

PĒTĪJUMA

BITUMINĒTO CEĻA SEGAS KONSTRUKTĪVO SLĀŅU NOGURUMIZTURĪBAS IZPĒTE

Gala atskaite



Pētījums

Bituminēto ceļa segas konstruktīvo slāņu nogurumizturības izpēte



Inženierbūve
Transportbūvju projektēšana,
ekspertīze un inspekcijas

Izpildītājs

Juridiskā adrese
Reģistrācijas numurs

SIA "Inženierbūve"

Sētas iela 1, Rīga, LV-1048
Reģ. Nr. 40103001095



**LATVIJAS
VALSTS CEĻI**

Pasūtītājs

Reģistrācijas numurs
Juridiskā adrese
Līguma Nr.
Stadija

VSIA "Latvijas Valsts ceļi"

40003344207
Gogoļa iela 3, Rīga, LV-1051
LVC2019/1.10/3/AC
Gala ziņojums

Apstiprinu, 17.05.2021.

Pētniecības projekta nosaukums

Bituminēto ceļa segas konstruktīvo slāņu nogurumizturības izpēte

Līguma numurs	Līgums Nr. LVC2019/1.10/3/AC
Līguma slēgšanas datums	07. 08. 2019.
Pētniecības projekta stadija	Gala atskaite (100%)
Starpziņojumu kopējais skaits	3 starpziņojumi un 1 gala atskaite
Ziņojuma nodošanas datums	17. 05. 2021.
Pētniecības projekta izstrādes periods	07. 08. 2019. – 17. 05. 2021.
Lappušu skaits	96
Disks vai cits datu nesējs (ir/nav)	Ir
Eksemplāru skaits	1

JAUNU TEHNOLOĢIJU IZPĒTES PROGRAMMA 2018. – 2020. GADAM

Pētniecības projekta izpildītāji	Vārds, uzvārds	Paraksts
Pētniecības projekta vadītājs	Viktors Haritonovs	
Projektu finansē	VAS "Latvijas Valsts ceļi"/Satiksmes ministrija	

Īss apraksts

Šajā projektā uzsākta asfaltbetona sastāvu stinguma un nogurumizturības transporta slodzes iedarbībā izpēte. Pētījuma mērķis – izmantojot mūsdienīgas testēšanas iekārtas un analīzes procedūras, noteikt asfaltbetona tipa, poru satura, bitumena tipa un daudzuma ietekmi uz Latvijā tradicionāli lietoto asfaltbetona maisījumu nogurumizturību nolūkā izstrādāt rekomendācijas šo asfaltbetona segumu nogurumizturības uzlabošanai. Pētījumā eksperimentāli noteikta asfaltbetona sastāvu AC 11, SMA 11, AC₆ 22 un HMA 16 ceļu segumu nogurumizturība un novērtēta to porainības, kā arī bitumena tipa un nofrēzētā asfaltbetona satura ietekme uz šo segumu nogurumizturības rādītājiem.

Pētījumā piedāvāta metodika asfaltbetona ceļu segumu salizturības noteikšanai, izmantojot nogurumizturības kritēriju.

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

Saturs

Saturs	4
Kopsavilkums	5
<i>Executive summary</i>	6
Saīsinājumi	7
1. Noguruma plaisu veidošanās mehānisms	9
2. Noguruma plaisu veidošanos ietekmējošie faktori	12
3. Testēšanas metodes asfaltbetona seguma nogurumizturības noteikšanai laboratorijas apstākļos	15
4. Nogurumizturības testēšana un rezultātu apstrāde	20
5. Noguruma modeļi	33
5.1. <i>Shell</i> noguruma modelis	33
5.2. <i>The Asphalt Institute</i> noguruma modelis	34
6. Eksperimentālā daļa	36
6.1. <i>SMA 11</i> un <i>AC 11</i> sastāvu projektēšana un testēšana	36
6.1.1. Bitumens	36
6.1.2. Minerālmateriāli	37
6.1.3. Sastāvu fizikālās un mehāniskās īpašības	38
6.1.4. <i>AC 11</i> un <i>SMA 11</i> sastāvu stingums	38
6.2. <i>HMAC</i> sastāvu ar <i>RAP</i> projektēšana un testēšana	43
6.2.1. Bitumens	43
6.2.2. <i>HMAC</i> sastāvs	45
6.2.3. <i>HMAC</i> sastāvu stingums	46
6.2.4. <i>HMAC</i> sastāvu nogurumizturība	50
6.3. <i>AC_b 22</i> sastāvu ar <i>RAP</i> un bez tā testēšana	54
6.4. <i>SMA 11</i> sastāvu ar <i>RAP</i> un bez tā testēšana	61
7. Asfaltbetona salizturības izpēte pēc nogurumizturības un stinguma kritērijiem	67
7.1. Metodika	67
7.1.1. Iekārtas	67
7.1.2. Sasaldēšanas un atkausēšanas cikli	68
7.1.3. Testēšanas procedūra	68
7.2. Metodikas <i>AASHTO C 666</i> modifikācija un pielāgošana asfaltbetona paraugu salizturības testēšanai	69
7.2.1. Metodikas <i>AASHTO C 666</i> modifikācija	69
7.2.2. Testēšanas iekārtas un procedūra	69
7.3. Sablīvējuma ietekme uz stingumu	74
7.4. Sablīvējuma ietekme uz nogurumizturību	77
7.5. Sablīvējuma ietekme uz salizturību	81
7.6. Ultraskaņas metode	85
8. Rekomendācijas	89
8.1. Porainība	89
8.3. <i>RAP</i>	90
Nākotnes pētījumu virzieni	92
Secinājumi	93
Literatūra	95

Kopsavilkums

Noguruma plaisas ir viens no izplatītākajiem seguma bojājuma veidiem uz Latvijas autoceļiem, un to veidošanās cēlonis var būt saistīts ar asfaltbetona maisījuma īpašībām (izejmateriāliem, to proporcijām maisījumā un tā fizikālajām īpašībām, kā arī vairākiem ārējiem faktoriem, piem., seguma pārslodzi, apakšējo slāņu zemo nestspēju un neapmierinošo ūdens novadīšanas spēju, t. i., nepietiekamo drenāžu). Šī pētījuma mērķis – izmantojot mūsdienīgas testēšanas iekārtas un analīzes procedūras, noteikt asfaltbetona tipa, poru satura, bitumena tipa un daudzuma ietekmi uz Latvijā tradicionāli lietoto asfaltbetona maisījumu nogurumizturību, lai izstrādātu rekomendācijas Latvijas autoceļu asfaltbetona segumu nogurumizturības uzlabošanai.

Pētījuma analītiskajā daļā veikta noguruma plaisu veidošanās mehānisma izpēte, kā arī apkopoti nogurumizturību ietekmējošie iekšējie (materiāla un izejmateriālu īpašības, piedevas) un ārējie faktori (slodzes lielums, slogošanas intensitāte, temperatūra). Eksperimentālajā daļā veikta Latvijas apstākļiem tradicionālo asfaltbetona sastāvu ar nemodificēto un modificēto bitumenu, kā arī *HMAC* tipa asfaltbetona sastāvu stinguma un nogurumizturības noteikšana.

Lai novērtētu nofrēzētā asfaltbetona (*RAP*) satura ietekmi uz asfaltbetona stingumu un nogurumizturību, šajā pētījumā veikta *HMAC* sastāvu ar dažādu *RAP* saturu projektēšana un testēšana. Iegūtie rezultāti rāda, ka, palielinoties *RAP* saturam, nogurumizturība samazinās, bet stingums palielinās.

Lai novērtētu šķembu kvalitātes, *RAP* un bitumena ietekmi uz asfaltbetona stingumu un nogurumizturību, veikta AC_b 22 sastāvu (AC_b 22 ar *PMB* 45/80-55 un šķembām *S1* un AC_b 22 ar B70/100, 30% *RAP* un šķembām *S3*) izpēte. Eksperimentāli noteikts, ka AC_b 22 ar augstas klases šķembām *S1* un polimērmodificēto bitumenu piemīt par > 25% lielāka nogurumizturība.

Asfaltbetona segumu salizturības noteikšanai izstrādāta metode pēc nogurumizturības kritērija, par pamatu ņemot standarta *AASHTO C 666 (Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing)* metodes prasības. Eksperimenti veikti, izmantojot asfaltbetona *AC 11* sastāvus ar nemodificēto (B50/70) un modificēto bitumenu (*PMB* 45/80-55). Iegūtie rezultāti rāda, ka paraugiem ar 6 – 8% porainību piemīt vislielākais nogurumizturības samazinājums salīdzinājumā ar paraugiem, kuriem poru saturs ir 2 – 4%. Eksperimentāli arī noteikts, ka paraugu stingumu krasi ietekmē porainība. Asfaltbetona *AC 11* ar B50/70 stingums pie 6 – 8% porainības ir 6000 – 8000 MPa, bet pie 2 – 4% porainības stinguma vērtība ir 10 000 – 12 000 MPa.

Executive summary

Fatigue cracks are the most common type of pavement damage on Latvian roads, the cause of which may be related to the properties of the asphalt concrete mix (raw materials, proportion of raw materials, physical properties of the mix (volumetric parameters V, VFB, VMA)), as well as several external factors such as, pavement overload, low load-bearing capacity of the lower layers and unsatisfactory water drainage capacity (drainage). The aim of this study was to determine the effect of asphalt concrete type, voids content, bitumen type and quantity on the fatigue strength of Latvian traditional asphalt concrete mixtures using modern testing equipment and analysis procedures in order to develop recommendations for improving the fatigue resistance of Latvian traditional asphalt concrete types.

In the analytical part of this research, the mechanism of fatigue crack formation was investigated, as well as internal (material and raw material properties, additives) and external (load size, load intensity, temperature) factors influencing fatigue resistance were summarized. In the experimental part, SMA 11, AC 11, AC_b 22 as well as HMAC mixes were designed using unmodified and modified bitumen to assess the influence of bitumen and asphalt concrete types on the stiffness and fatigue cracking resistance.

In order to assess the effect of reclaimed asphalt concrete (RAP) on the stiffness and fatigue resistance, the design and testing of HMAC mixtures with different RAP contents were performed in this project. The results show that fatigue resistance decreases with increasing RAP content.

In order to assess the effect of aggregate quality, RAP and bitumen type stiffness and fatigue resistance were performed for AC_b 22 mixture (AC_b 22 with PMB 45/80-55 and S1 and AC_b 22 with B70/100 30% RAP and S3). It has been experimentally determined that AC_b 22 with high-quality crushed stone S1 and polymer-modified bitumen shows > 25% higher fatigue resistance.

In this project a method for determining the frost resistance of asphalt concrete pavements was developed based on the fatigue resistance criterion based on the requirements of the AASHTO C 666 (Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing) standard method. The experiments were performed using asphalt concrete mixtures AC 11 with unmodified (B50/70) and modified (PMB 45/80-55) bitumen. The results obtained show that samples with a porosity of 6% to 8% show the greatest reduction in fatigue resistance compared to samples with a voids content of 2% to 4%. It was also experimentally determined that the stiffness of the samples had a drastic effect on porosity. AC 11 with B50/70 stiffness at 6 – 8% porosity is 6000 – 8000 MPa, but at porosity 2 – 4% stiffness value is from 10 000 – 12 000 MPa.

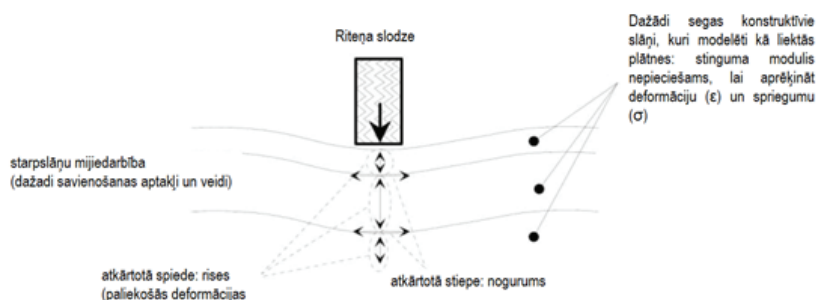
Saīsinājumi

AADT	<i>Annual average daily traffic (angļu val.)</i>	vidējā diennakts satiksmes intensitāte
AASHTO	<i>The American Association of State Highway and Transportation Officials (angļu val.)</i>	
AC	<i>Asphalt Concrete (angļu val.)</i>	asfaltbetons
AC_b		asfaltbetons saistkārtai vai/un pamatkārtai
B_{min}		minimālais bitumena saistvielas saturs
B_{max}		maksimālais bitumena saistvielas saturs
B70/100		ceļu bitumens ar penetrāciju no 70 līdz 100
C_{100/0}		drupināto un lauздо virsmu kategorija
D		asfalta maisījuma lielāko daļiņu izmērs, mm
E		elastības (stinguma) modulis, MPa
E_{CS 35}		smalkā minerālmateriāla šķautņainības kategorija atbilstoši plūšanas testa metodei
ESAL	<i>Equivalent single axle load (angļu val.)</i>	ekvivalentā standarta ass slodze
FI₁₅		šķembu plāksņainības indeksa kategorija
HiMA	<i>Highly modified asphalt (angļu val.)</i>	bitumens, modificēts ar lielu polimēra saturu
HMAC	<i>High Modulus Asphalt Concrete (angļu val.)</i>	lielas stinguma moduļa vērtības asfaltbetons
LA		Losandželosas koeficients
PMB	<i>Polymer Modified Bitumen, PMB (angļu val.)</i>	polimērmodificētais bitumens
N		slodzes radītās relatīvās deformācijas pieļaujamais atkārtojumu skaits
NR		nav reglamentēts
R		korelācijas koeficients
RAP	<i>reclaimed asphalt pavement (angļu val.)</i>	nofrēzētais asfaltbetona ceļa segums
RF	<i>reliability factor (angļu val.)</i>	ticamības faktors

SF	<i>shift factor (angļu val.)</i>	nobīdes faktors starp laboratorijas testiem un lauka apstākļiem
SHRP	<i>The Strategic Highway Research Program (angļu val.)</i>	Stratēģiskā automaģistrāļu pētniecības programma ASV un Kanādā
SI15		šķembu formas indeksa kategorija
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt (angļu val.)</i>	šķembu mastikas asfalts
S1, S2, S3		šķembu stiprības klase atbilstoši Ceļu specifikācijas 2019 prasībām
σ		spriegums, Pa
ϵ		relatīvā deformācija, mm/mm
ϵ_6		relatīvā deformācija, aprēķināta 106 cikliem
ϵ_6-130		nogurumizturības kategorija atbilstoši LVS EN 13108-1, kad stinguma samazinājums 50% no tā sākotnējās vērtības tiek sasniegts pie relatīvās deformācijas $\epsilon_6 \geq 130 \mu\text{m/m}$
$\mu\epsilon$	<i>microstrain (angļu val.)</i>	relatīvā mikrodeformācija, $\mu\text{m/m}$
$\mu\epsilon$		relatīvā deformācija (microstrains), ko transporta slodze rada asfaltbetona slāņa apakšējā joslā
V_b		bitumena saturs asfaltbetona segumā (%)
V_{min}		minimālais poru saturs
V_{max}		maksimālais poru saturs

1. Noguruma plaisu veidošanās mehānisms

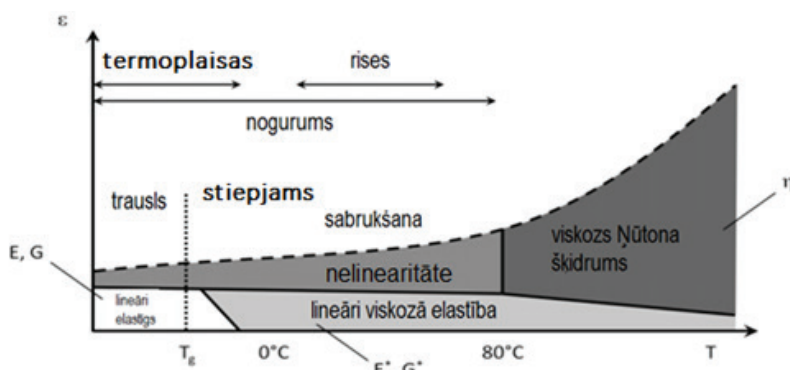
Pastāv trīs tipu ceļa segumi: stings (cementbetona segums), elastīgs (asfaltbetona segums) un pusstings (asfaltbetona un cementbetona kombinācija). Šajā pētījumā galvenokārt tiek aplūkotas elastīgā seguma īpašības. Ceļa segas galvenais strukturālais uzdevums ir uzņemt un sadalīt transportlīdzekļu riteņu slodzi, kuras darbības rezultātā veidojas vertikālie spiedes spriegumi un deformācijas, kā arī horizontālie stiepes spriegumi un deformācijas saistīto slāņu apakšējās joslās (skat. 1. att.).



1. att. Autoceļu segas konstruktīvo slāņu reakcija uz transportlīdzekļu slodzi [1]

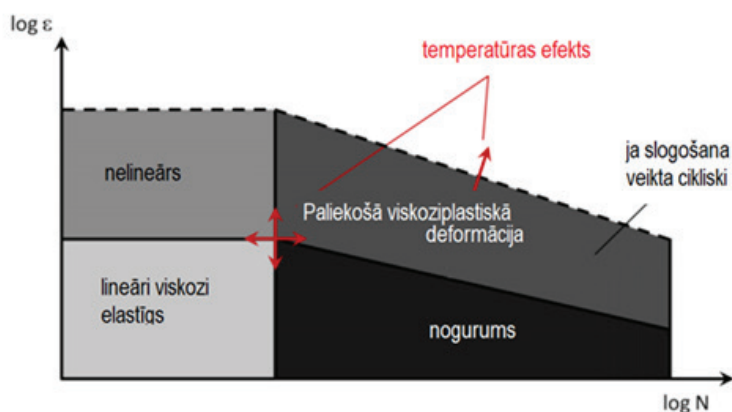
Projektējot segas konstrukciju, jāņem vērā vairāki faktori, kā, piemēram, transporta slodze, apakšējo slāņu veids un stiprība, klimats, pieejamie materiāli un izejmateriāli, paredzamais kalpošanas laiks un slāņu biezums.

Noguruma plaisām ir tendence veidoties vidējā (t. i., mērenā) seguma ekspluatācijas temperatūrā, kad bitumens kļūst stingāks un trauslāks. Asfaltbetons tiek uzskatīts par viendabīgu, nepārtrauktu un izotropu (īpašības visos virzienos ir vienādas) materiālu, kam atkarībā no temperatūras piemīt atšķirīgas deformatīvās īpašības. Atkarībā no temperatūras, deformācijas amplitūdas un slogošanas ciklu skaita asfaltbetonam izšķir vairākas deformatīvo īpašību zonas (skat. 2. att.).



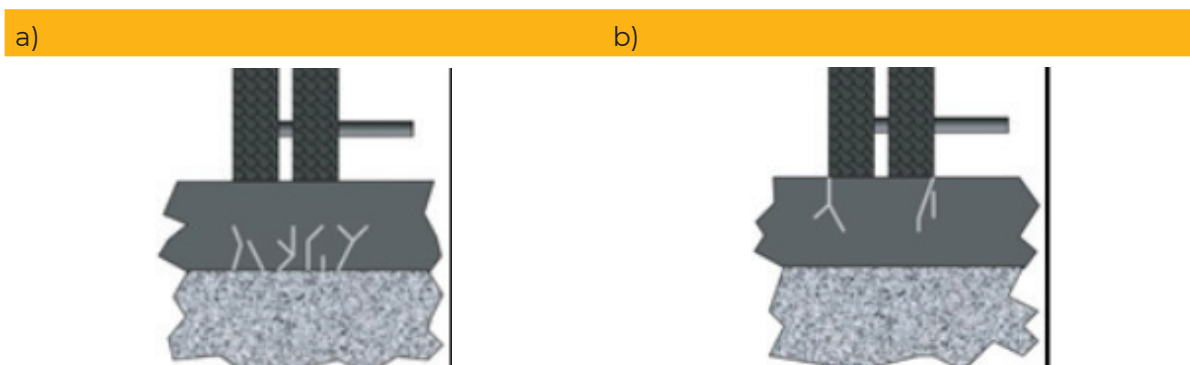
2. att. Asfaltbetona mehāniskās īpašības atkarībā no temperatūras un deformācijas amplitūdas [1]

Bitumena īpašībām un testēšanas temperatūrai ir svarīga loma asfaltbetona lineāri viskozi elastīgās deformācijas robežas noteikšanā (lineāri viskozi elastīgā deformācija ir atgriezeniskā deformācija ar kavējumu, bet lineāri viskozā ir momentāni atgriezeniskā – Huka likums). Savukārt, ja asfaltbetons tiek pakļauts augstu spriegumu amplitūdām jeb lielām transporta slodzēm, deformatīvās īpašības kļūst nelineāras (skat. 3. att.). Ja šo reoloģijas teoriju sasaista ar ciklisko slodzi, tad pie zemām deformācijas amplitūdām jeb nelielām transporta slodzēm un neliela slogošanas ciklu skaita asfaltbetons kļūst lineāri viskozi elastīgs. Pieaugot deformācijas lielumam un slogošanas ciklu skaitam, tiek novērota nelinearitāte. Līdz ar to ne tikai temperatūrai, bet arī deformācijas amplitūdai un ciklu skaitam ir svarīga loma noguruma plaisu veidošanās procesā.



