotāja, var krasi atšķirties īpašības.
2. Ceļa būvniecībā izmantotā bitumena īpašības ietekmē naftas pārstrādē un bitumena ražošanā izmantotās tehnoloģijas.
3. Lai precīzi novērtētu bitumena kvalitāti, ir jānosaka bitumena funkcionālo grupu sastāvs, un šī pārbaude jāatkārto katru reizi, kad tiek iegādāts bitumens no izvēlēta ražotāja.
4. Analizējot uzglabāšanas stabilitātes rezultātus, konstatēts, ka dažādas izcelsmes (dažādu ražotāju) SBS polimēru viena un tā paša bāzes bitumena modifikācijai iegūst modificētus bitumenus ar krasi atšķirīgiem uzglabāšanas stabilitātes rādītājiem.
5. Noskaidrots, ka uzglabāšanas stabilitāte ir atkarīga:
 - 1) no PMB struktūras: PMB struktūra ar nepārtrauktu polimēra fāzi neuzrāda vai uzrāda nenozīmīgu fāžu sadalījumu uzglabāšanas laikā, tomēr šo struktūru veidošanai nepieciešams liels polimēra saturs (līdz 5 – 10%), kas ievērojami sadārdzina PMB un asfaltbetona cenu.
 - 2) no polimēra dispersitātes:
 3. Ja polimērdaliņu izmēri ir mazāk par 0.001mm, tad šim maisījumam ir labi radītāji uzglabāšanas stabilitātes testā;
 4. Ja daļiņu izmēri ir 0.001-0.01mm, tad nepieciešamā uzglabāšanas stabilitāte nav sasniedzama;
 5. Ja daļiņu izmēri pārsniedz 0.01mm, tad mēdz notikt absolūta sadalīšana.
6. Izmantojot liesmas jonizācijas detektora metode – FID un plāna slāņa hromatogrāfijas metodi (TLC) noteikt bitumena funkcionālo grupu sastāvs.
7. Izmantojot atomspēka mikroskopa metodi (ATM) noteikta un analizēta bitumena struktūra (morfoloģija) un īpašības.
8. Analizējot iegūtos ATM attēlus, noteikts bitumena funkcionālo grupu (asfaltēnu, sveķu un eļļu) sastāvs. Noteikta stabilā un nestabilā bitumena struktūra. Stabilam polimērmodificētām bitumenam ir saredzamas vienmērīgi

izklaidētas bitumena funkcionālās grupas, savukārt nestabilam bitumenam funkcionālās grupas izvietotas nevienmērīgi.

9. Analizējot piecu B50/70 bitumena tipu koloidālo sistēmu stabilitāti, konstatēts, ka visiem bitumeniem koloidālā sistēma ir stabila.
10. Pētījumā ir izveidots Latvija iedalījums klimata zonās atbilstoši PG sistēmai - ir secināts, ka Latvijai ir piemērotas trīs PG bitumena klases, tas ir, PG 52 - 28, PG 52 – 34 un PG 46 – 34, un izveidota Latvijas teritorijas PG sistēmas karte.
11. Noskaidrots, ka Kurzemē un Vidzemē ir piemērots PG 46 – 34 klases bitumens, Vidzemes augstienes teritorijā - PG 52 – 34, Latgalē - PG 52 – 34 un PG 52 – 28 bitumens, savukārt Zemgalē ir piemērots PG 46 – 34 un PG 52 – 28 bitumens.
12. Noteikts, ka Latvijā izmantotie bitumeni atbilstoši PG sistēmas klasifikācijai ir noturīgi pret risu veidošanos, bet vienu klasi zemāki attiecībā uz seguma ekspluatācijas īpašībām zemā temperatūrā.
13. Noteikta dažādas izcelsmes minerālmateriālu adhēzija ar dažādas izcelsmes (Krievija, Lietuva) bitumenu B70/100. Novērtēta adhēzijas piedevu uz amīnu un polifosforskābes bāzes ietekme uz adhēzijas īpašību uzlabojumu. Noskaidrots, ka:
 - 1) dolomīts bez adhēzijas piedevas uzrāda 80% augsto adhēzijas rādītāju. Pievienojot dolomītam adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes (0,2% no bitumena masas), tiek sasniegts maksimālais adhēzijas rādītājs (100%);
 - 2) augstākais adhēzijas rādītājs tiek sasniegts bitumenam no Orlean (Lietuva), ja 0,5% daudzumā no bitumena masas pievieno piedevu uz polifosforskābes bāzes;
 - 3) dolomīta šķembām ar Krievijas bitumenu B 70/100 un adhēzijas piedevu uz polifosforskābes bāzes sasniegts 95% augsts adhēzijas rādītājs;
 - 4) zemāko adhēziju – 50% bez piedevas uzrāda granīta šķembas;
 - 5) granīta šķembām pievienojot adhēzijas piedevu uz amīnu bāzes (0,1 - 0,2 %) vai (0,6 - 0,7 %), uz polifosforskābe bāzes tiek sasniegts granīta un bitumena maksimālais adhēzijas rādītājs.
14. Analizētas vairākas adhēzijas starp bitumenu un minerālmateriālu noteikšanas metodes. Atzīmētas vairākas tradicionālo metožu priekšrocības (izpildes ātrums, zemas iekārtu izmaksas un piemērotība rutīnu testu veikšanai) un trūkumi (cilvēciskais faktors, apgaismojums un pildvielas daļiņu krāsa).