3. att. Asfaltbetona mehānisko īpašību izmaiņas atkarībā no transporta slodzes radītās deformācijas (ϵ) un slogošanas ciklu skaita (N)

Plaisu veidošanos (attīstību) var klasificēt divās kategorijās – plaisas attīstās no seguma slāņa augšējās joslas uz leju (*top-down crack*) un plaisas attīstās no seguma slāņa apakšējās joslas uz augšu (*bottom-up crack*; skat. 4. att.). Atbilstoši *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)* noguruma plaisu definē kā plaisu, kas sākas seguma apakšējā joslā un pakāpeniski virzās uz seguma virsmu. Tomēr pēdējā laikā šo klasifikāciju plāno papildināt ar *top-down* plaisām, kuras bieži veidojas riteņu sliežu vietu malās, un to veidošanās cēlonis ir augsto stiepes un/vai bīdes spriegumu attīstība liela kontaktspiediena rezultātā uz automobiļa riteņu – seguma robežvirsmas. Šo plaisu veidošanos veicina novecojusī (stingrā) asfaltbetona saistviela un nelielais seguma slāņa biezums.



4. att. Noguruma plaisu tipi: a) plaisas attīstība no seguma slāņa apakšējās joslas uz augšu (*bottom-up crack*); b) plaisas attīstība no seguma slāņa augšējās joslu uz leju (*top-down crack*)

2. Noguruma plaisu veidošanos ietekmējošie faktori

Asfaltbetona seguma nogurums ir kompleksa parādība, kas rodas, ja uz segumu iedarbojas atkārtota satiksmes slodze. Autotransporta riteņu cikliskā slodze rada stiepes spriegumus asfaltbetona slāņa apakšējā joslā (skat. 1.att.), kas savukārt izraisa mikroplaisu rašanos. Šai slodzei cikliski atkārtoties, mikroplaisas aug, apvienojas un attīstās par lielākām, jau redzamām plaisām. Šim procesam turpinoties, plaisas attīstās augšup līdz pat seguma virspusei – tā rodas tā sauktās aligatorplaisas. Tās parādītas 5. attēlā. Šīs plaisas pasliktina braukšanas komfortu, apdraud transportlīdzekļus (no tām veidojas bedres ceļa segumā, kurām iespējams bojāt transportlīdzekļus) un samazina ceļa segas turpmāko, lietderīgo mūžu, jo apakšējie segas slāņi ir pakļauti laikapstākļu ietekmei un, samazinoties segas kopējai nestspējai, pieaug tās sabrukuma temps.

Noguruma plaisas rodas un attīstās ceļa segas konstrukcijas nepietiekamas nestspējas dēļ. Tai samazinoties, stiepes spriegumi pieaug līdz līmenim, pie kura tie asfaltbetonā var radīt mikroplaisas. Tam cēloņi var būt dažādi un tie ir šādi.

- Ceļa segas pamatslāņu nestspējas samazināšanās.

Visbiežākais iemesls tai ir pamatslāņu vai zemes klātnes nestspējas samazinājums nepietiekamas ūdens novades dēļ. Ceļa segas apakšējie slāņi bieži tiek pavājināti pārmērīga mitruma iekļūšanas tajos dēļ, jo ūdens uzkrāšanās šajos slāņos izraisa to nestspējas samazināšanos. Asfaltbetona slāņos, kuri atrodas virs segas pamatnes, kas bojāta mitruma iedarbībā, cikliskās transporta slodzes šo slāņu apakšējā joslā izraisa ļoti lielas stiepes deformācijas. Ja šīs deformācijas pārsniedz asfaltbetona stiepes spriegumus (skat. 1. vienād.), tad sāk veidoties bottom-up plaisas.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

kur:

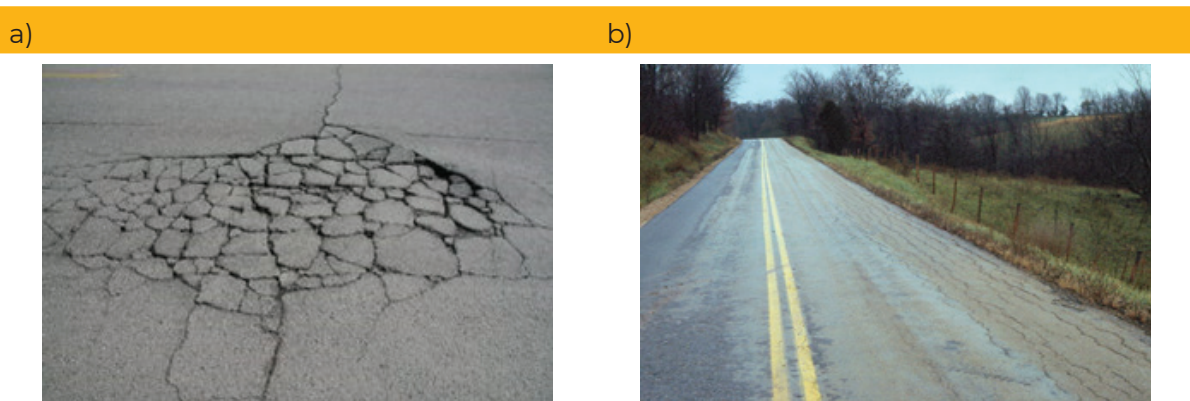
σ – spriegums, Pa;

ε – relatīvā deformācija, mm/mm;

E – elastības (stinguma) modulis.

Otrs iemesls ir segas pamatslāņu nolietojšanās laika gaitā. Ja atjaunošanas vai rekonstrukcijas darbi netiks veikti laicīgi, tad segas nestspēja samazināsies.

- **Transporta slodžu pieaugums.** Ceļa kalpošanas mūžā transporta slodzes var pieaugt un kļūt lielākas par tām, kādas bija paredzētas projektēšanas laikā. Neadekvāti projektēta ceļa konstrukcija. Ceļa segums var būt uzprojektēts pārāk plāns sagaidāmajām transporta slodzēm.
- **Ceļa seguma novecošanās.** Bitumena ķīmiskais sastāvs un īpašības mainās tā kalpošanas laikā. Pēc ilgākas asfaltbetona ekspluatācijas tā spēja uzņemt satiksmes slodzes var mazināties.
- **Nekvalitatīva būvniecība.** Piemēram, pamatslāņi vai asfaltbetona slāņi var tikt izbūvēti nepietiekamā biezumā, vai arī izbūves laikā var netikt sasniegts paredzētais asfalta sablīvējums.



5. att. Asfaltbetona noguruma plaisas (aligatorplaisas): a) lokālas [2]; b) globālas [3]

Asfaltbetona nogurumizturību ietekmējošos faktorus var iedalīt ārējos un iekšējos. Ārējie faktori ir šādi:

- 1) pamatnes grunts nestspēja un salizturīgā slāņa drenāža;
- 2) transporta slodze un ātrums;
- 3) ceļa segas konstrukcijas projekts
(izvēlētais slāņu biezums un asfaltbetona tips);
- 4) sablīvēšanas un ieklāšanas metode;
- 5) laika apstākļi (temperatūra).

Iekšējie noguruma plaisu veidošanos ietekmējošie faktori ir saistīti ar asfaltbetona stingumu, kuru ietekmē [4]:

1. Izejmateriāls:

- a) tā granulometrija;
- b) bitumena tips un daudzums;
- c) izvēlētā piedeva;
- d) bitumena novecošanās.

2. Asfaltbetona sablīvējums.

Svarīgi atzīmēt, ka asfaltbetonam ir spēja pašatjaunoties, t. i., plaisas pašas aizpildās bitumena saistvielas īpašību dēļ (palielinoties temperatūrai, bitumena tilpums palielinās un viskozitāte samazinās, kā rezultātā mikroplaisas tiek aizpildītas). Tomēr, palielinoties sloģošanas frekvencei, asfaltbetona spēja pašsadziedēties pasliktinās, līdz ar to samazinās seguma nogurumizturība.

Balstoties uz iekšējo noguruma plaisu ietekmējušo faktoru analīzi jāatzīmē, ka asfaltbetona sastāva granulometrijai ir lielāka ietekme uz noguruma plaisu veidošanos nekā bitumena saturam. Savukārt, veicot asfaltbetona rupjuma analīzi (lielākās frakcijas ietekmi uz noguruma plaisu veidošanos), noskaidrots, ka 12,5 mm frakcijai (atbilstoši ASV klasifikācijai) salīdzinājumā ar rupjākiem sastāviem (19 mm, 25 mm) piemīt lielāka nogurumizturība [5, 6]. Analizējot asfaltbetona tipu – AC (blīvā asfaltbetona) un SMA (šķembu mastikas asfaltbetona) ietekmi uz seguma nogurumizturību, tika konstatēts, ka AC ir nogurumizturīgāki par SMA. Tas izskaidrojams ar to, ka blīvākai AC struktūrai ir labāka minerālmateriāla daļiņu mijiedarbība salīdzinājumā ar SMA sastāviem [7].

Projektējot nogurumizturīgus ceļa segumus, jāņem vērā, ka noteicošā loma ir bitumena saistvielas īpašībām un slāņa biezumam. Balstoties uz asfaltbetona segumu projektēšanas rokasgrāmatas *NCHRP (The National Cooperative Highway Research Program, 2011. gada redakcija)* datiem, asfaltbetona segumiem, kuru biezums ir mazāks par 76 mm (3 in), palielinoties saistvielas stingumam, samazinās gan bottom-up, gan top-down noguruma plaisu izturība. Savukārt asfaltbetona segumiem ar slāņu biezumu virs 127 mm (5 in), palielinoties saistvielas stingumam, palielinās bottom-up noguruma plaisu izturība.

3. Noguruma plaisu veidošanos ietekmējošie faktori

Būvmateriāli tiek testēti, lai noskaidrotu to piemērotību konkrētajiem apstākļiem, pašreizējo seguma nolietojumu, kā arī lai labāk izprastu to īpašības. Ja pētniecībā bieži meklē jaunus risinājumus ārpus tradicionālajiem (ar mērķi pilnveidot esošo testēšanas standartu un tehnisko noteikumu prasības, izstrādāt jaunas metodes utt.), tad būvniecības industrijā cieši tiek ievēroti aktuālie testēšanas standarti, lai iegūtie rezultāti būtu salīdzināmi starp laboratorijām, kā arī tie būtu nepārprotami un ticami.

Nogurumizturības (noguruma) testēšanas standarti dažādās valstīs atšķiras. ASV ir spēkā standarts ASTM D8237 (*Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Asphalt-Aggregate Mixtures With the Four-Point Beam Fatigue Device*), Austrālijā izmanto standartu AC:PT/T233 (*Fatigue Life of Compacted Bituminous Mixes Subject to Repeated Flexural Bending*), savukārt Eiropā būvniecībā un autoceļu uzturēšanā parasti izmanto testus, kuri atbilst LVS EN 12697-24 "Bituminētie maisījumi. Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes. 24. daļa: Nogurumizturība". Turpmāk tekstā tiks dots standarta LVS EN 12697-24 prasību skaidrojums.

Noguruma testos cikliski tiek deformēti testa paraugi, līdz tiek sasniegts kāds kritērijs, tāpēc nogurums (*angl. fatigue*) tiek definēts kā materiāla stinguma samazinājums atkārtotu slodžu iedarbībā salīdzinājumā ar sākotnējo stingumu (piem., pēc 100. sloģošanas cikla). Testi iedalās pēc slodzes kontroles veida:

- **pārvietojuma vai relatīvās deformācijas kontrolētie (*displacement/strain controlled*) testi.** Šajos testos paraugs katrā ciklā tiek deformēts, līdz tiek sasniegts iestatītais pārvietojums vai relatīvā deformācija. Spriegumi (pārvietojuma, t. i., absolūtās vai relatīvās deformācijas radīšanai) testa paraugā var palielināties vai samazināties, bet pārvietojums vai relatīvā deformācija nepārsniegs iestatīto vērtību;
- **spēka vai spriegumu kontrolētie (*force/stress controlled*) testi.** Šajos testos paraugs katrā ciklā vai nu tiek deformēts ar konstantu spēku, vai arī līdz tiek sasniegta iepriekš noteiktā spriegumu vērtība. Absolūtā un relatīvā deformācija ar katru sloģošanas ciklu palielināsies, bet pieliktais spēks vai radītie spriegumi paliks konstanti.

Parauga noguruma laiks (*fatigue life of a specimen*) ir ciklu skaits, kurā paraugs sabrūk pie noteiktajiem testēšanas apstākļiem – temperatūras, parauga formas, testēšanas frekvences

utt. Atkarība no izvēlēta testa kontroles veida izšķir divus kritērijus, kad pārtraukt testu:

- **parastais sagraušanas kritērijs (*conventional criteria of failure*)**, kuru izmanto konstantā pārvietojuma testiem. Uzska, ka paraugs ir sabrucis tik slogošanas ciklu rezultātā, pēc kuriem tā kompleksais stinguma modulis $S_{mix,0}$ ir samazinājies par 50% no tā sākotnējās vērtības;
- **parastais noguruma kritērijs (*conventional criteria of fatigue*)**, kuru izmanto konstantā spēka testos. Uzska, ka paraugs ir sabrucis tik slogošanas ciklu rezultātā, pēc kuriem parauga augšpusē pārvietojums ir pieaudzis divas reizes salīdzinājumā ar testa sākumu.

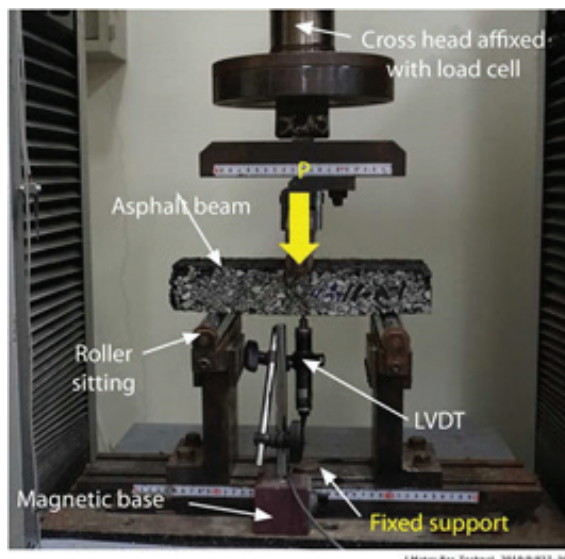
Testēšanas standartā ir minēti pieci dažādi testa paraugu veidi un to testēšanas nosacījumi, taču nestandarta gadījumos ir iespējams testēt citas formas paraugus pie nosacījumiem, kādi nav minēti standartā.

Divu punktu lieces tests trapeces formas paraugiem. Parauga viens gals tiek iespilēts, bet otram tiek pielikta slodze un tiek kontrolēts parauga pārvietojums. Slodze jāpieliek pēc sinusoīdas grafika (skat. 12. att.) atbilstoši izvēlētajai testēšanas frekvencei. Šo metodi var izmantot gan laboratorijā izgatavotiem, gan no ceļa seguma iegūtiem paraugiem (asfalta biezums > 40 mm). Parauga izmēri ir atkarīgi no asfaltbetona maisījuma minerālmateriāla lielākā izmēra. Testa iekārta ar paraugu ir parādīta 6. attēlā. Paraugus iegūst, tos izzāģējot no laboratorijā izgatavotām vai no ceļa iegūtām plāksnēm vai arī no ceļa urbumiem, kuru minimālais diametrs ir 200 mm.



6. attēls. Divu punktu lieces testa iekārta trapeces formas paraugiem [8]

Divu punktu lieces tests prizmas formas paraugiem. Šī metode ir ļoti līdzīga divu punktu lieces testam trapeces formas paraugiem. Šajā metodē tiek testēti taisnstūra prizmas formas paraugi. Paraugus gan laboratorijā, gan no ceļa iegūst tāpat kā iepriekš aprakstītajā trapeces metodē.



7. attēls. Trīs punktu lieces testa iekārta prizmas formas paraugam [9]

Trīs punktu lieces tests prizmas formas paraugiem. Izmantojot šo metodi, paraugs tiek nostiprināts abos galos un slodze tiek pielikta tā viduspunktā. Paraugs tiek balstīts uz 2 balstiem – brīvi balstīts, bez speciālas nostiprināšanas. Tas ir vienkāršākais tests no visiem lieces testiem. Pēc slodzes paraugam vienmēr radīsies paliekošā deformācija (ieliece), jo paraugs netiks pārvietots (aizstums) uz sākotnējo pozīciju (starp slodzes pielikšanas galvu un paraugu var veidoties atstarpe). Savukārt četru punktu lieces testam paraugs tiek cieši nostiprināts (*clamped*) un tas vienmēr atgriezīsies sākotnējā pozīcijā – iekārta to vienkārši aizstums.

Testēšanas iekārta ir parādīta 7. attēlā. Slodzi, kontrolējot pārvietojumu, paraugam pieliek pēc sinusoīdas grafika. Šo metodi izmanto maisījumiem ar maksimālo minerālmateriāla izmēru 22 mm vai paraugiem, kas ņemti no vismaz 50 mm biezām ceļa kārtām. Testa paraugu (siju) izmēriem jābūt 300×50×50 mm un, lai iegūtu materiāla nogurumu, jātestē vismaz 10 paraugi.

Četru punktu lieces tests prizmas formas paraugiem. Šo testa metodi visā pasaulē izmanto visbiežāk. Testa siju nostiprina tās galos un slodzi pieliek divos punktos starp nostiprinājumiem (skat. 8. – 10. att.). Parauga platumam un augstumam jābūt vismaz trīs reizes lielākam par maksimālo minerālmateriāla izmēru, savukārt parauga garumam jābūt vismaz sešas reizes lielākam par tā augstumu un platumu. Parasti testēšanas iekārtas

izmēri ierobežo paraugu izmērus, tātad arī maksimālo minerālmateriāla izmēru. Paraugus vai nu izgatavo laboratorijā (piem., ar veltņa blīvētāju), vai arī izzāgē no ceļa seguma. Slodzi pieliek sinusoidāli un parasti kontrolē deformāciju.



8. att. Četru punktu lieces tests prizmas formas paraugam [10]



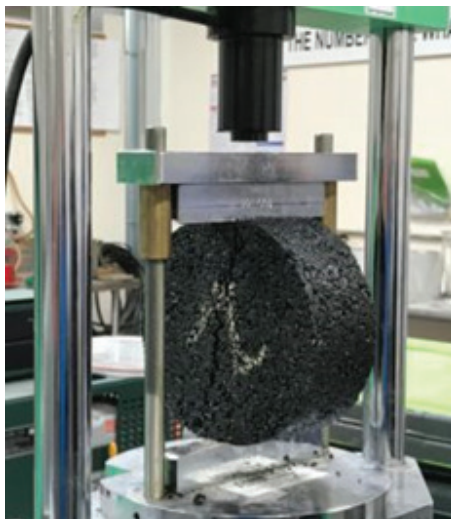
9. att. Četru punktu lieces testa paraugu slogošanas sistēma



10. att. Četru punktu lieces testa kamera un paraugi (sijas)

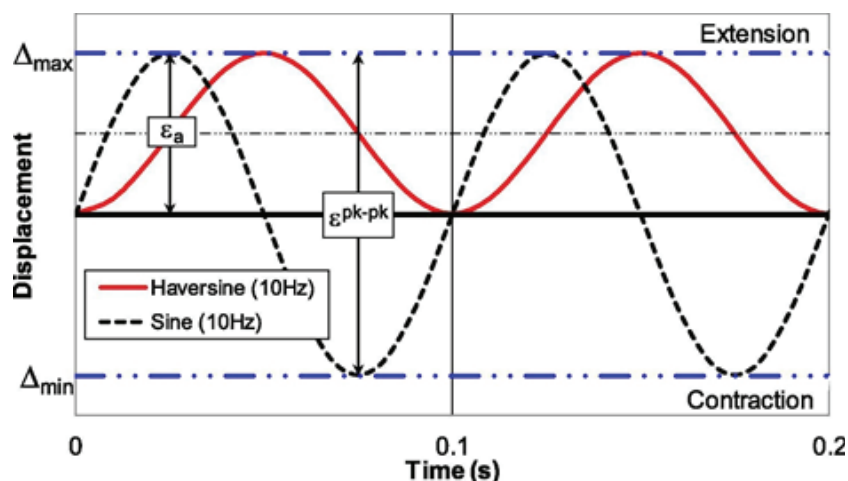
Netiešās stiepes tests cilindriskas formas paraugiem. Šajā testā cilindriskas formas paraugs novietots sāniski un iespiests starp balstu apakšā un slodzes pielikšanas līniju augšā (skat. 11. att.). Slodzi pieliek pēc haversina (*haversine*) funkcijas un kontrolē pielikto spēku. Cilindriskās formas paraugi tiek izgatavoti laboratorijā vai izurbti no ceļa. Atšķirībā

no iepriekšējām metodēm, kurās tika mērīta lieces deformācija, šeit mēra horizontālo stiepes deformāciju parauga vidū un, izmantojot Puasona koeficientu, nosaka stiepes deformāciju parauga centrā. Tiek testēti 10 līdz 18 paraugi, kuru augstums ir 40 vai 60 mm un diametrs 100 mm (ja minerālmateriāla maksimālais izmērs ir līdz 25 mm) vai 150 mm (ja minerālmateriāla maksimālais izmērs ir līdz 38 mm).



11. attēls. Netiešās stiepes testa iekārta ar cilindriskās formas paraugu [11]

Testēšanu veicot atbilstoši standarta prasībām, slodze paraugiem tiek pielikta un tās lielums mainās vai nu pēc sinusa, vai haversina funkcijas (skat. 12. att.). Ja slodze tiek pielikta pēc haversina funkcijas, tad parauga pārvietojums sākumā ir nulle, tad sasniedz maksimumu un cikla beigās atgriežas nullpunktā. Ja slodze mainās pēc sinusa likuma, tad paraugs tiek deformēts līdz maksimuma punktam, tad caur sākumstāvokli līdz minimuma punktam un cikla beigās atgriežas sākumpunktā.

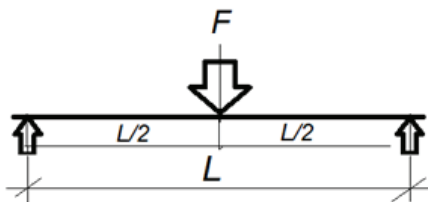


12. att. Haversina un sinusa funkcijas. Sarkanā līnija – haversina funkcijas grafiks, melnā līnija – sinusoīda; ϵ_a – pārvietojuma amplitūda [12]

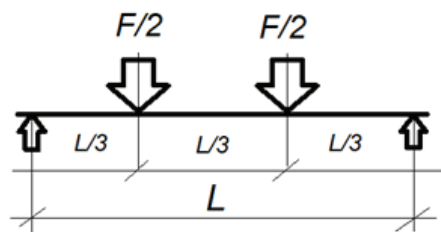
4. Nogurumizturības testēšana un rezultātu apstrāde

Šajā nodaļā aprakstīta testēšanas iekārtas darbība, par paraugu ņemot Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) pieejamo lielo četru punktu lieces testēšanas iekārtu (*Large 4PB test device*), ar to iegūstamie dati un šo datu apstrāde. Nogurumizturību ar šo iekārtu var noteikt asfaltbetona sijām, kuru šķēsgriezums ir no 50×50 līdz 100×100 mm (platuma un augstuma pieļaujamā pielāde ir ± 1 mm) un garumu no 400 līdz 660 mm (garuma pieļaujamā pielāde ir ± 2 mm), kas nozīmē, ka testēšanu var veikt smalko un vidēji rupjo frakciju asfaltbetonam, kā arī rupjākam pamatkārtas asfaltbetonam ar frakcijas lielāko izmēru $D = 32$. Paraugu izgatavošana detalizēti aprakstīta testēšanas standartos LVS EN 12697-33:2019 un LVS EN 12697-24:2018. Paraugu testēšana jāveic no 2 līdz 8 nedēļām pēc to izgatavošanas. Ilgstošai (> 1 mēnesi) paraugu uzglabāšanai jāizmanto aukstuma kamera ar temperatūru $0 - 5$ °C.

Nogurumizturības testēšanu sāk ar paraugu kondicionēšanu (kondicionēšanas laiks 0 °C un 10 °C temperatūrā ir ≥ 2 h, bet 20 °C tas ir ≥ 1 h, bet ne lielāks par 6 h) un ievietošanu un nostiprināšanu iekārtā. Slogošanas rāmī siju nostiprina ar divām ārējām un divām iekšējām skavām (skat. 16. att.). Pēc tam ievada izvēlētos testa parametrus un uzsāk testēšanu. Siju pārvieto sinusoidāli, ar divām iekšējām skavām pieliekot nepieciešamo spēku. Izvēlētais slogošanas veids (konstanta deformācija vai konstants spēks) jānodrošina ar izvēlēto spēka vai pārvietojuma atgriezenisko reakciju. Pielikto spēku, pārvietojumu un fāzes nobīdi mēra pēc pirmajiem vismaz 100 cikliem un pēc tam periodiski, nodrošinot, ka līdz sabrukšanas brīdim tiek veikti vismaz 100 mērījumi. 13. un 14. attēlos parādītas shēmas stinguma noteikšanai, izmantojot trīs punktu un četru punktu lieci.



13. att. Sijas trīs punktu lieces shēma



14. att. Sijas četrpunktu lieces shēma

Stingumu trīs punktu lieces gadījumam nosaka pēc formulas:

$$S_{3PB} = \frac{48EI}{L^3}, \quad (1)$$

kur:

I – inerces moments, cm^4 ;

E – elastības modulis, MPa;

L – sijas garums, cm.

Stingums četrpunktu lieces gadījumam nosaka pēc formulas:

$$S_{4PB} = \frac{56,4EI}{L^3} \quad (2)$$

kur:

Komplekso stinguma moduli S_{mix} dinamiskās slodzes iedarbībā aprēķina no spēka, pārvietojuma un fāzes nobīdes (leņķa):

$$S_{mix} = \frac{12 \cdot F_0 \cdot L^3}{Z(X_s) \cdot R(X_s) \cdot B \cdot H^3} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \{ \cos(\varphi(X_s)) \cdot I(X_s) - \sin(\cos(\varphi(X_s)) \cdot J(X_s) \} + \{ I^2(X_s) + J^2(X_s) \}}, \quad (3)$$

kur:

S_{mix} – kompleksais stinguma modulis, MPa;

F_0 – divu iekšējo skavu spēks (spēka amplitūda), N;

L – efektīvais parauga garums (atstatums starp ārējām skavām), m;

B – sijas platums, m;

H - sijas augstums, m;

X_s – koordināta X , kas nosaka izlieci ($A \leq X_s \leq L/2$), kur A ir atstatums starp kreiso ārējo skavu ($X=0$) un kreiso iekšējo skavu ($X=A$), m;

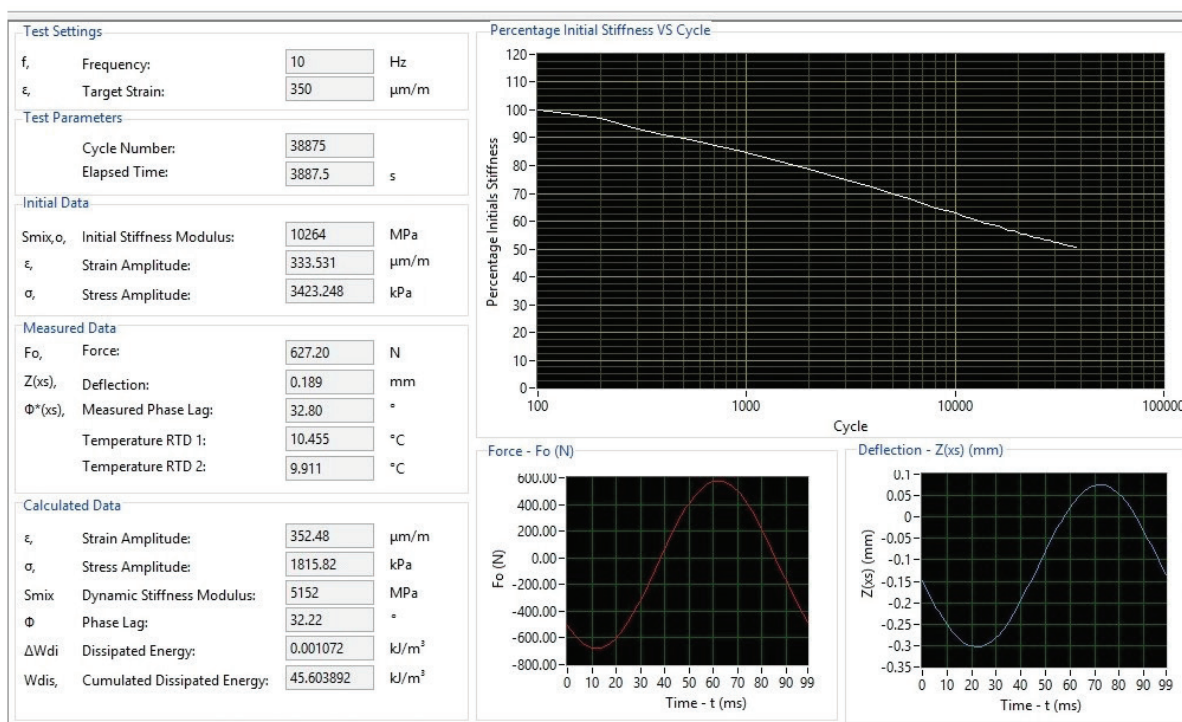
$Z(X_s)$ - sijas izlieces amplitūda vienā slogošanas ciklā starp iekšējām skavām attālumā X_s no kreisās ārējās skavas;

$R(X_s)$ - svēršanas funkcija – bezdimensionāla funkcija atkarībā no attāluma X līdz kreisai ārējai skavai A , kas raksturo kreisās iekšējās skavas koordinātas A un faktiskā atstatuma L starp abām ārējām skavām attiecību;

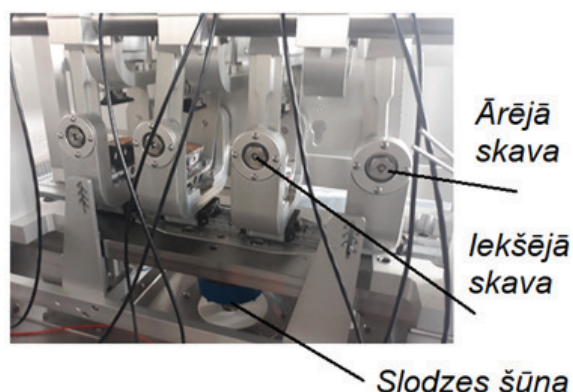
$\phi(X_s)$ – fāzes leņķis vienā ciklā starp sinusoidāli pielikto slodzi un izmērīto izlieci $Z(X_s)$, rad.;

$I(X_s)$ - inerces bezdimensionāla funkcija, kas atkarīga no attāluma X_s , lai aprēķinātu masas inerces efektu;

$J(X_s)$ – rimstošo svārstību bezdimensionāla funkcija atkarībā no attāluma X_s , lai tiktu ņemti vērā slāpējošie (neviskošie) efekti sistēmā (sistēmas zudumi).



15. att. Kontroles panelis nogurumizturības testēšanai



16. att. Četru punktu lieces tests

Izvēlētajā temperatūrā un pie izvēlētās frekvences tests jāveic vismaz trīs līmeņos (trīs relatīvās deformācijas, ja izvēlēts “*control strain*”), minimālais paraugu skaits katram līmenim ir 6. Līmeņi jāizvēlas tā, lai noguruma iestāšanās laiks būtu starp 10^4 un 2×10^6 cikliem.

Pamatdati (*raw data*), ko iegūst no testēšanas iekārtas, ir pieliktās slodzes un parauga deformācijas mērījumi ik pēc noteikta laika sprīža, piemēram, reizi 50 milisekundēs vai reizi sloģošanas ciklā. No šiem datiem vai nu lietotājs, vai iekārta pati izrēķina pārējos rezultātus (skat. 1. – 3. formulu). Pielikto slodzi mēra iekārtas slodzes šūna (*load cell*). Deformāciju mēra vai nu iekārtā iebūvētie, vai ārēji pieliekamie sensori, piemēram, *linear variable differential transformer* (LVDT; skat. 17. att.).

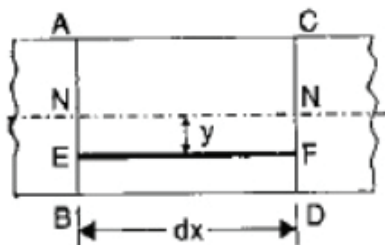


17. att. Sensoru LVDT izvietojums deformācijas mērīšanai

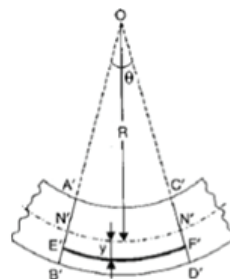
Sijas lieces rezultātā tās apakšējā joslā BD (dx) veidojas stieptā zona (skat. 18. att.). Stiepes rezultātā sija izliecas (veidojas loks) ar garumu B'D'. Sijas ārējā daļa ir visvairāk izstiepta,

jo tā atrodas vistālāk no centra. Matemātiski sijas visas daļas ir saliektas vienā leņķī θ , bet R mainās atkarībā no biezuma (y), tāpēc mainās arī lielums $R\theta$ un līdz ar to arī izliekuma garums ($B'D' > E'F' > N'N'$).

a)



b)



18. att. Sijas lieces shēma

Izliekuma garumu $N'N'$ nosaka no formulas:

$$N'N' = R \cdot \theta \quad (4)$$

kur:

lievīot mainīgo y kā attālumu no neitrālās ass līdz jebkuram citam šķērsgriezuma rādiusam, kā parādīts attēlā, izliekuma rādiuss jebkuram y ir $(R - y)$, un galīgo garumu (L) jebkuram y aprēķina:

$$L = (R - y) \cdot \theta \quad (5)$$

Relatīvo deformāciju ϵ_x attālumā y no neitrālās ass aprēķina:

$$\epsilon_x = \frac{E'F' - EF}{EF} = \frac{(R + y) \cdot \theta - R \cdot \theta}{R \cdot \theta} = \frac{y}{R} \quad (6)$$

Apakšējā joslā $B'D'$, kur $y = \frac{h}{2}$ (h – sijas augstums):

$$\epsilon_x = \frac{B'D' - BD}{BD} = \frac{h}{2R} \quad (7)$$

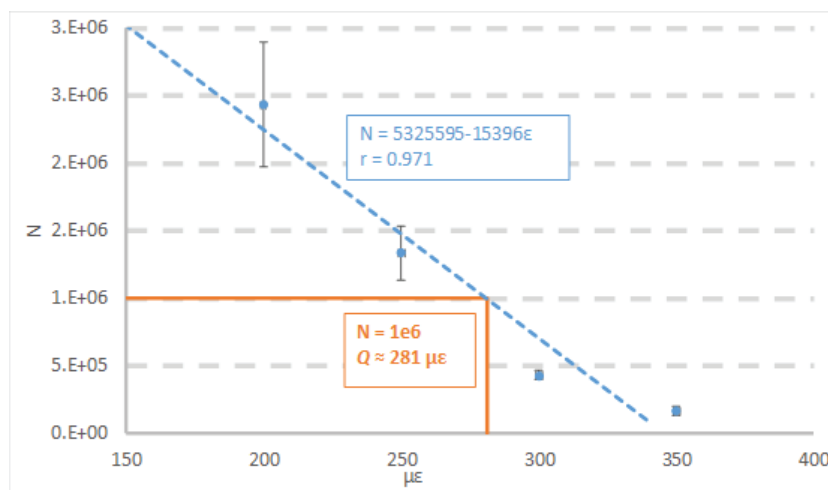
Relatīvā deformācija (*strain*, ϵ) apraksta parauga punktu relatīvo pārvietojumu pret šo punktu novietojumu sākumstāvoklī. Mehānikā izšķir vairākas relatīvās deformācijas definīcijas. Šajā atskaitē tiek lietota klasiskā definīcija, angļu valodā saukta par *engineering strain*, un tā ir attiecība starp deformāciju un sākotnējo izmēru:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (7)$$

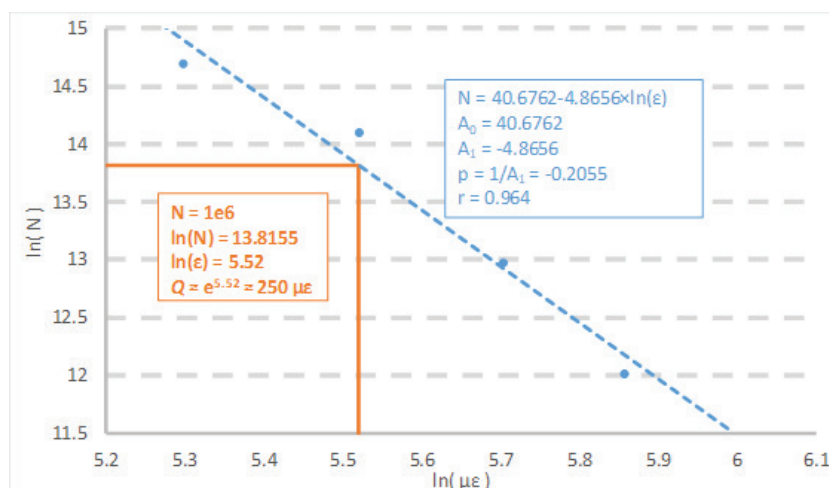
kur ε – relatīvā deformācija.

Pretēji deformācijai, kuru izsaka ar kādu garuma mērvienību (metriem, milimetriem utt.), relatīvā deformācija ir bezdimensionāls lielums, kam nav mērvienības. To izsaka kā attiecību starp garumu pēc deformācijas un sākotnējo garumu. Tā kā mēs tomēr esam pieraduši pie mērvienībām, ir gadījumi, kad relatīvajai deformācijai pieraksta mērvienību garums garumā, piemēram, m/m vai mm/mm. Ceļu asfaltbetonam standarta kalpošanas slodzes iedarbībā relatīvā deformācija ir neliela, un tā ir atkarīga no temperatūras un transporta slodzes lieluma. Parasti relatīvā deformācija ε ir mikrolīmenī (apzīmē ar $\mu\varepsilon$), piemēram, $200 \times 10^{-6} \mu\text{m/m}$ jeb $0,00026 \mu\text{m/m}$. Tāpēc mehānikā angļu valodā, lai nebūtu jālieto neparocīgais “reiz desmit minuss sestajā pakāpē”, ieviests termins “*microstrain*” (relatīvā mikrodeformācija), piem., $\mu\varepsilon = 200 \times 10^{-6} \mu\text{m/m}$ apzīmē ar 200 *microstrains*.

Testēšanas rezultāti parasti tiek atspoguļoti spriegumu-noguruma ciklu vai deformācijas-noguruma ciklu diagrammās. Tās parasti sauc par S-N vai ε -N grafikiem (*S-N curve*, *ε -N curve*). ε -N grafiku piemēri parādīti 19. un 20. attēlā. Šajā gadījumā grafiki attēlo noguruma laiku (ciklu skaitu) uz y ass un relatīvo deformāciju ε uz x ass, tomēr var būt arī pretēji. Turklāt bieži noguruma rezultātu attēlošanai izmanto logaritmisko, nevis mums pierasto lineāro skalu, vai arī attēlo nevis mērījumu rezultātus, kā redzams 19. attēlā, bet gan to logaritmus – kā 20. attēlā. Testa standarts nenosaka, kā tieši attēlot rezultātus, bet paredz atskaitē iekļaut vairākus lielumus, kas aprēķināmi no rezultātu logaritmiem.