15. Rekomendēts veikt vizuālās metodes pilnveidošanu, izmantot viegli realizējamu bitumena un pildvielas adhēzijas novērtēšanas paņēmieni pēc iepriekš apskatīto testu veikšanas - uzņemt notestēta parauga digitālos foto attēlus un veikt to datorizētu apstrādi un analīzi.
16. Analizējot asfaltbetona sastāvu ekspluatācijas īpašības ar novecinātu bitumenu, konstatēts, ka visu sastāvi uzrāda līdzīgus un augstus risu noturības rādītājus.
17. Salīdzinot asfaltbetona sastāvu īpašības ar novecinātu un nenovecinātu bitumenu, secināts, ka augstākā risu noturība ir sastāviem ar novecinātu bitumenu. Tas izskaidrojams ar bitumenu ciettapšanu (oksidāciju) pēc novecošanās.
18. Nav novērota polimērmodifikatora tipa un uzglabāšanas stabilitātes ietekme uz risu noturības rādītājiem.
19. Analizējot nogurumizturības rezultātus, konstatēts, ka asfaltbetona sastāvs ar stabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-1), līdzīgi kā nenovecināts, uzrāda augstāku nogurumizturības kategoriju - ϵ_6 -190.
20. Konstatēts, ka asfaltbetona nogurumizturība ir atkarīga no bitumena un polimēra koloidālās sistēmas stabilitātes (uzglabāšanas stabilitāte) un ciettapšanas (novecošanās) īpašībām. Asfaltbetona sastāvi ar nestabilu, bet novecinātu polimērmodificētu bitumenu (SBS-3 un SBS-4) atbilst kategorijai - ϵ_6 -90.

TURPMĀKIE IESPĒJAMIE PĒTĪJUMA VIRZIENI

1. Metodes un tehnoloģijas bitumena un PMB novecošanās izturības uzlabošanai (t.sk. antioksidanti);
2. Novecināta PMB bitumena īpašību atjaunošana (RAP);
3. No RAP atjauninātā bitumena struktūra izpēte (koloidālās sistēmas stabilitāte);
4. Bitumens un aizpildītājs īpašību izpēte (aizpildītāja aktivitāte, dažādi aizpildītāja veidi);
5. Bitumena un bitumena mastikas salturības izpēte (ja Frasa trausluma temperatūra $<15^{\circ}\text{C}$; duktilitāti 0°C , utt.);
6. Vadlīnijas un rekomendācijas bitumena modifikācijas tehnoloģijai izstrāde;
7. Adhēzijas metožu pilnveidošana (digitālo foto attēlu analīzi);
8. Bitumena emulsijas tehnoloģijas (slurry seal, PMBE, u.c.).