19. att. ε -N grafiks. Testa vērtības un rezultātu izkliede pie katra deformācijas līmeņa.
Q – relatīvā deformācija, pie kuras noguruma laiks ir 1 000 000 cikli



20. att. Testa vērtību naturālie logaritmi. Relatīvā deformācija ϵ uz x ass un noguruma laiks – uz y ass

19. un 20. attēlā parādīti reāli četru punktu lieces testa dati. Paraugi tika testēti pie četriem dažādiem deformācijas līmeņiem – 200, 250, 300 un 350 $\mu\epsilon$. Noguruma līnija parāda sakarību starp visiem testa līmeņiem. Testa standarts nosaka, ka tā atrodamā, izmantojot lineāro regresiju. Noguruma līnijas vienādojums 19. un 20. attēlā ir atšķirīgs, jo 19. attēlā tas apraksta reālos testēšanas datus, bet 20. attēlā – to naturālos logaritmus. Testa standarts paredz, ka atskaitē jāiekļauj vairāki lielumi – A_0 , A_1 , p , r – no noguruma līnijas, kas aprēķināta no rezultātu logaritmiem 20. attēlā, kā arī jānosaka līmenis Q – relatīvā deformācija (citos gadījumos – spēks, spriegums vai pārvietojums), pie kuras noguruma laiks ir 1 000 000 cikli. Relatīvo deformāciju Q var noteikt gan no rezultātu grafika, gan no logaritmu grafika, tomēr iegūtie rezultāti nav identiski. Tāpēc nepieciešama vienota pieeja rezultātu noteikšanai. **Rekomendēts izvēlēties vienkāršāko ceļu un izmantot grafikus ar mazāk matemātiskajiem pārveidojumiem, proti, noteikt šo lielumu no rezultātu grafika (skat. 19. att.).**

Testa standarts definē vairākus testēšanas parametrus – frekvenci, pielikto spēku vai deformāciju, temperatūru u. c., tāpēc jāizvēlas tādi lielumi, lai tie atspoguļotu sagaidāmos asfaltbetona darba apstākļus. Testēšanas frekvence atspoguļos sagaidāmo satiksmes intensitāti – lielāka frekvence atbildīs lielākai satiksmes intensitātei; pieliktā deformācija atspoguļos sagaidāmo satiksmes slodzi – lielāka iestatītā relatīvā deformācija atbildīs lielākai ass slodzei. Izvēlētajai testēšanas temperatūrai būtu jāatspoguļo sliktākie ticami sagaidāmie darba apstākļi. Noguruma gadījumā nelabvēlīgākā pārsvarā būs zema temperatūra.

Lai gūtu vispusīgu un pilnīgu priekšstatu par konkrētās receptes asfaltbetona izturēšanos dažādos darba apstākļos, nepieciešams liels testu skaits. Testēšanas standarts četru punktu lieces gadījumā nosaka, ka jātestē vismaz seši paraugi pie vismaz trīs dažādām

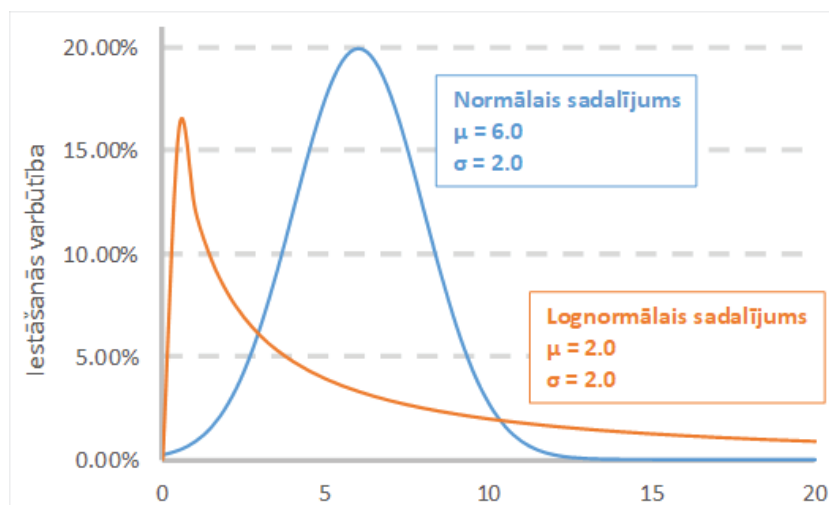
relatīvās deformācijas vērtībām, pie kurām nogurums iestājas starp 104 un 2×10^6 cikliem, piemēram, 19. attēlā – pie 250, 300 un 350 $\mu\epsilon$. Jāņem vērā, ka tas ir pats minimālākais testēšanas apjoms – vēl mazāk testējot, nav iespējams gūt ticamu priekšstatu par materiāla izturēšanos. Bet tas nenozīmē, ka šie minimālie 18 testi ir pietiekami vispusīga priekšstata iegūšanai.

Cik dažādos spēka/pārvietojuma līmeņos testēt ir jautājums, kura atbilde ir atkarīga no tā, kam šie testi nepieciešami. Piemēram, ja jāizvēlas asfaltbetona masa, kuru iebūvēt kādā konkrētā ceļa posmā un no satiksmes datiem zināms, ka konkrētajā ceļa posmā segā neradīsies relatīvās deformācijas, kas lielākas par 150 $\mu\epsilon$, satiksmes intensitāte atbilst aptuveni 10 Hz testēšanas frekvencei un nepieciešams, lai paraugi nesabruktu vismaz 1 000 000 testēšanas ciklos. Tad varam notestēt vairāku asfaltbetona masu paraugus pie 200, 250 un 300 $\mu\epsilon$, noteikt to nogurumizturību un izvēlēties piemērotāko no tām. Citā gadījumā, ja esam radījuši jaunu asfaltbetona recepti un vēlamies saprast, kādiem ceļa posmiem šo asfaltbetonu varētu izmantot, tad būs jātestē ne vien trīs līmeņos, bet krietni vairāk, piemēram, pie 100, 150, 200, 250 un 300 $\mu\epsilon$ relatīvajām deformācijām. Tā iegūsim vidējo noguruma laiku katrā no šiem līmeņiem un varēsim atrast ceļa posmus, kuriem asfaltbetona masa ar šādu vidējo noguruma laiku pie konkrētā $\mu\epsilon$ ir derīga.

Paraugu un līmeņu skaits ir cieši saistīts ar statistiku un varbūtību teoriju [13,14]. Pieņemsim, ka ir kāda asfaltbetona rūpnīca, kas ražo konkrētu asfalta masu. Tai visu laiku tiek izmantoti vieni un tie paši izejmateriāli un arī ražošanas process ir nemainīgs. Ja tiktu testēts pilnīgi viss saražotais asfalts, to statistikā sauktu par “populāciju” (ģenerālkopu). Tāpēc saskaņā ar standartu tiek testēts tikai noteikts paraugu skaits, ko statistikā sauc par “izlasi”. Pat viena un tā paša ražošanas procesa un vienu un to pašu izejmateriālu gadījumā saražotā asfaltbetona noguruma laiks atšķirsies, jo būs nelielas nobīdes ražošanas procesā, nelielas atšķirības izejmateriālos, nedaudz atšķirsies arī tas, kā asfaltbetons tiks transportēts (kādos apstākļos un cik tālu), kā arī kā tas tiks ieklāts un sablīvēts. Tas ir pilnībā sagaidāms, un, kamēr saražotā asfalta noguruma laiks $\pm$ nobīdes ir pieļaujamās robežās, tas ir absolūti normāli. Tomēr nevar paredzēt, kāds būs konkrētā ražošanas procesā saražotā asfalta noguruma laiks un citas īpašības, tāpēc šos rezultātus apraksta kā noteiktu varbūtību sadalījumu. Bieži tiek izmantots normālais vai lognormālais sadalījums (skat. 21. att.). Tie apraksta visus ražošanas procesa iespējamās rezultātus jeb “populāciju” un to iestāšanās varbūtību [15].

Varbūtību sadalījumi tiek aprakstīti ar to parametriem. Normālajam un lognormālajam sadalījumam ir divi parametri μ un σ , kur pirmais ir vidējā vērtība, bet otrs – standartnovirze. Asfalta ražošanas procesam, ja mēs testējam tā rezultātu uz noguruma laiku, μ apraksta vidējo noguruma laiku, bet σ – testa rezultātu izkliedi ap vidējo vērtību. Tā kā nav iespējams notestēt visu “populāciju”, tad noteikt šos parametrus pilnīgi precīzi nevar. Tomēr var notestēt kādu paraugu izlasi un noteikt šīs izlases vidējo aritmētisko $\bar{x}$ un standartnovirzi s , kuri ir μ un σ aplēses (tuvinājumi). Savukārt ticamības intervāli (*confidence intervals*)

palīdz noteikt ražošanas procesa μ un σ izrēķināto $\bar{x}$ un s vērtību ticamību procentos.



21. att. Normālais un lognormālais sadalījums: μ – vidējā vērtība; σ – standartnovirze

Notestējot vienu paraugu, iegūst patiesu (bet potenciāli neprecīzu) μ aplēsi x , tomēr nav zināma rezultātu izkliede σ . Pat izkļedes aplēsi s nav iespējams iegūt no tikai viena testa. Tāpēc ir nepieciešams vairāk nekā viens tests. Tādā gadījumā $\bar{x}$ aprēķina kā:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x}{N}, \quad (9)$$

kur N – paraugu skaits, bet s izrēķina kā:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x - \bar{x})^2}{N - 1}}. \quad (10)$$

Lai arī ir iegūta rezultātu izkliede s , joprojām nav zināma rezultātu ticamība, t. i., vai reālā ražošanas procesa vidējā vērtība μ ir tuva aprēķinātajai $\bar{x}$. Tāpēc jāizvēlas ticamības līmenis (*confidence level*) un jāaprēķina intervāls, par kuru ar noteikto (izvēlēto) ticamību var teikt, ka μ atrodas šajā intervālā. Parasti būvmateriāliem izvēlās 95% ticamības līmeni.

Visbiežāk ticamības intervāla aprēķiniem izmanto t-testu [16]. Šis tests izmantojams, ja procesa varbūtību sadalījumu apraksta normālais vai tam tuvs sadalījums. Ar t-testu ticamības intervālu aprēķina kā:

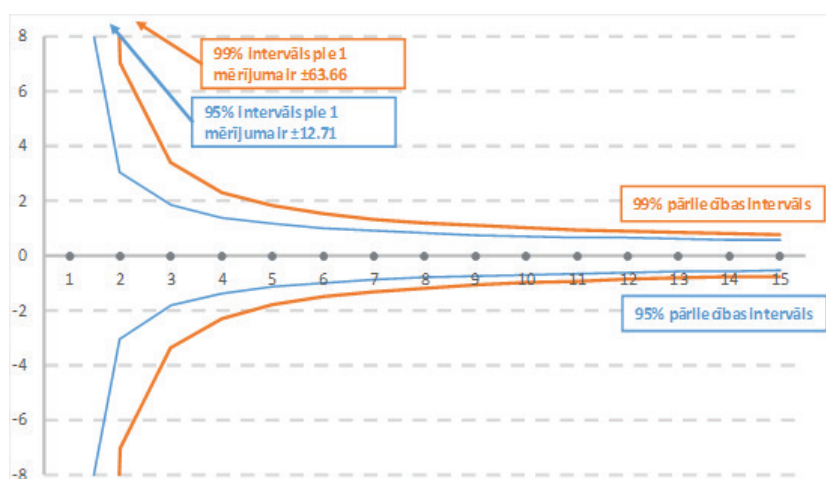
$$\bar{x} \pm \frac{t_{N-1}s}{\sqrt{N}}, \quad (11)$$

kur t – kritiskā vērtība, kas atkarīga no izvēlētajās ticamības un testu skaita. t vērtība ir jāņem par vienu mazāka nekā paraugu skaits, proti, ja paraugu skaits ir 5, tad izmantojamā t vērtība 95% ticamības līmenim ir pie 2,776. Šīs vērtības atrodamas rokasgrāmatās un internetā. 1. tabulā parādītas biežāk sastopamās vērtības 95 un 99% ticamības līmeņiem.

1. tabula t vērtības 95 un 99% ticamības līmeņiem (N – paraugu skaits)

N	Ticamības līmenis	
	95%	99%
1	12,706	63,651
2	4,303	9,925
3	3,182	5,841
4	2,776	4,604
5	2,571	4,032
6	2,447	3,707
7	2,365	3,499
8	2,306	3,355
9	2,262	3,25

Var redzēt, ka, pieaugot mēģinājumu skaitam, t vērtības lielums samazinās, līdz ar to, jo vairāk ir paraugu, jo ticamības intervāls kļūst šaurāks. Turklāt ticamības intervāls sarūk (tātad esam pārliecināti, ka procesa vidējā vērtība atrodas tuvāk mūsu izrēķinātajai vidējai vērtībai) straujāk pie neliela paraugu skaita. Tas nozīmē, ka lielāks ieguvums būs palielinot paraugu skaitu no viena uz diviem nekā no vienpadsmit uz divpadsmit. Ticamības intervāls atkarībā no testēto paraugu skaita ir parādīts 22. attēlā.



22. att. Ticamības intervāls dažādam testu skaitam (uz x ass). Izlases vidējā vērtība $\bar{x}=0$, izlases standartnovirze $s=1$

Piemērs. Rūpnīcā sāka ražot jauna asfaltbetona masa pēc jaunas receptes. Jānoskaidro jaunā asfaltbetona noguruma laiks pie konkrētajiem testēšanas apstākļiem. Vispirms tika notestēti trīs paraugi, tad vēl seši, jo bija vēlme iegūt precīzākus datus. Rezultāti parādīti 2. tabulā.

2. tabula Testēšanas dati

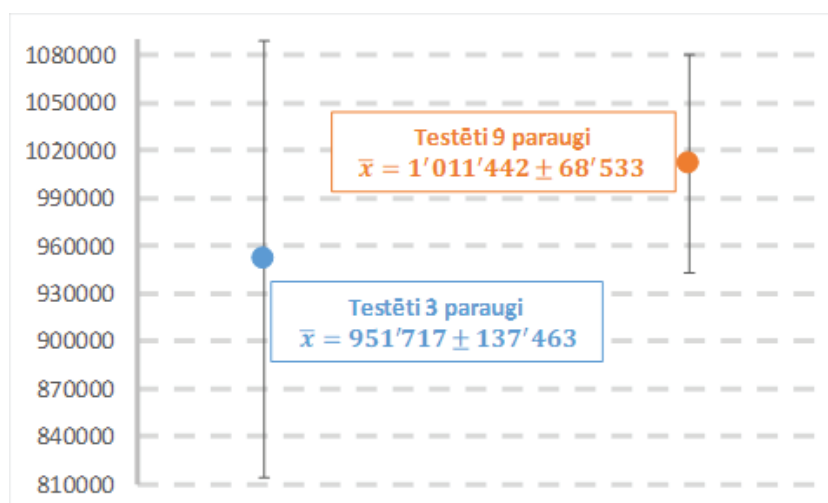
Paraugs	Noguruma laiks, cikli
1	1 010 101
2	999 000
3	945 000
4	1 070 023
5	900 050
6	1 170 011
7	910 032
8	1 098 765
9	999 999

Gadījumos, kuriem nav zināma “populācijas” vidējā vērtība – kā šajā piemērā – nav iespējams aprēķināt ticamības intervālu vienam paraugam. Šajā gadījumā nepieciešams noskaidrot, kādā intervālā ar 95% ticamību atradīsies no konkrētās masas ieklātā asfaltbetona noguruma laiks, ja to testē konkrētajos apstākļos. Aprēķina rezultāti ir parādīti 3. tabulā un 23. attēlā.

3. tabula Aprēķina dati

Testēto paraugu skaits	Izlases vidējā vērtība, cikli	Izlases standartnovirze, cikli	t vērtība	Ticamības intervāls, cikli	Zemākā robeža, cikli	Augstākā robeža, cikli
3	951 717	55 332	4,303	$\pm 137\,464$	814 253	1 089 181
9	1 011 442	89 160	2,306	$\pm 68\,534$	942 908	1 079 976

Pēc pirmo 3 paraugu testēšanas ar 95% ticamību var teikt, ka vidējā vērtība atrodas intervālā $\bar{x}=951\,717 \pm 137\,464$, bet, kad notestēti visi deviņi paraugi, ar to pašu ticamību var teikt, ka vidējā vērtība atrodas intervālā $\bar{x}=1\,011\,442 \pm 68\,534$. Pirmajā gadījumā ticamības intervāls ir par 50% lielāks nekā otrajā, lai gan standartnovirze (rezultātu izkliede) ir mazāka – 55 332 pret 89 160. Šajā piemērā redzam, ka, testējot vairāk paraugu, intervāls, par kuru esam 95% pārliecināti, ka tajā atradīsies vidējā vērtība, ir būtiski mazāks.



23. att. Trīs un deviņu testēto paraugu vidējā vērtība un ticamības intervāli

Ne vienmēr projektētās konstrukcijas darbojas tieši tā, kā paredzēts projektā, kā arī projektētāju iegūtie rezultāti ne vienmēr pilnībā atspoguļo konstrukcijas darbību ekspluatācijas laikā. Tomēr tas nenozīmē, ka aprēķini ir pilnībā neprecīzi. Šajos gadījumos projektētājiem un inženieriem jāizdara pamatoti pieņēmumi par konstrukcijas darbību reālajā vidē. Iemesli nenoteiktībai ir vairāki:

- neviens modelis nespēj pilnībā precīzi paredzēt, kā segums veiks savu uzdevumu kontrolētā vidē ar kontrolētām slodzēm;
- aprēķina vērtības – moduļi, noguruma laiki u. tml. – ir vienkāršoti lielumi, ar kuriem apraksta sarežģītus un mainīgus procesus ceļa segā un segumā;
- nevienā būvniecības procesā nevar izveidot segumu, kurš pilnībā atbilstu projektētajam – gan biezuma, gan materiāla īpašību ziņā.

Šo nenoteiktību dēļ projektētās segas sagaidāmās ekspluatācijas īpašības jāapraksta nevis ar absolūtām vērtībām, bet gan ar kādu sagaidāmo projekta ticamību (reliability). To var definēt šādi.

Projekta ticamība ir varbūtība, ka segums, kas izveidots atbilstoši izvēlētajam projektam, savā projektētajā dzīves laikā izturēs tam paredzēto satiksmes iedarbību un tam nebūs nepieciešama rekonstrukcija [17].

Konkrētās varbūtības tiek izmantotas noguruma modeļos nākamajās nodaļās. Tipiski izvēlētais ticamības vērtības ir dotas 4. tabulā [17]. Piemēram, ātrgaitas ceļiem, kas projektēti ar 95% projekta ticamību, ir normāli, ja līdz pieciem procentiem gadījumu kalpošanas laikā rodas problēmas, kas rada nepieciešamību pēc kāda ceļa posma rekonstrukcijas.

4. tabula Aprēķina dati [17]

Autoceļa veids	Projekta ticamība (%)
Ātrgaitas ceļš	95 – 97,5
Autoceļš, joslas $AADT > 2000$	90 – 97,5
Autoceļš, joslas $AADT \leq 2000$	85 – 95
Citi ceļi, joslas $AADT > 500$	85 – 95
Citi ceļi, joslas $AADT \leq 2000$	80 – 90

5. Noguruma modeļi

5.1. *Shell* noguruma modelis

Shell asfaltbetona noguruma modeli 1978. gadā izstrādāja naftas ieguves, pārstrādes un tās produktu ražošanas uzņēmums *Shell*. Šis ir viens no vecākajiem asfaltbetona noguruma modeļiem, tomēr to plaši izmanto joprojām, piemēram, Austrālijas ceļu seguma projektēšanas vadlīnijās [17].

Sakarību starp maksimālo radīto relatīvo stiepes deformāciju (asfaltbetonā no kādas konkrētas, projektētāja izvēlētas slodzes) un pieļaujamo slodzes atkārtojumu skaitu autoceļiem ar vidēju un augstu satiksmes intensitāti apraksta vienādojums:

$$N = \frac{SF}{RF} \left(\frac{6918(0,856 V_b + 1,08)}{E^{0,36} \mu\epsilon} \right)^5, \quad (12)$$

kur:

N – pieļaujamais slodzes radītās relatīvās deformācijas atkārtojumu skaits;

$\mu\epsilon$ – relatīvā deformācija mikrodeformācijās (*microstrains*), ko transporta slodze rada asfaltbetona slāņa apakšējā joslā;

V_b – bitumena saturs asfaltbetona segumā (%);

E – asfaltbetona elastības modulis (MPa);

SF – nobīdes faktors (*shift factor*) starp laboratorijas testiem un lauka apstākļiem (parasti $SF = 6$);

RF – ticamības faktors (*reliability factor*) no 5. tabulas.

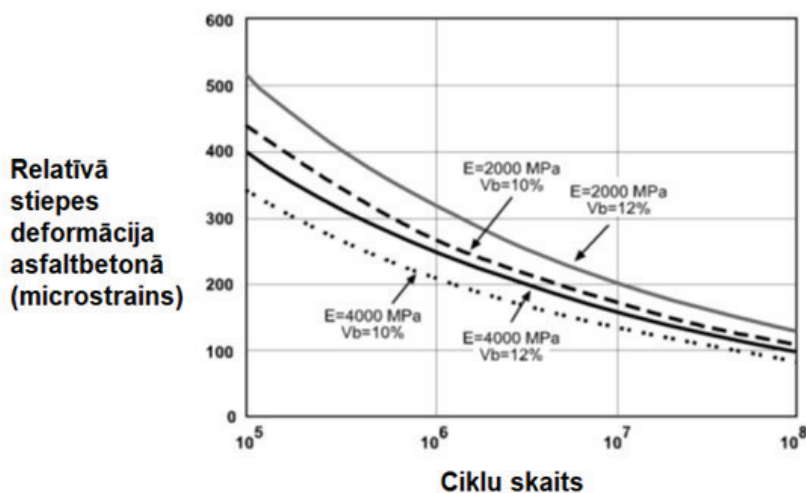
5. tabula Ticamības faktori RF

Izvēlētā aprēķina rezultāta ticamība (reliability)	50%	80%	85%	90%	95%	97,5%
RF	1,0	2,4	3,0	3,9	6,0	9,0

Vienādojumā SF/RF loceklis ir funkcija, kas apraksta, kā vidējais laboratorijā iegūtais noguruma laiks saistīts ar lauka apstākļos novēroto noguruma laiku pie izvēlētās ticamības. Šai funkcijai ir divas sastāvdaļas:

- nobīdes faktors SF , kas ievērtē, kā vidējais noguruma laiks laboratorijas testa apstākļos atšķiras no vidējā noguruma laika lauka apstākļos;
- ticamības faktors RF , kas ievērtē, kā vidējais noguruma laiks lauka apstākļos var mainīties atkarībā no izvēlētās ticamības, ņemot vērā, piemēram, novirzes iebūves laikā, vides ietekmi, satiksmes ietekmi utt. [18].

Šī modeļa piemērs ar projektēto ticamību 95% parādīts 24. attēlā – piemēram, uzprojektējot asfaltbetona maisījumu ar 2000 MPa moduli un 12% bitumena saturu. Grafikā to parāda pelēkā līnija. Ja projektētāja izvēlētā ass slodze asfalta slānī rada relatīvo deformāciju 200 $\mu\epsilon$, tad šī slāņa noguruma laiks būs 107 cikli (pārbraukšanas reizes), bet, ja izvēlētā slodze rada relatīvo deformāciju 320 $\mu\epsilon$, tad noguruma laiks būs 106 cikli (pārbraukšanas reizes). Izdalot aprēķināto ciklu skaitu ar konkrētajā joslā plānoto pārbraukšanas reižu skaitu gadā, tiek iegūts sagaidāmais noguruma laiks gados. Pārbraukšanas reizes šeit jāskaita asīs (piem., ESAL mērvienībās).



24. att. Asfalta seguma sagaidāmais noguruma mūžs, ja projekta ticamība ir 95%, atkarībā no pieliktās relatīvās deformācijas un materiāla īpašībām

5.2. The Asphalt Institute noguruma modelis

The Asphalt Institute (AI) modelis tika izstrādāts 1991. gadā. Tas ir šāds:

$$N_f = 0.00432 C (\epsilon_t)^{-3.291} (E)^{-0.854}, \quad (13)$$

kur:

$$C = 10M \text{ un } M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right);$$

N_f ir slodzes ciklu skaits līdz sabrukumam, ko definē kā brīdi, kad noguruma plaisas pārklāj vismaz 20% no kopējā seguma laukuma;

ϵ_t ir relatīvā stiepes deformācija asfalta apakšējā slānī;

E ir elastības modulis (psi);

C ir korekcijas faktors, kas ievērtē asfalta maisījuma īpašības;

V_a un V_b ir attiecīgi gaisa poru daudzums (%) un bitumena saturs (%).

Piemēram, asfaltbetona maisījumam ar 5% gaisa porām un 11% bitumena saturu (pēc tilpuma) A_I vienādojums (13) reducējas uz:

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291} (E)^{-0.854} \quad (14)$$

Beļģijas Ceļu pētniecības centra (*Belgian Road Research Center*) vienādojums ir:

$$N_f = 4.92 \cdot 10^{-14} (\epsilon_t)^{-4.76} \quad (15)$$

Ilinoisas procedūras (*Illinois procedure*) noguruma vienādojums ir:

$$N_f = 5.0 \cdot 10^{-6} (\epsilon_t)^{-3.0}, \quad (16)$$

kur N_f ir slodzes atkārtojumu skaits līdz sabrukumam (definēts kā plaisāšanas sākums).

6. Eksperimentālā daļa

6.1. SMA 11 un AC 11 sastāvu projektēšana un testēšana

6.1.1. Bitumens

Lai novērtētu bitumena ietekmi uz noguruma plaisu veidošanos, SMA 11 un AC 11 sastāvu projektēšanai izvēlēts ceļu bitumens B50/70 un modificētais bitumens PMB 45/80-55. Bitumenu pamatīpašību testēšanas rezultāti apkopoti 6. un 7. tabulā. Tā kā viens no galvenajiem šī pētījuma mērķiem novērtēt nofrēzētā asfaltbetona (RAP) ietekmi uz nogurumizturību, šajā etapā tika novērtēta nemodificētā "svaigā" bitumena un RAP bitumena dažādās proporcijās ietekme uz bitumena pamatīpašībām, kas turpmāk tiks ņemtas vērā, projektējot asfaltbetona sastāvus ar dažādu RAP saturu.

6. tabula Ceļu bitumena B50/70 testēšanas rezultāti

Īpašība	Testēšanas metode	Mērv.	Prasība	"Svaigā" bitumena aizvietošana ar RAP bitumenu, %				
				0%	10%	25%	50%	100%
Penetrācija 25 °C	EN 1426	0,1 mm	50 – 70	62	60	59	47	31
Mīkstēšanas temperatūra	EN 1427	°C	46 – 54	48	48	49	53	64
Frasa trausluma temperatūra	EN 12593	°C	NR	– 17	– 15	– 13	– 10	– 7
Pēc LVS EN 12591 atbilst bitumena tipam B50/70								

7. tabula Modificētā bitumena PMB 45/80-55 testēšanas rezultāti

Īpašība		Testēšanas metode	Mērvienība	Rezultāts
Penetrācija 25 °C		EN 1426	0,1 mm	55,0
Mīkstēšanas temperatūra		EN 1427	°C	68
Frasa trausluma temperatūra		EN 12593	°C	– 19,0
Elastīgā atjaunošanās +25 °C		EN 13398	%	87,0
Cietējumpretestība EN 12607-1	Masas izmaiņa	EN 12607-1	%	0,02
	Paliekošā penetrācija	EN 12607-1 EN 1426	%	72
	Mīkstēšanas temperatūras palielinājums	EN 12607-1 EN 1427	°C	5,1
Uzglabāšanas stabilitāte	Mīkstēšanas temperatūras atšķirība	EN 13399 EN 1427	°C	2,3
	Penetrācija 25 °C, atšķirība	EN 13399 EN 1426	0,1 mm	9,0

6.1.2. Minerālmateriāli

8. tabula Izmantotie minerālmateriāli

Nosaukums	Frakcija	Daudzums, %	
		SMA 11	AC 11
Granīta atsijas	0/2	10	28
Granīta šķembas	2/5	10	25
	5/8	50	20
	8/11	20	17
	11/16	-	
Aizpildītājs – dolomīta milti		10	8

Asfaltbetona sastāvu projektēšanai izvēlētas dažādu frakciju magmatiskas izcelsmes granīta šķembas. Noteiktas frakciju proporcijas, kuras iekļaujas AC 11 un SMA 11 granulometrisko līkņu minimālajās un maksimālajās robežās (skat. 8. tab.), kā arī izvēlētajam minerālmateriālam noteiktas galvenās īpašības un veikts rezultātu novērtējums atbilstoši “Ceļu specifikāciju 2019” prasībām (skat. 9. tab.). Noteikts, ka izvēlēta minerālmateriāla fizikālās un mehāniskās īpašības atbilstoši “Ceļu specifikāciju 2019” prasībām atbilst augstākajai, S-I kategorijai.

9. tabula Minerālmateriālu fizikālās un mehāniskās īpašības

Nosakāmais parametrs	Standarts	Rezultāts	"Ceļu specifikācijas 2019" prasības	
			S-I	Atbilstoši
Losandželosas koeficients (<i>LA</i>), %	LVS EN 1097-2	16	LA20	6.2-7 tab.
Nordiskā abrazīvā vērtība (<i>AN</i>), %	LVS EN 1097-9	7	≤ 10	6.2-7 tab.
Plūšanas koeficients (<i>Ecs</i>), s	LVS EN 933-6	34	≥ 30	6.2-6 tab.
Ūdens absorbcija (<i>WA</i>), %	LVS EN 1097-6	0,1	≤ 1	6.2-7 tab.
Plāksņainības indekss (<i>FI</i>), %	LVS NE 933-3	9	≤ 20	6.2-7 tab.
Magnija sulfāta rādītājs (<i>MS</i>), %	LVS EN 1367-2	1	≤ 18	6.2-7 tab.
Metilēnzilā vērtība (<i>MB</i>), g/kg	LVS EN 933-9	0,5	≤ 10	6.2-5 tab.

6.1.3. Sastāvu fizikālās un mehāniskās īpašības

Asfaltbetona sastāvu projektēšana veikta, lai izpildītu "Ceļu specifikāciju 2019" reglamentētās bitumena daudzuma (*SMA 11* – B_{min} 6,2 un *AC 11* – B_{min} 5,4) un sablīvējuma robežas (*SMA 11* – V_{min} 2 līdz V_{max} 4,5 un *AC 11* – V_{min} 1,5 līdz V_{max} 4,0). 10. tabulā apkopotas asfaltbetona sastāvu galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības.

10. tabula *SMA 11* un *AC 11* maisījumu galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības

Sastāvs	Saistviela	Saistvielas saturs, masas %	Porainība, tilpuma %	Maršala stabilitāte, kN	Maršala plūstamība, mm
<i>SMA 11</i>	B50/70	5,9	3,1	7,4	2,7
	PMB 45/80-55	5,9	2,7	6,9	3,0
<i>AC 11</i>	B50/70	5,2	2,4	8,2	2,5
	PMB 45/80-55	5,2	2,2	7,7	2,7

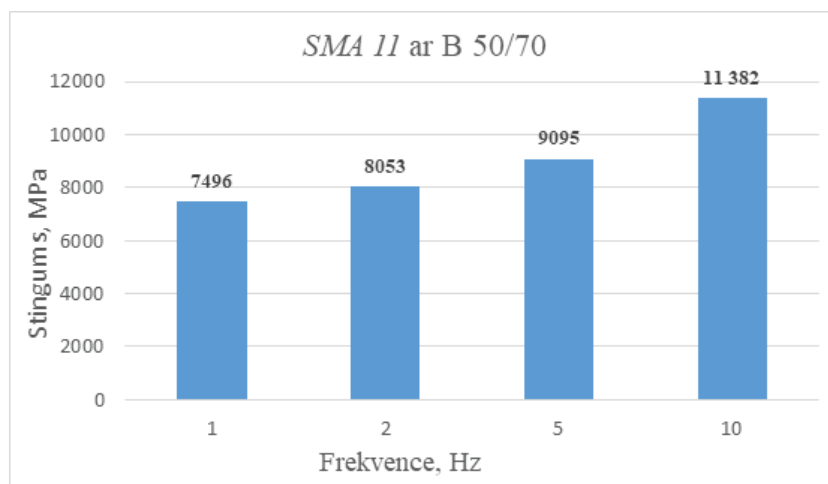
6.1.4. *AC 11* un *SMA 11* sastāvu stingums

Stinguma noteikšana veikta atbilstoši LVS EN 12697-26 standartam ar četru punktu lieces testēšanas iekārtu. Testa veikšanai tika izgatavotas sijas ar izmēriem 50×50×410 mm. Stinguma noteikšana veikta 10 °C temperatūrā pie standarta deformācijas amplitūdas 50 μm/m (*microstrains*), bet dažādām frekvencēm (simulējot automobiļu braukšanas ātrumu). Iegūtie rezultāti apkopoti 25. – 33. attēlā, kā arī 11. – 14. tabulā. Analizējot šos rezultātus, konstatēts, kā asfaltbetona tips, izvēlēta saistviela un sloģošanas frekvence

ietekmē stinguma rādītājus. Palielinoties slogošanas frekvencei, palielinās stingums gan SMA, gan AC asfaltbetona sastāviem. SMA sastāviem salīdzinājumā ar AC sastāviem ir nedaudz augstāki stinguma rādītāji visām slogošanas frekvencēm. Sastāviem ar nemodificēto bitumenu ir augstāki stinguma rādītāji nekā sastāviem, kuriem izmantots ar elastomēriem modificētais bitumens, kas izskaidrojams ar modificētā bitumena elastīgajām īpašībām zemā temperatūrā (elastības modulis modificētajam bitumenam ir mazāks nekā elastības modulis nemodificētajam bitumenam, t. i., sastāvi ar nemodificēto bitumenu ir trauslāki).

11. tabula SMA 11 maisījumu ar B 50/70 stinguma rādītāji 10 °C temperatūrā

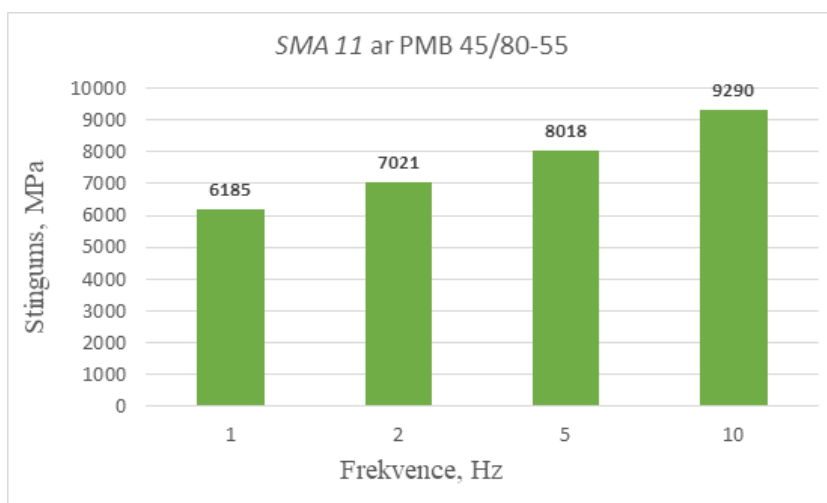
Stinguma modulis, MPa			
Frekvence, Hz			
1	2	5	10
7455	8273	9743	11 340
7792	7864	8887	10 975
7241	8023	8654	11 832
Vid.			
7455	8053	9095	11 382



25. att. SMA 11 maisījuma ar B 50/70 stinguma maiņa atkarībā no frekvences 10 °C temperatūrā

12. tabula SMA 11 maisījumu ar PMB 45/80-55 stinguma rādītāji 10 °C temperatūrā

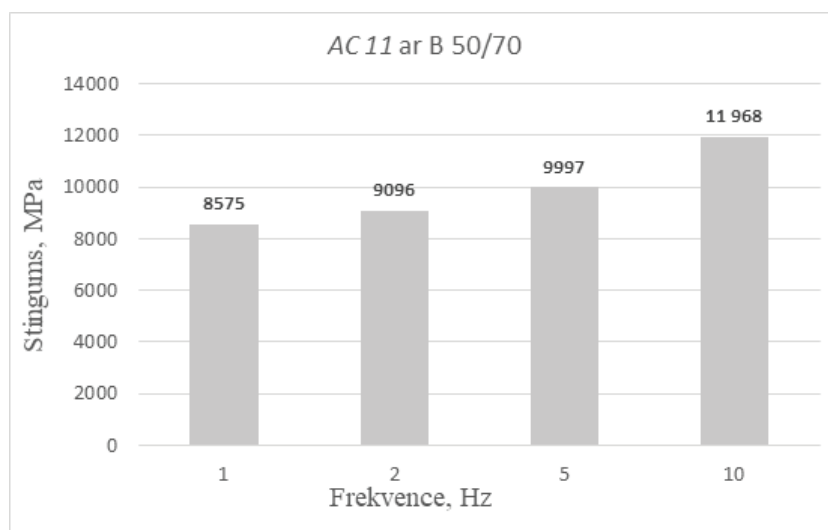
Stinguma modulis, MPa			
Frekvence, Hz			
1	2	5	10
5986	6987	8232	9987
6244	7321	7993	9128
6327	6754	7828	8756
Vid.			
6185	7021	8018	9290



26. att. SMA 11 maisījuma ar PMB 45/80-55 stinguma maiņa atkarībā no frekvences 10 °C temperatūrā

13. tabula AC 11 maisījumu ar B 50/70 stinguma rādītāji 10 °C temperatūrā

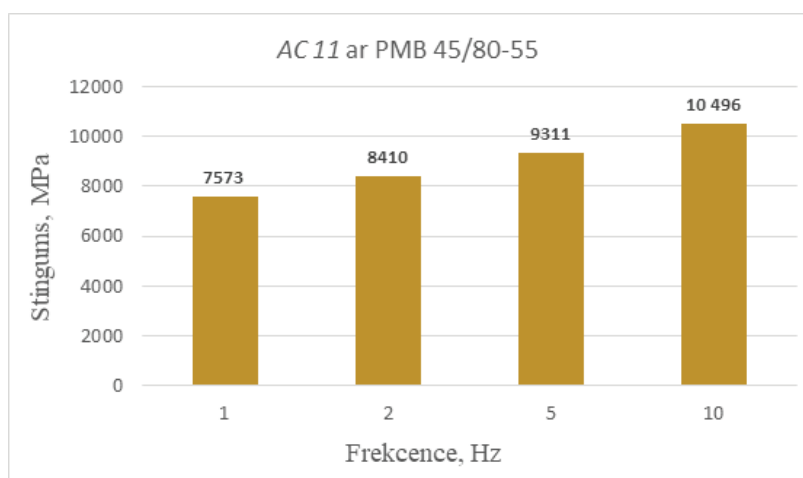
Stinguma modulis, MPa			
Frekvence, Hz			
1	2	5	10
9036	9453	10 354	11 997
8745	9081	9852	12 342
7945	8754	9786	11 564
Vid.			
8575	9096	9997	11 968



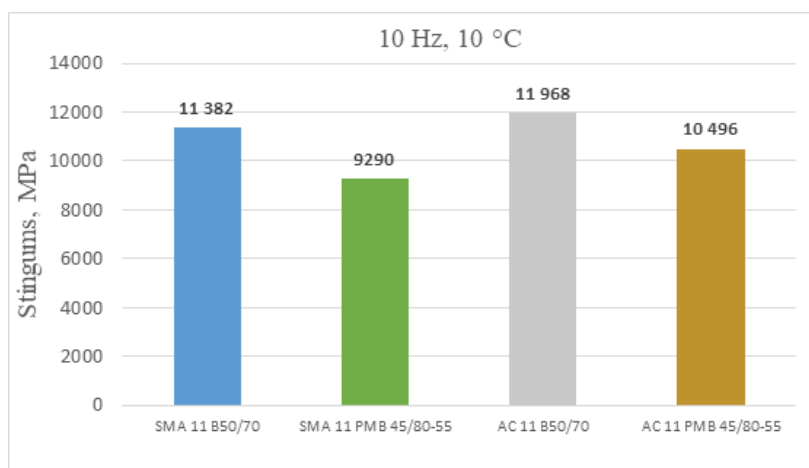
27. att. AC 11 maisījuma ar B 50/70 stinguma maiņa atkarībā no frekvences 10 °C temperatūrā

14. tabula AC 11 maisījumu ar PMB 45/80-55 stinguma rādītāji 10 °C temperatūrā

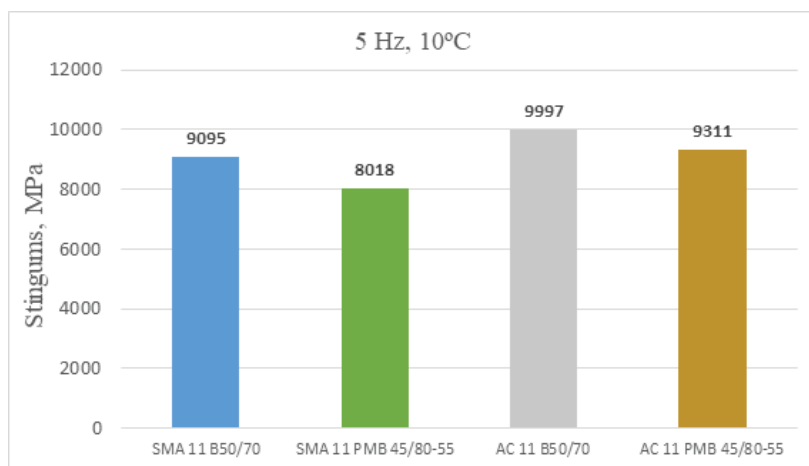
Stinguma modulis, MPa			
Frekvence, Hz			
1	2	5	10
7845	8437	9376	10 736
7112	8843	8903	11 008
7761	7951	9655	9745
Vid.			
7573	8410	9311	10 496