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Adrian Andriescu, Xicheng Qi, Audrey Copeland, Nelson Gibson, Jack Youtcheff. Evaluation of the fatigue performance of aged bitumens using the essential work of fracture method. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2012. Istanbul, Turkey.
2. X. Lu, H. Soenen, P. Redelius. SBS Modified Bitumens: Does Their Morphology and Storage Stability Influence Asphalt Mix Performance? Nynas. Sweden.
3. Migle Paliukaite. Influence of the changes in bitumen properties on asphalt pavement performance. Doctoral dissertation. 2014. Vilnius Gediminas Technical University.
4. Hilde Soenen, Jeroen Besamusca, Hartmut R.Fischer, Lily D.Poulikakos, Jean-Pascal Planche, Prabir K.Das, Niki Kringos, James R.A.Grenfell, Xiaohu Lu, Emmanuel Chailleux. Laboratory investigation of bitumen based on round robin DSC and AFM tests. *Materials and Structures* (2014) 47, pp. 1205 – 1220.
5. <http://pslc.ws/macrog/dsc.htm>
6. <http://www2.warwick.ac.uk/services/rss/business/analyticalguide/dsc/>
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy#mediaviewer/File:Atomic_force_microscope_by_Zureks.jpg
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy#mediaviewer/File:Atomic_force_microscope_block_diagram.svg
9. Sebastian Lipke, Petra Kukies, Federal Highway Research Institute, Bergisch Gladbach. Changes of polymer-modified binder properties: production-service life. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2012. Istanbul, Turkey.
10. <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/beerlambert.html>
11. <http://www.hutton.ac.uk/research/groups/environmental-and-biochemical-sciences/analysis-equipment/chemical>
12. N. Kringos, A. Scarpas, A. Schmets, T. Pauli. Kinetics of bituminous phase decomposition and its implications on the mechanical properties. 5th International Conference "Bituminous Mixtures and Pavements", 1-3 June 2011, Thessaloniki, Greece.
13. Гезенцевей Л.Б., Горелышев Н.В, Богуславский А.М., Королев И.М.. Дорожный асфальтобетон. М. : Транспорт, 1985. — 350 с.
14. Zolotaryov V.A, Maliar V.V., Lapchenko A.S. The effect of SBS polymer content on technical, technological and rheological properties of bitumens and polymer asphalt concrete. 5th International Conference "Bituminous Mixtures and Pavements", 1-3 June 2011, Thessaloniki, Greece.

15. Yan, X., Jin, X., Li, W., Xiao, F., and Zhang, Y. (2014) The Effect of Modifying Technologies on Asphalt Pavement Performance. CICTP 2014: pp. 1101-1109. doi: 10.1061/9780784413623.107.
16. Ma Shi-rang, Liu Peng, Zhu Wei, Wang Wei The rheological properties of modified asphalt”, 1 Key Laboratory of Special Area Highway Engineering Of Ministry of Education, Chang’an University, Xi’an China 710064.
17. Akiyoshi Hanyu, Sadaharu Ueno, Atsushi Kasahara, Kazuo Saito. Effect of the morphology of SBS modified asphalt on mechanical properties of binder and mixture. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1153 - 1167, 2005.
18. Лиштван, И. И. Микро- и макрореология дисперсных систем/ И.И. Лиштван. – Минск, 1975. – 39.с. – (Препринт/Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова АН БССР. Международный центр Академии наук Социалистических стран для повышения квалификации научных кадров по проблеме «Тепло- и массообмена»).
19. Измайлова, В.Н. Структурообразование в белковых системах/В.Н. Измайлова, П.А. Ребиндер. – М. : Наука, 1976. – 286 с.
20. Лиштван, И.И. Физико-химическая механика гуминовых веществ/И.И. Лиштван, Н.Н. Круглицкий, В.Ю. Тритинник. – Минск, 1976. – 263 с.
21. Ребиндер, П. А. О структурно – механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем/П.А. Ребиндер, Н.В.Михайлов//Коллоидный журнал. – 1955. – 2.номер. – с. 107-119.
22. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем/Е.Е.Бибик. – Ленинград: ЛГУ, 1981. – 172 с.
23. Туров, И.И. Химия и физика полимеров/И.И.Туров, Г.И. Кострыкина. – М. : Химия, 1989. – 432 с.
24. Энциклопедия полимеров/редкол. В.А. Кабанов (и др.). – М.: Сов. Энцикл., 1977. – Т.3. – 1150 с.
25. Fürst, W. Polymermodifizierte Bitumen/ W. Fürst, F. Croff// Strasse und Autobahn. – 1986. – Heft 1, p. 3-8.
26. Evaluation of the low temperature fracture properties of modified binders. Relationships with their micromorphology/ L. Champlon (at al.)// Eurobitume Workshop 99 on Performance Related properties for bituminous Binders: Workshop incorporates world road association (PIARC) seminar on SHRP, Luxemburg, 6 May, 1999/ European parliament kirchberg plateau: K. Soraas (at al.) – Luxemburg, 1999. – Paper N 049.
27. Bonnot, J. Rheologische igenschaften von Bitumen – Interpretation der Prüfergebnisse/ J. Bonnot//Bitumen. – 1997. – Heft 1. – p. 6-17.
28. Rheological analysis of bitumens by shear rheometer: effect of the thermal history on the results/ V. Mouillet (at al.)// Eurobitume & Euroasphalt: Vienna, Austria, 12-14th of May 2004, p. 1411-1420.