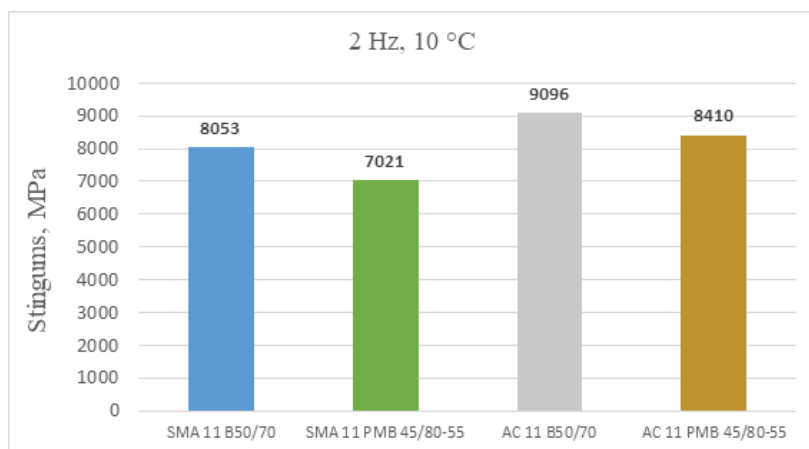
28. att. AC 11 maisījuma ar PMB 45/80-55 stinguma maiņa atkarībā no frekvences 10 °C temperatūrā



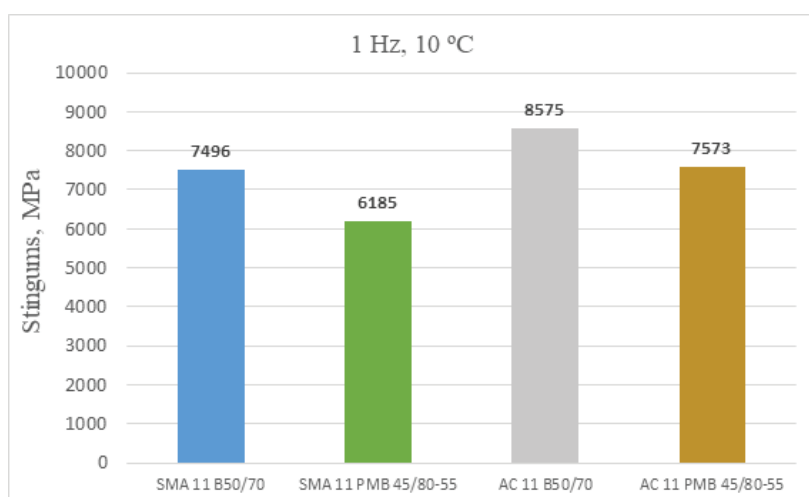
29. att. Stinguma maiņas dinamika atkarībā no izmantotā bitumena un asfaltbetona tipa, sloģošanas frekvence 10 Hz, 10 °C temperatūrā



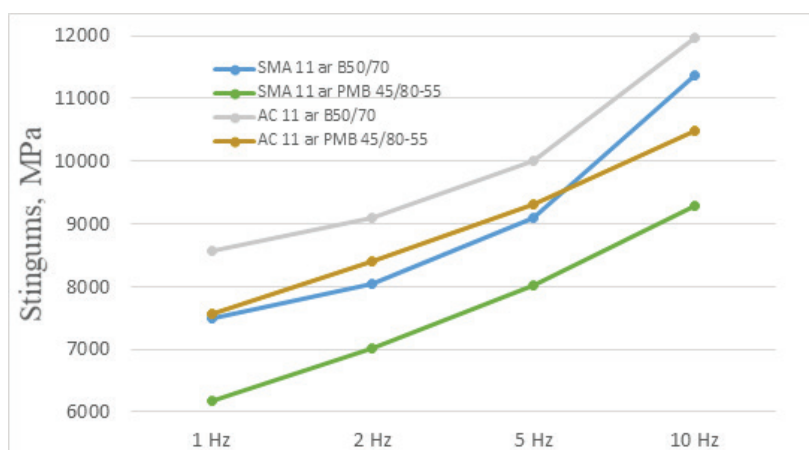
30. att. Stinguma maiņas dinamika atkarībā no izmantotā bitumena un asfaltbetona tipa, sloģošanas frekvence 5 Hz, 10 °C temperatūrā



31. att. Stinguma maiņas dinamika atkarībā no izmantotā bitumena un asfaltbetona tipa, sloģošanas frekvence 2 Hz, 10 °C temperatūrā



32. att. Stinguma maiņas dinamika atkarībā no izmantotā bitumena un asfaltbetona tipa, sloģošanas frekvence 1 Hz, 10 °C temperatūrā



33. att. Stinguma maiņas dinamika atkarībā no asfaltbetona tipa, izmantotā bitumena un sloģošanas frekvences 10 °C temperatūrā

6.2. HMAC sastāvu ar RAP projektēšana un testēšana

6.2.1. Bitumens

Šajā pētījuma etapā RAP ietekme uz asfaltbetona stingumu un nogurumizturību novērtēta, balstoties uz HMAC sastāvu testēšanas rezultātiem, kuri tika projektēti 2. pētījuma kārtā. HMAC sastāvu projektēšanai izvēlēts ceļu bitumens B20/30 un polimērmodificētais bitumens ORBITON PMB 25/55-80 HiMA. "Svaigā" un RAP bitumena testēšanas rezultāti apkopoti 15. tabulā.

15. tabula "Svaigā" un RAP bitumena pamatīpašības

Īpašība	Testēšanas metode	Mērv.	Prasība		Rezultāts		
			20/30	ORBITON 25/55-80 HiMA	B 20/30	ORBITON 25/55-80 HiMA	RAP bitumens
Penetrācija 25 °C	EN 1426	0,1 mm	20 – 30	25 – 55	30	45	23
Mīkstēšanas temperatūra	EN 1427	°C	55 – 63	≥ 80	60	89,5	62
Frasa trausluma temperatūra	EN 12593	°C	NR	≤ – 15	– 5	– 15	– 5

16. tabulā apkopti bitumena B20/30 un RAP bitumena maisījumu (RAP bitumena saturs 0, 25, 50,9 un 71,9%) rezultāti. Bitumenu savienošanas mērķis ir atrast optimālo proporciju starp "svaigo" un RAP bitumenu, kas apmierinātu bitumenam B20/30 izvirzītās prasības.

16. tabula Bitumenu maisījumu B20/30 un RAP testēšanas rezultāti

Īpašība	Testēšanas metode	Mērv.	Prasība 20/30	"Svaigā" bitumena aizvietošana ar RAP bitumenu, %			
				0	25	50,9	71,9
Penetrācija 25 °C	EN 1426	0,1 mm	20 – 30	22	21	20	17
Mīkstēšanas temperatūra	EN 1427	°C	55 – 63	73	73	74	77
Frasa trausluma temperatūra	EN 12593	°C	NR	– 5	– 5	– 5	– 2,5

17. tabulā apkopti bitumena PMB 25/55-80 un RAP bitumena maisījumu (RAP bitumena saturs 0, 25, 50,9 un 71,9%) rezultāti. Bitumenu savienošanas mērķis ir atrast optimālo proporciju starp "svaigo" PMB bitumenu un RAP bitumenu, kas apmierinātu bitumenam PMB 25/55-80 izvirzītās prasības.

17. tabula Bitumenu maisījumu B20/30 un RAP testēšanas rezultāti

Īpašība	Testēšanas metode	Mērv.	Prasība 20/30	"Svaigā" bitumena aizvietošana ar RAP bitumenu, %			
				0	25	50,9	71,9
Penetrācija 25 °C	EN 1426	0,1 mm	25 – 55	44	26	20	20
Mīkstēšanas temperatūra	EN 1427	°C	≥ 80	≥ 80	≥ 80	≥ 80	75
Frasa trausluma temperatūra	EN 12593	°C	≤ – 15	– 14	– 10	– 6	– 7

6.2.2. HMAC sastāvs

18. tabulā parādīta izejmateriālu proporcija HMAC sastāvu projektēšanai. HMAC sastāvu izstrāde veikta, izmantojot šādas izcelsmes un frakciju minerālmateriālus: drupinātā smilts (0/5), granīta šķembas (0/5, 5/8, 8/11 un 11/16), RAP (0/8) un dolomīta milti.

18. tabula HMAC sastāvi

Nosaukums	Frakcija	Daudzums, %			
		1.	2.	3.	4.
RAP	0/8	0	25	50	75
Drupinātā smilts	0/5	17,1	13,3	3,8	-
Granīta šķembas	0/5	30,5	16,2	9,5	-
	5/8	15,2	15,2	8,6	9,5
	8/11	5,7	1,9	3,8	-
	11/16	21,0	20,9	19,0	19,1
Aizpildītājs – dolomīta milti		5,7	2,9	-	-
Bitumens					
(B20/30 vai PMB 25/55-80)		4,8	3,6	2,4	1,3
RAP Bitumens		0	1,2	2,4	3,2
Kopā	100	100	100	100	

HMAC asfaltbetona sastāvu projektēšana veikta, lai izpildītu SPENS (Sustainable Pavements for European New member States) specifikācijās reglamentētās bitumena daudzuma ($B_{\min}$ 4,8) un sablīvējuma robežas ($V_{\min}$ 2 – $V_{\max}$ 4,0). 19. tabulā apkopoti HMAC asfaltbetona sastāvu galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības.

19. tabula *HMAC* sastāvu galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības

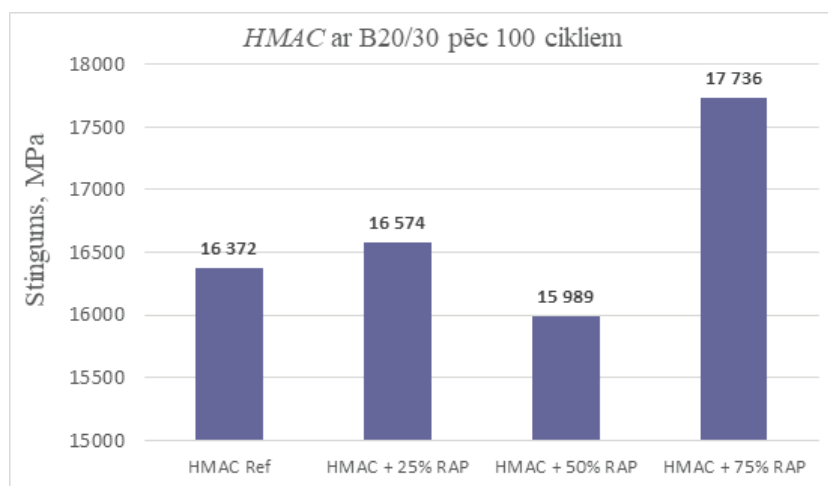
Sastāvs	Saistviela	Saistvielas saturs	Porainība	Maršala stabilitāte	Maršala plūstamība
<i>HMAC Ref</i>	B20/30	4,5	2,3	19,2	3,0
<i>HMAC + 25% RAP</i>	B20/30 + <i>RAP</i> bitumens	4,8	2,2	19,5	3,1
<i>HMAC + 50% RAP</i>		4,7	1,9	20,4	2,2
<i>HMAC + 75% RAP</i>		4,9	2,2	22,2	2,0
<i>PMB HMAC Ref</i>	PMB 25/55-80	4,7	2,6	21,0	3,7
<i>PMB HMAC + 25% RAP</i>	PMB 25/55-80 + <i>RAP</i> bitumens	4,6	2,0	21,6	3,3
<i>PMB HMAC + 50% RAP</i>		4,6	2,3	21,4	2,1
<i>PMB HMAC + 75% RAP</i>		4,7	2,4	21,6	2,2

6.2.3. *HMAC* sastāvu stingums

Stinguma noteikšana veikta atbilstoši standarta LVS EN 12697-26 prasībām ar četru punktu lieces testu 10 °C temperatūrā ar sloģošanas frekvenci 10 Hz un 50 µm/m lieces deformāciju. 20. tabulā doti stinguma rezultāti pēc 100 sloģošanas cikliem *HMAC* ar B20/30 atkarībā no *RAP* satura. Pieaugot *RAP* saturam, stingums pieaug (izņemot sastāvam ar 50% *RAP*). Straujāks stinguma pieaugums novērojams sastāvam ar 75% *RAP* saturu (skat. 20. tab. un 34. att.).

20. tabula *HMAC* ar B20/30 stinguma rādītāji
(10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 100 sloģošanas cikliem

Stinguma modulis, MPa			
<i>HMAC Ref</i>	<i>HMAC + 25% RAP</i>	<i>HMAC + 50% RAP</i>	<i>HMAC + 75% RAP</i>
16 218	16 051	15 941	16 950
15 468	17 298	16 507	17 101
17 430	16 372	15 521	19 158
Vid.			
16 372	16 574	15 989	17 736

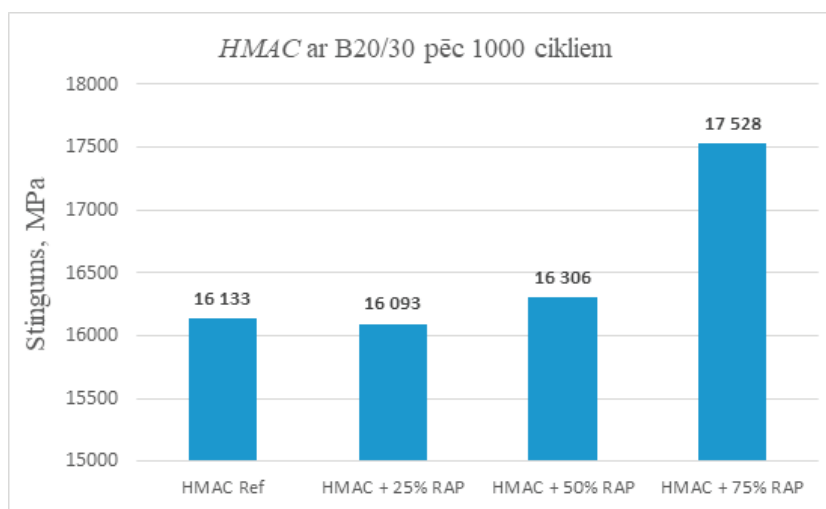


34. att. HMAC ar B20/30 stinguma maiņas dinamika (10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 100 sloģošanas cikliem atkarībā no RAP satura

21. tabulā un 35. attēlā ir doti stinguma rezultāti pēc 1000 sloģošanas cikliem HMAC ar B20/30 atkarībā no RAP satura. Svarīgi atzīmēt, ka šajā etapā HMAC ar 50% RAP stinguma vērtība stabilizējas. Rezultāti rāda, ka līdz 50% RAP stinguma izmaiņas ir nelielas, bet, palielinot RAP līdz 75%, novērojams straujāks stinguma palielinājums (līdzīgi kā pēc 100 cikliem).

21. tabula HMAC ar B20/30 stinguma rādītāji
(10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 1000 sloģošanas cikliem

Stinguma modulis, MPa			
<i>HMAC Ref</i>	<i>HMAC + 25% RAP</i>	<i>HMAC + 50% RAP</i>	<i>HMAC + 75% RAP</i>
16 167	15 964	16 216	16 805
15 325	16 108	16 530	16 664
16 908	16 207	16 173	19 114
Vid.			
16 133	16 093	16306	17 528

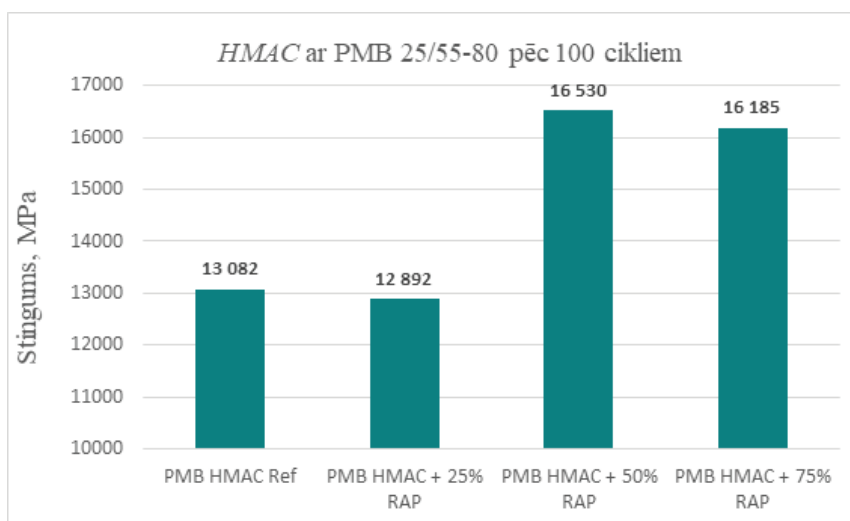


35. att. *HMAC* ar B20/30 stinguma izmaiņas dinamika
(10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 1000 slogošanas cikliem atkarībā no *RAP* satura

Analizējot *HMAC* ar PMB un dažādu *RAP* saturu stinguma rezultātus, konstatēts, ka PMB *HMAC Ref* un PMB *HMAC + 25% RAP* nesasniedz *SPENS* specifikāciju reglamentēto stinguma robežu 14 000 MPa. Tomēr, pieaugot *RAP* saturam līdz 50% un 75%, stingums strauji palielinās un *HMAC* ar PMB un *RAP* 50% un 75% sasniedz *SPENS* specifikāciju reglamentēto robežu (skat. 22. – 23.tab. un 36. – 37.att.).

22. tabula *HMAC* ar PMB 25/55-80 stinguma rādītāji
(10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 100 slogošanas cikliem

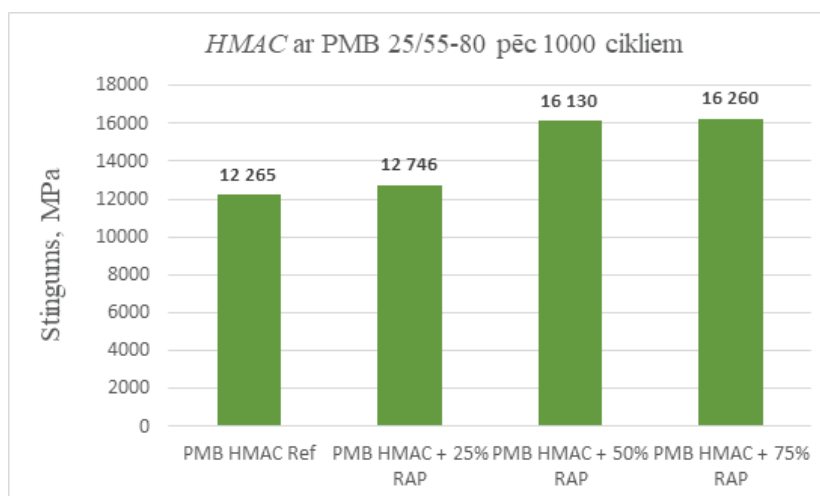
Stinguma modulis, MPa			
<i>PMB HMAC Ref</i>	<i>PMB HMAC + 25% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 50% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 75% RAP</i>
14 735	17 235	17 063	15 832
13 014	12 836	16 300	15 194
11 499	12 948	16 228	17 529
Vid.			
13 082	12 892	16 530	16 185



36. att. HMAC ar PMB 25/55-80 stinguma maiņas dinamika (10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 100 sloģšanas cikliem atkarībā no RAP satura

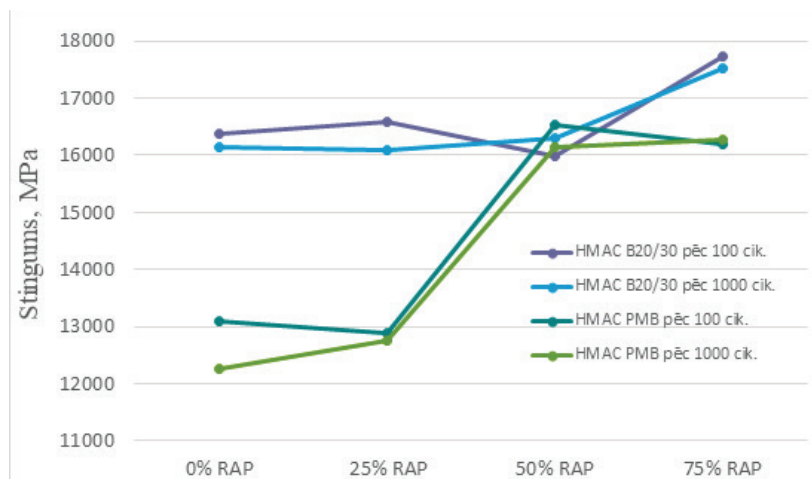
23. tabula HMAC ar PMB 25/55-80 stinguma rādītāji (10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 1000 sloģšanas cikliem

Stinguma modulis, MPa			
<i>PMB HMAC Ref</i>	<i>PMB HMAC + 25% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 50% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 75% RAP</i>
12 411	17 355	16 552	15 746
12 426	12 633	16 239	16 027
11 959	12 859	15 600	17 008
Vid.			
12 265	12 746	16 130	16 260



37. att. HMAC ar PMB 25/55-80 stinguma maiņas dinamika (10 °C, 10 Hz, 50 µm/m) pēc 1000 sloģšanas cikliem atkarībā no RAP satura

Stinguma rezultātiem, kas noteikti pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem, ir līdzīga tendence – straujš stinguma pieaugums, ja *RAP* saturs ir 50 un 75%. *HMAC* ar B20/30 un *RAP* saturu 0 un 25% piemīt ievērojami lielāks stingums nekā *HMAC* ar PMB un *RAP* saturu 0 un 25%. Savukārt *HMAC* sastāviem ar B20/30 un PMB ir līdzīgs stingums, ja *RAP* ir 50%, bet, ja *RAP* ir 75%, lielāka stinguma vērtība ir *HMAC* sastāviem ar B20/30 (skat. 38. att.).