29. Perez, B. Relationships between bituminous binder rheological properties and wheel tracing rutting resistance of asphalt mixtures/B. Perez//Eurobitume & Euroasphalt: Vienna, Austria, 12-14th of May 2004, p. 1659 – 1669.
30. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии/ Ю. Г. Фролов. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 464 с.
31. Розенталь, Д.А. Изменение свойств дорожных битумов/ Д.А. Розенталь, А.М. Сыроежко// Химия и технология топлив и масел. – 2000. – 4. Номер – с. 41-43.
32. Худякова, Т. С. Количественная оценка сцепления дорожных битумов с минеральным материалом/ Т.С. Худякова, Д.А. Розенталь// Химия и технология топлив и масел. – 1987. – 6. Номер – с. 35-38.
33. Определение прочности сцепления дорожных битумов с минеральными материалами/ Е.Е. Никитин (и др.) // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2002. – 9.номер – с. 28-33.
34. Изменение свойств битумов в контакте с минеральным наполнителем / Д.А. Розенталь (и др.) // Химия и технология топлив и масел. – 1998. – 4.номер – с.48 – 49.
35. Adedimila, A., S., Olutaiwo, A., O. Review of Advances in Grading Systems for Asphalt Binders in Hot-mix Asphalt Pavements. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2008, 3 (4), pp. 322-331. eISSN 1818-7803. ISSN 1816-949X.
36. E. Prockāns. Performance Grade (PG) Bitumena Pielietojums Latvijā. Bakalaura darbs. RTU. Transportbūvju institūts. Ceļu un Tiltu katedra. (darba vad. V. Haritonovs) 2014. Gads.
37. *Penetration Test* [\[online\]](http://www.pavementinteractive.org/article/penetration-test/). Pavement Interactive, 2007 [Viewed 2 December 2014]. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/penetration-test/>.
38. Chin, C., *Performance graded bitumen specifications* [\[online\]](http://reaaa.vms.my/images/d/d6/%289-25%29PERFORMANCE GRADED BITUMEN SPECIFICATIONS.pdf). Vermont South: ARRB Group, [viewed 26. November 2014]. Available from: <http://reaaa.vms.my/images/d/d6/%289-25%29PERFORMANCE GRADED BITUMEN SPECIFICATIONS.pdf>
39. *Rutting* [\[online\]](http://www.pavementinteractive.org/article/rutting/). Pavement Interactive, 2008 [Viewed 2 December 2014]. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/rutting/>.
40. Ghuzlan, K., A., Al-Khateeb, G., G. Selection and verification of performance grading for asphalt binders produced in Jordan. *International Journal of Pavement Engineering*. 2013, vol. 14, no. 2, pp. 116-124. ISSN 1029-8436. pISSN 1477-268X. Available from: doi:10.1080/10298436.2011.650697.
41. *Rotational Viscometer* [\[online\]](http://www.pavementinteractive.org/article/rotational-viscometer/). Pavement Interactive, 2011 [Viewed 6 December 2014]. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/rotational-viscometer/>.