38. att. Stinguma maiņas dinamika dažādiem *HMAC* sastāviem (10 °C, 10 Hz, 50 μm/m) atkarībā no slogošanas ciklu skaita, bitumena tipa un *RAP* satura

6.2.4. *HMAC* sastāvu nogurumizturība

Nogurumizturības noteikšana veikta atbilstoši standarta LVS EN 12697-24 prasībām ar četru punktu lieces testu 10 °C temperatūrā un slogošanas frekvenci 10 Hz pie dažādām lieces deformācijām – no 100 līdz 400 μm/m. Par nogurumizturības rādītāju pieņemts slogošanas ciklu skaits pie izvēlētās deformācijas līdz 50% stinguma samazinājumam. 24. tabulā doti nogurumizturības rezultāti *HMAC* ar B20/30. Rezultāti rāda, ka pie nelielām deformācijām (100 – 200 μm/m), palielinoties *RAP* saturam, nogurumizturība samazinās, savukārt, ja deformācija ir 300 μm/m, nogurumizturības samazinājums nav tik izteikts (skat. 41. att.).

24. tabula *HMAC* ar B20/30 nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)

Parauga ieliece, μm/m (microstrains)	Slogošanas ciklu skaits līdz 50% stinguma samazinājumam			
	<i>HMAC</i> Ref	<i>HMAC</i> + 25% <i>RAP</i>	<i>HMAC</i> + 50% <i>RAP</i>	<i>HMAC</i> + 75% <i>RAP</i>
100	-	-	-	2,30·10 ⁷
125	5,15·10 ⁶	4,93·10 ⁶	2,31·10 ⁶	1,14·10 ⁶
150	6,80·10 ⁵	4,76·10 ⁵	3,42·10 ⁵	-
200	3,58·10 ⁵	2,35·10 ⁵	1,50·10 ⁵	1,32·10 ⁵
250	-	-	-	-
300	2,92·10 ⁴	1,70·10 ⁴	1,95·10 ⁴	2,05·10 ⁴

25. tabulā doti nogurumizturības rezultāti *HMAC* ar *PMB 25/50-85*. Šiem sastāviem ir ievērojami lielāka nogurumizturība nekā *HMAC* sastāviem ar *B20/30*, jo līdzīgos testēšanas apstākļos šiem sastāviem nogurums iestājas pēc daudz lielāka laika, t. i., pēc daudz lielāka sloģošanas ciklu skaita. Rezultāti rāda, ka, palielinoties *RAP* saturam, nogurumizturība samazinās (skat. 42. att.).

Atbilstoši standartam LVS EN 13108-1 nogurumizturības kategorijas ir no ϵ_6 -50 līdz ϵ_6 -310. 26. tabulā dotas no iegūtajiem rezultātiem (skat. 39. un 40. att.) aprēķinātās nogurumizturības kategorijas. Atbilstoši *SPENS* specifikāciju prasībām, nogurumizturībai jābūt ne mazākai par ϵ_6 -130.

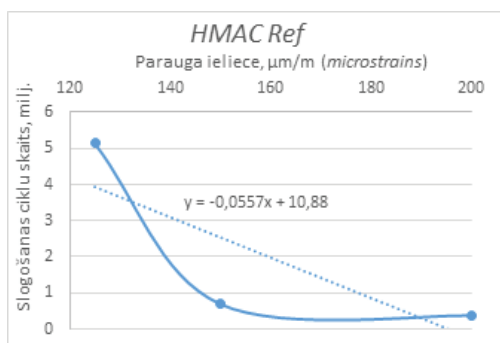
25. tabula *HMAC* ar *PMB 25/55-80* nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)

Parauga ieliece, $\mu\text{m/m}$ (microstrains)	Sloģošanas ciklu skaits līdz 50% stinguma samazinājumam			
	<i>PMB HMAC Ref</i>	<i>PMB HMAC + 25% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 50% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 75% RAP</i>
125	-	-	-	2,63·10 ⁶
150	-	2,68·10 ⁶	6,05·10 ⁶	4,63·10 ⁵
200	-	2,04·10 ⁶	4,13·10 ⁵	1,70·10 ⁵
250	1,27·10 ⁶	5,85·10 ⁵	3,06·10 ⁵	-
300	2,84·10 ⁵	1,07·10 ⁵	4,14·10 ⁴	1,11·10 ⁴
350	1,46·10 ⁵	-	-	-
400	6,87·10 ⁴	-	-	-

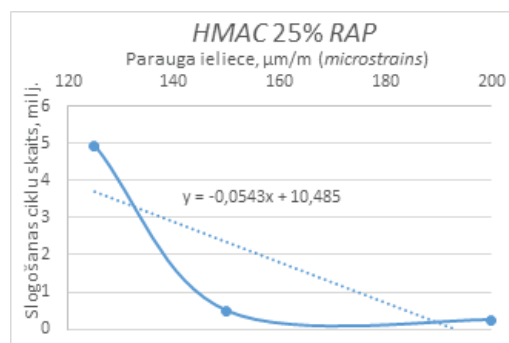
26. tabula Aprēķinātās nogurumizturības kategorijas atbilstoši LVS NE 13108-1 (10 °C, 10 Hz)

Nogurumizturības kategorija ϵ_6			
<i>HMAC Ref</i>	<i>HMAC + 25% RAP</i>	<i>HMAC + 50% RAP</i>	<i>HMAC + 75% RAP</i>
177,38	174,68	155,93	255,18
<i>PMB HMAC Ref</i>	<i>PMB HMAC + 25% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 50% RAP</i>	<i>PMB HMAC + 75% RAP</i>
249,92	244,88	244,14	254,33
<i>SPENS</i> ϵ_6 -130		Atbilst –	
		Neatbilst –	
		Apšaubāma –	

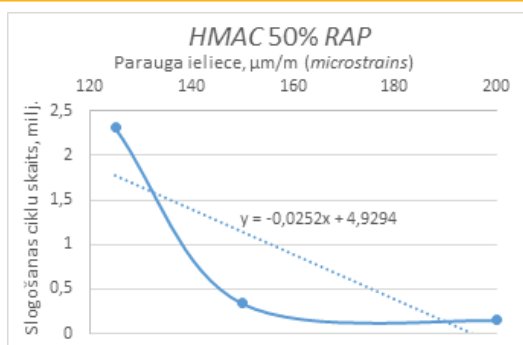
a)



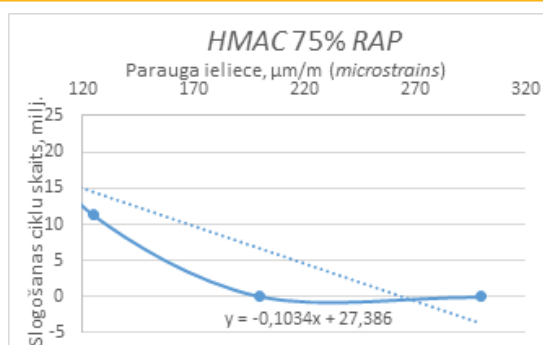
b)



c)

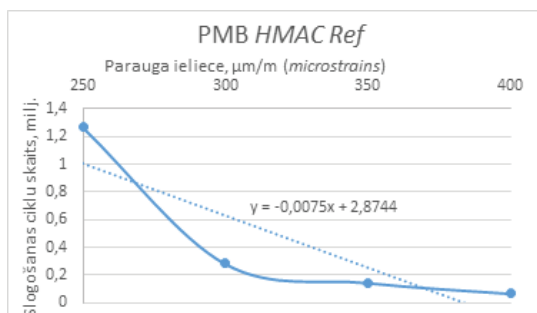


d)

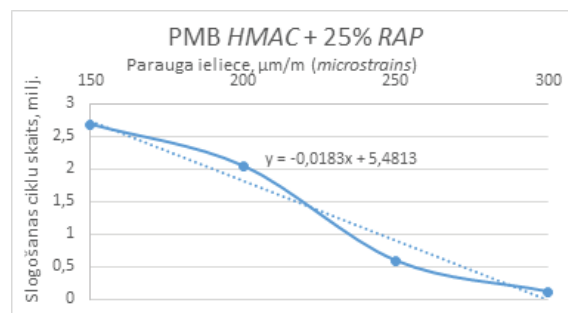


39. att. Nogurumizturības līknes: a) *HMAc Ref* ar B20/30; b) *HMAc* ar B20/30 + 25% *RAP*; c) *HMAc* ar B20/30 + 50% *RAP*; d) *HMAc* ar B20/30 + 75% *RAP*

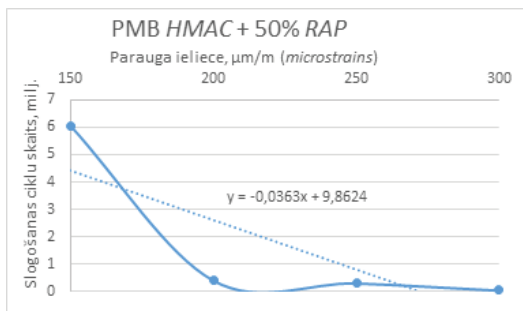
a)



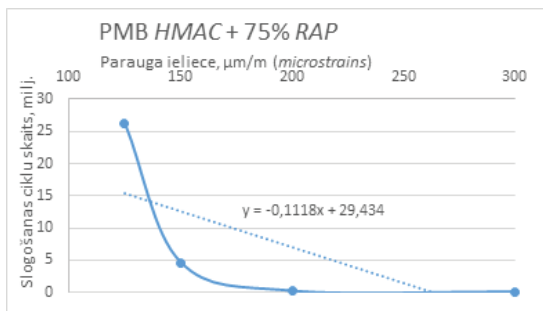
b)



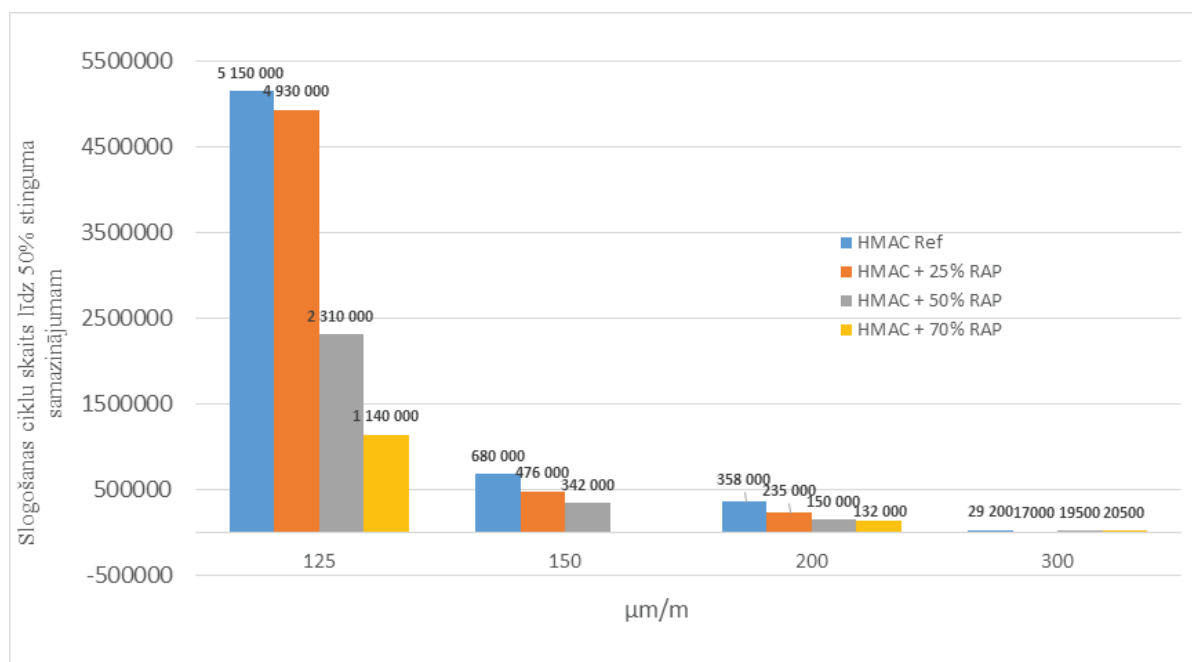
c)



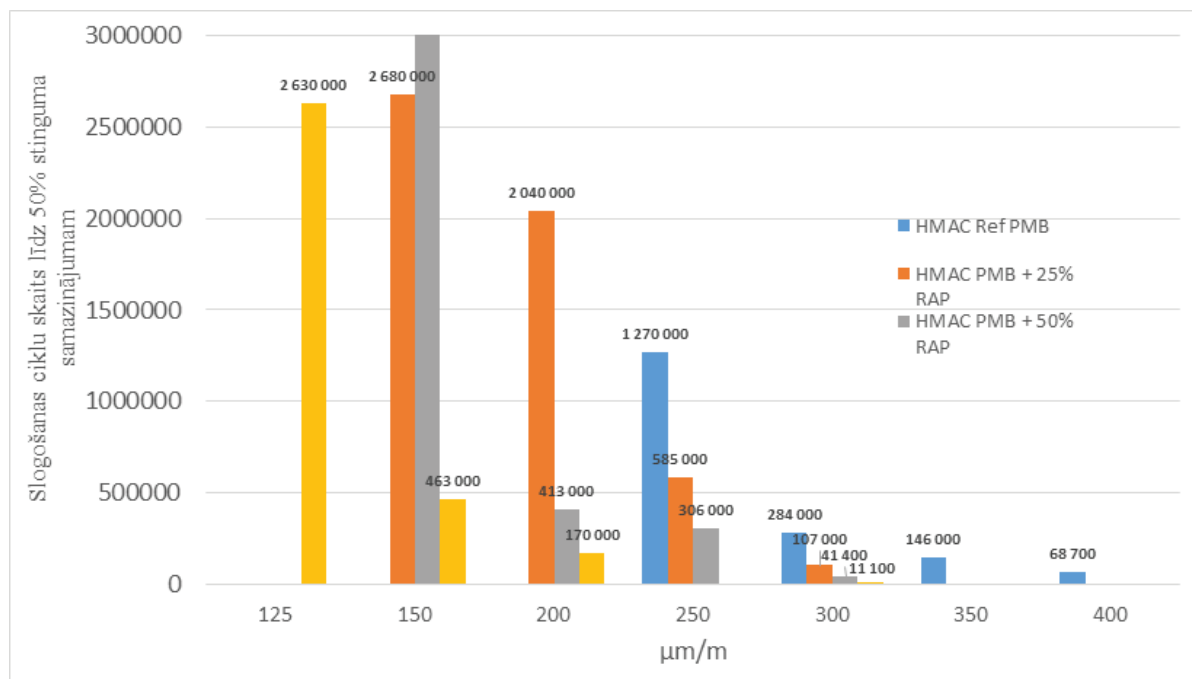
d)



40. att. Nogurumizturības līknes: a) *HMAc Ref* ar PMB; b) *HMAc* ar PMB + 25% *RAP*; c) *HMAc* ar PMB + 50% *RAP*; d) *HMAc* ar PMB + 75% *RAP*



41. att. Nogurumizturības maiņas dinamika *HMAC* sastāviem ar B20/30 (10 °C, 10 Hz) atkarībā no ielieces un *RAP* satura



42. att. Nogurumizturības maiņas dinamika *HMAC* sastāviem ar PMB 25/55-80 (10 °C, 10 Hz) atkarībā no ielieces un *RAP* satura

6.3. AC_b 22 sastāvu ar RAP un bez tā testēšana

Lai noteiktu RAP, bitumena veida un šķembu stiprības klases ietekmi uz saistkārtas/pamatkārtas asfaltbetona AC_b 22 nogurumizturības īpašībām, veikts sastāvu AC_b 22 ar PMB 45/80-55 un S7 klases šķembām un AC_b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3 klases šķembām nogurumizturības un stinguma īpašību salīdzinājums. 27. un 28. tabulā un 43. attēlā apkopoti iegūtie stinguma rezultāti. AC_b 22 sastāviem ar B70/100, 30% RAP un S3 klases šķembām vidējais stingums pēc 100 cikliem bija 9705 MPa, bet AC_b 22 ar PMB 45/80-55 un S7 klases šķembām – 9238 MPa (starpība ≈ 5%). 29.–31. tabulā un 46. – 47. attēlā redzami nogurumizturības rādītāji, kuri tika izmantoti nogurumizturības kategorijas aprēķinam. Sastāva AC_b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3 nogurumizturības kategorija ir ϵ_6 -138, bet AC_b 22 ar PMB 45/80-55 un S1 – ϵ_6 -190. AC_b 22 ar augstas klases S7 šķembām un polimērmodificētu bitumenu nogurumizturība ir vairāk kā par 25% lielāka (skat. 32. tab.).

27. tabula Sastāvu AC_b 22 ar PMB 45/80-55 un S7 stinguma rādītāji
(10 °C, 10 Hz, 50 μ m/m) pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem

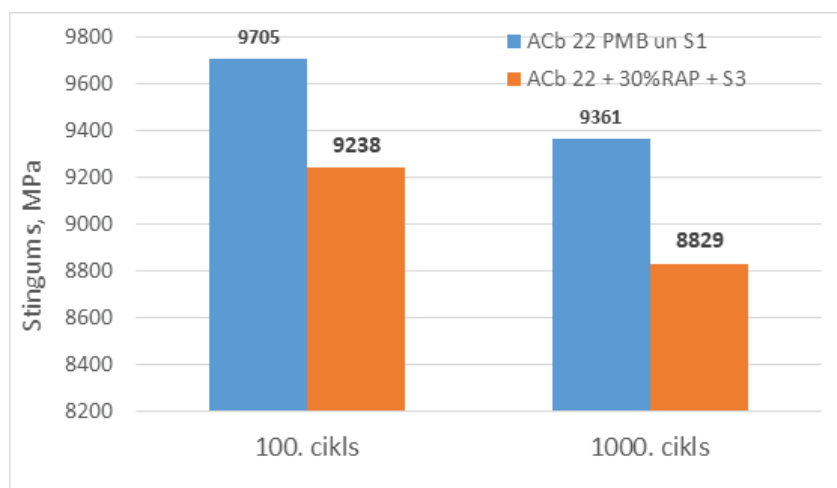
Stinguma modulis, MPa		Tilpum- blīvums, Mg/m ³	Maksimālais blīvums, Mg/m ³	Porainība, %
100. cikls	1000. cikls			
9776	9461	2,387	2,54	6,02
11 163	11 072	2,399		5,55
10 540	10 043	2,397		5,63
10 216	10 033	2,378		6,38
9582	9241	2,392		5,83
8605	8493	2,377		6,42
6878	6524	2,385		6,1
10 878	10 020	2,373		6,57
9705	9361	2,386		6,06

Porainības intervālā no 5,55% līdz 6,57% korelācija starp porainību un stingumu netika konstatēta (skat. 44. att.).