42. AASHTO M 320-10 *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder* American Association of State and Highway Transportation Officials, 2010. 8 p.
43. Rudovics, A., Rudovica, T., *Latvijas fiziskā ģeogrāfija*. 3. izd. Rīga: Zvaigzne ABC, 1996. 199 lpp. ISBN 9984-04-333-9.
44. Alani, H., M., H., Albayati, A., H., Abbas, A., S., The transition to a PG grading system for asphalt cement in Iraq. *Journal of Engineering*. 2010, vol. 16, no. 4, pp. 5911-5931. ISSN 17264073.
45. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs [\[tiešsaiste\]](#). [Skatīts 2014. g. 7. decembrī]. Pieejams: <http://www.meteo.lv/>.
46. Cominsky, R., J., Huber, G., A., Kennedy, T., W., Anderson, M., *SHRP-A-407 The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. Washington, DC: SHRP, 1994. 172 p. ISBN 0-309-05804-X. Available from: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-407.pdf>
47. McMillan, C., Scarlett, J., R., *Development of performance graded binder selection method for canadian airport pavements* [\[online\]](#). 1999 [viewed 09 December 2014]. Available from: http://www.captg.ca/docs/pdf/binder_selection_method.pdf
48. Опанасенко, О.Н. Крутько, Н.П. "Свойства и применение битумных дисперсий и битумно - эмульсионных материалов". Минск, 2014.
49. Elisabete R.Costa, R. Colaco, A. Correia Diogo. "Bitumen Morphology as Observed by Phase Detection Atomic Force Microscopy" / *Materials Science Forum Vols 587-588 (2008) pp. 981 - 985*.
50. Masson J.F., Leblond V., Margeson J., "Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy", *Journal of Microscopy*, Vol.221, Pt 1 January 2006, pp. 17-29.
51. http://afmhhelp.com/index.php?option=com_content&view=article&id=84:what-is-phase-imaging
52. „The Shell Bitumen Handbook”, 5th edition.
53. О.Н.Опанасенко, Н.П.Крутько „Свойства и применение битумных дисперсий и битумно - эмульсионных материалов.”
54. Бартенев, Г.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. – Ленинград: Химия, 1976. – 288.с.
55. О модификации битумных строительных материалов полимеризационноспособными олигомерами / А.П. Меркин и др. // *Азерб.хим. журн.* – 1984. – No.4 – с. 117 – 121.
56. Бонченко, Г.А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером / Г.А. Бонченко. – М.: Машиностроение, 1994. – 175.с.

57. Руденский, А.В. Модифицированные битумы. Их реологические свойства и влияние на эксплуатационное поведение дорожных покрытий / А.В. Руденский // Автомобильные дороги. – 1992. - No.6 – 7. – с. 19-22.
58. Исследование процесса структурообразования в битумно – полимерных композициях на основе эпоксидной смолы / Опанасенко О.Н. и др. // Труды БГТУ. Сер.4, Химия и технология органических веществ. – 2008. – Вып. 16. – с. 139 – 142.
59. Влияние добавок нефтяных компонентов на структурно – реологические характеристики окисленных битумных вяжущих / О.Н. Опанасенко // Периодич. сб. науч. трудов / Механическая обработка дисперсных материалов. – Одесса, 1998. - No.8. – с. 74-76.
60. The influence of Petroleum Distillate on the Sctructural – Rheological Performances of Bituminous Binders / O.N. Opanasenko [at.al.] // Eurobitume Workshop 99 / Luxembourg/ - 1999. – p. 1011.
61. Синтез алифатических полиамидов в дисперсионной среде окисленного битума /О.Н. Опанасенко и др. // Журнал прикладной химии. – 2011. – т. 84, вып. 2. – с. 292 – 298.
62. www.bitumen-gestein.de
63. Riccardo Lamperti, Claudio Lantieri, Cesare Sangiorgi, Gabriele Bitelli and Andrea Simone. Semi-automatic Evaluation of the Degree of Bitumen Coverage on Bitumen – Coated Aggregates. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bitumenous Materials, Rilem Bookseries 11. 2015.
64. Muslov. C. Determination of the degree of gravel aggregate-bitumen coverage by multi-directional reflectance mesurements. XXII ISPRS Congress, Melbourne, 25 August – 01 September 2012.