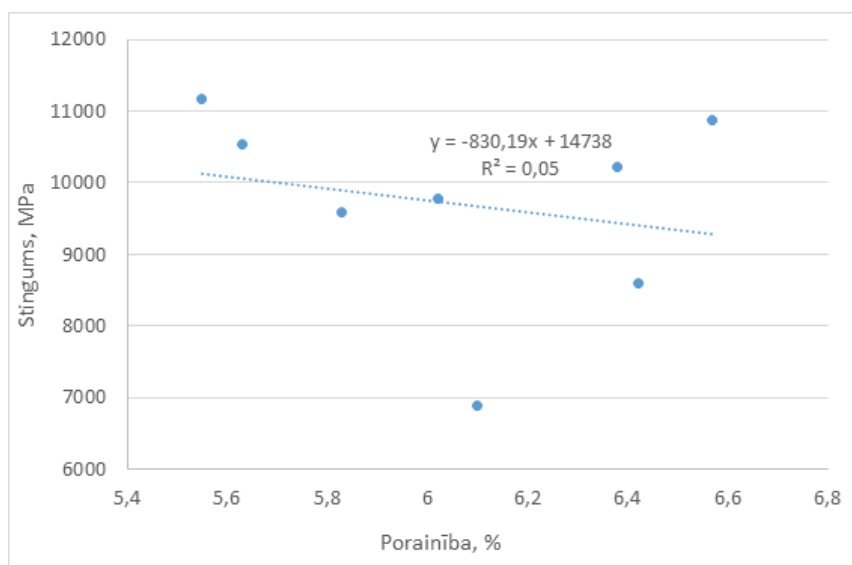
28. tabula Sastāvu AC_b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3 stinguma rādītāji
(10 °C, 10 Hz, 50 μm/m) pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem

Stinguma modulis, MPa		Tilpum- blīvums, Mg/m ³	Maksimālais blīvums, Mg/m ³	Porainība, %
100. cikls	1000. cikls			
7953	8082	2,324	2,435	4,56
9173	8685	2,304		5,38
9519	9321	2,342		3,82
9593	8434	2,351		3,45
9434	9185	2,361		3,04
8183	8021	2,329		4,35
9201	9202	2,346		3,66
8074	7855	2,332		4,23
9259	8881	2,356		3,24
10 010	9698	2,358		3,16
11 590	10 062	2,365		2,88
8872	8520	2,356		3,24
9238	8829	2,344		3,75

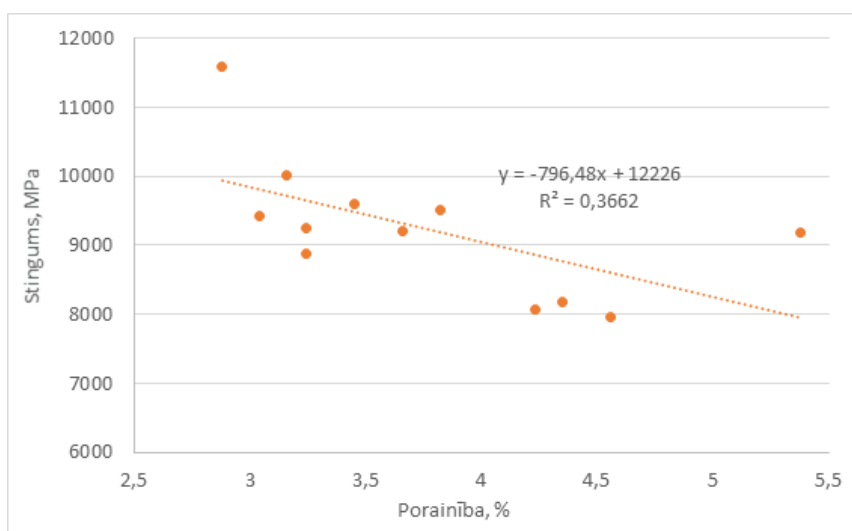
Porainības intervālā no 2,88% līdz 5,38% korelācija starp porainību un stingumu netika konstatēta (skat. 45. att.).



43. att. ACb 22 stinguma rezultāti pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem



44. att. Korelācija starp porainību un stingumu sastāviem ACb 22 ar PMB 45/80-55 un S1 klases šķembām



45. att. Korelācija starp porainību un stingumu sastāviem AC_b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3 klases šķembām

29. tabula Asfaltbetona paraugu AC_b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3 klases šķembām nogurumizturība

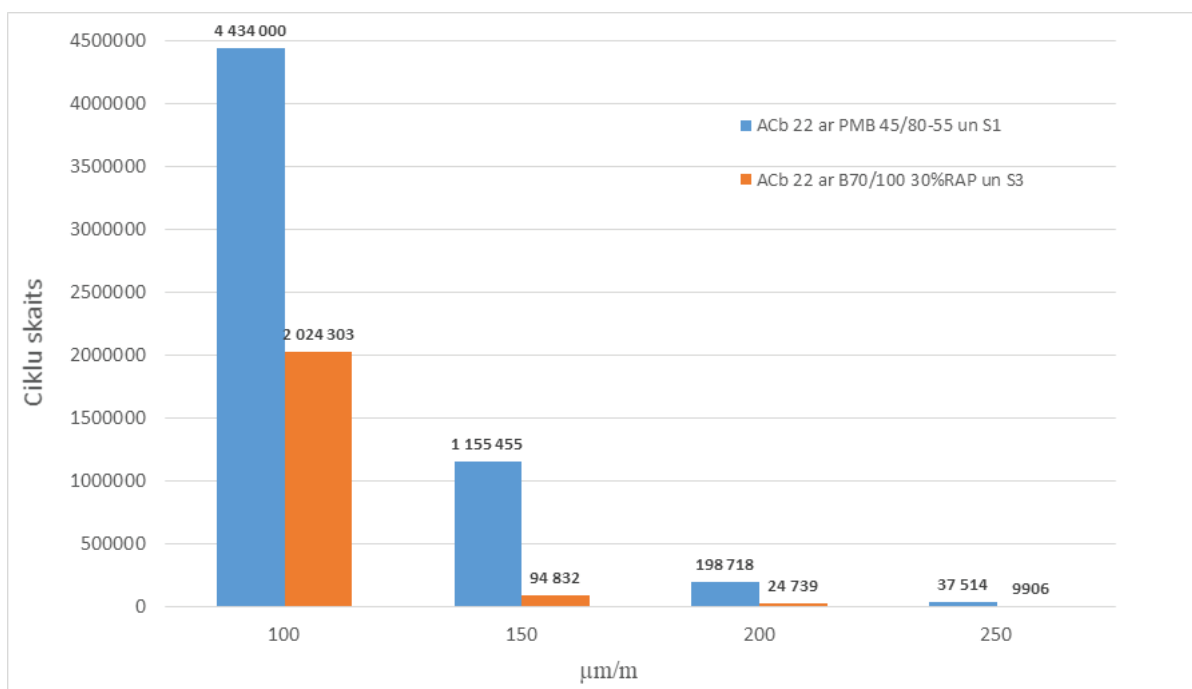
Asfaltbetona tips	Parauga šifrs	Konstanta deformācija, $\mu\text{m}/\text{m}$	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standartnovirze
AC _b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3	240-11	100	2 715 017	2 024 303	690 714
	240-4		1 333 589		
	240-5	150	103 878	94 832	7564
	240-2		85 365		
	240-3		95 253		
	240-7	200	22 800	24 739	1939
	240-1		26 678		
	240-10	250	10 493	9906	587
	240-11				

30. tabula Asfaltbetona paraugu AC_b 22 ar PMB 45/80-55 un S1 nogurumizturība

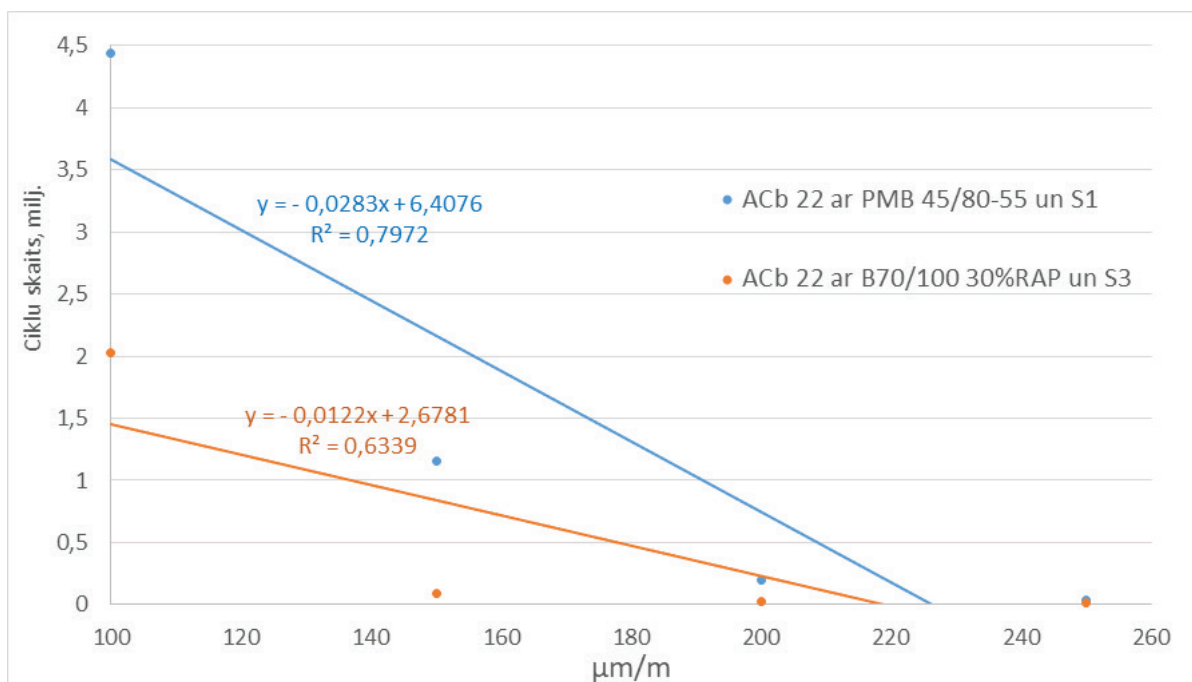
Asfaltbetona tips	Parauga šifrs	Konstanta deformācija, $\mu\text{m}/\text{m}$	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standartnovirze
AC _b 22 ar PMB 45/80-55 un S1	241-4	100	> 4 434 000	> 4 434 000	-
	241-3	150	685 909	1 155 455	469 545
	241-8		1 625 000		
	241-2	200	249 340	198 718	50 623
	241-7		148 095		
	241-1	250	15 775	37 514	17 212
	241-6		57 866		
	241-5		38 902		

31. tabula AC_b 22 nogurumizturības vidējie rādītāji (10 °C, 10 Hz)

Asfaltbetona tips	Slogošanas ciklu skaits līdz 50% stinguma samazinājumam	
Parauga ieliece, $\mu\text{m}/\text{m}$ (microstrains)	AC _b 22 ar PMB 45/80-55 un S1	AC _b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3
100	> 4 434 000	2 024 303
150	1 155 455	94 832
200	198 718	24 739
250	37 514	9906



46. att. ACb 22 nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)

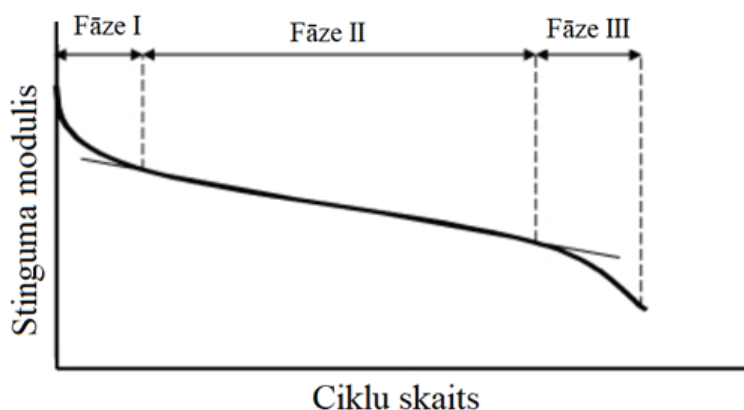


47. att. ACb 22 nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)

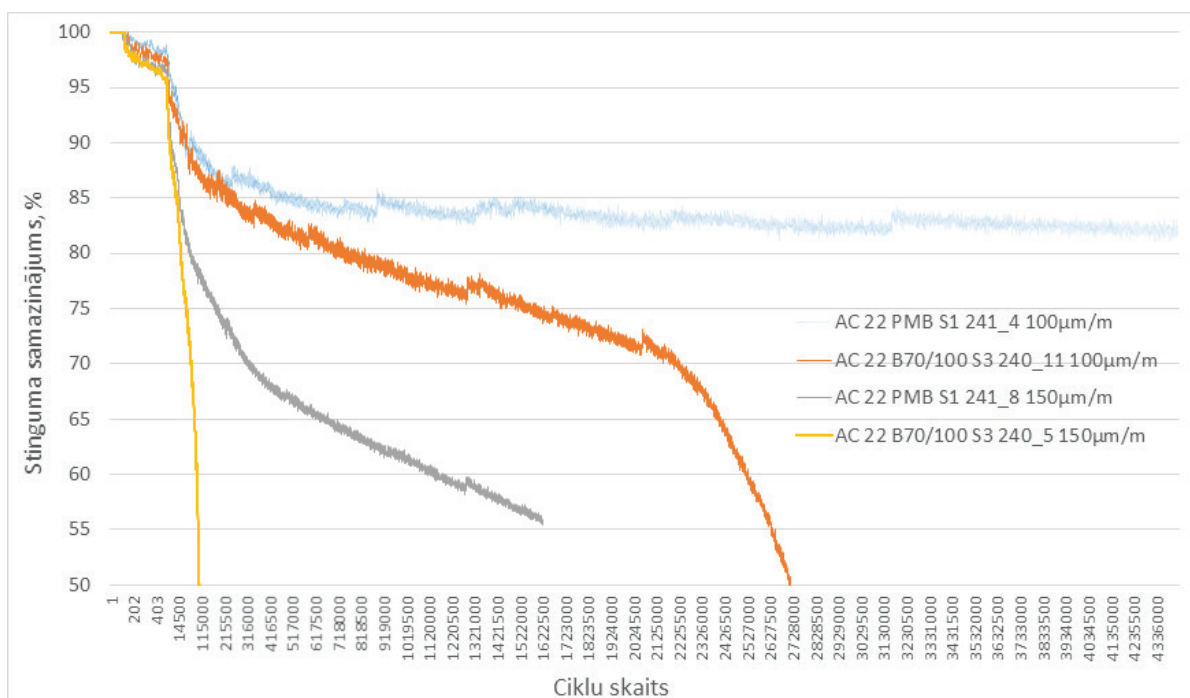
32. tabula Asfaltbetona paraugu nogurumizturības kategorijas noteikšana

$N = A \times \epsilon_6 + B$			
<i>N</i> – ciklu skaits, milj.			
ϵ_6 – relatīvā deformācija, aprēķināta 10^6 cikliem			
<i>A, B</i> – koeficienti			
Asfaltbetona tips	A	B	ϵ_6
AC _b 22 ar PMB 45/80-55 un S7	– 0,0283	6,4076	>190
AC _b 22 ar B70/100, 30% RAP un S3	– 0,0122	2,6781	138

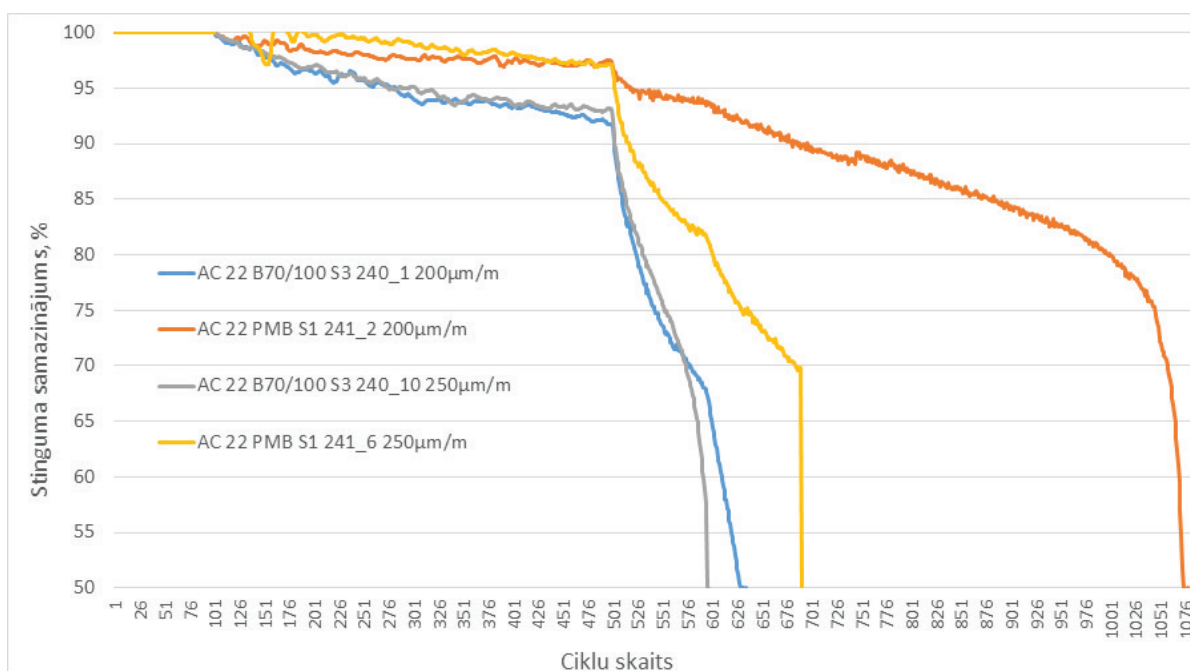
49. un 50. attēlā parādīta AC_b 22 paraugu nogurumizturības samazinājuma dinamika (10 °C, 10 Hz, 100 un 150 μm/m, kā arī 200 un 250 μm/m). Attēlos var redzēt stinguma samazinājuma 1. fāzi (sākuma zonu; 48. att.– Fāze I) – līdz aptuveni 500. ciklam, kad veidojas lūzuma punkts. Lūzuma punkts izskaidrojams ar to, ka iekārta datus līdz 500. ciklam pieraksta ik pēc viena cikla, bet pēc 500. cikla turpina pierakstīt ik pēc 100 cikliem. Paraugiem lielākas relatīvās deformācijas gadījumā, sasniedzot šo punktu, strauji samazinās nogurumizturība (pārēja no 1. fāzes – uzreiz 3. fāzē; skat. 48. att.), bet, ja relatīvā deformācija ir mazāka (100 μm/m), tad veidojas stabilizācijas zona jeb 2. fāze.



48. att. Stinguma samazinājuma dinamika un tās fāzes asfaltbetona paraugiem



49. att. Nogurumizturības samazinājuma dinamika ACb 22 paraugiem (no sērijas) ar lielāku nogurumizturību (10 °C, 10 Hz, 100 un 150 µm/m)



50. att. Nogurumizturības samazinājuma dinamika ACb 22 paraugiem (no sērijas) ar lielāku nogurumizturību (10 °C, 10 Hz, 200 un 250 µm/m)

6.4. SMA 11 sastāvu ar RAP un bez tā testēšana

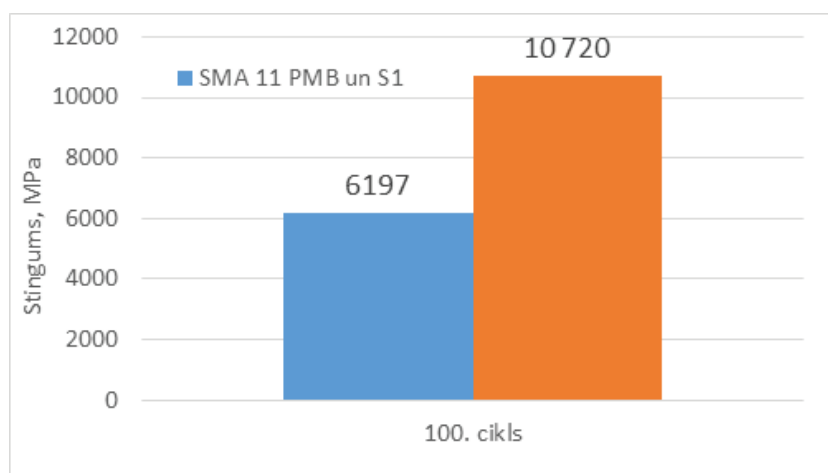
Lai noteiktu RAP ietekmi uz virskārtas asfaltbetona SMA 11 nogurumizturības īpašībām, veikts SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S1 un SMA 11 ar 20% RAP, B70/100 un S1 sastāvu nogurumizturības un stinguma īpašību salīdzinājums. 33. tabulā apkopotas SMA 11 asfalta sastāvu fizikālās īpašības, 39. attēlā un 34. tabulā – stinguma rezultāti. SMA 11 sastāviem ar 20% RAP, B70/100 un S1 vidējais stingums pēc 100 cikliem ir 10 720 MPa, bet SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S1 – 6197 MPa (starpība $\approx 40\%$). 35. un 36. tabulā un 52. un 53. attēlā parādīti SMA 11 paraugu nogurumizturības rādītāji, kuri izmantoti to nogurumizturības kategorijas aprēķinam. SMA 11 ar 20% RAP, B70/100 un S1 nogurumizturības kategorija ir ϵ_6 -199, bet SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S1 – ϵ_6 -366 (starpība $\approx 45\%$). 54. un 55. attēlā parādīta SMA 11 paraugu nogurumizturības samazinājuma dinamika pie kontrolētas relatīvās deformācijas 250 un 350 $\mu\text{m/m}$ un 10 °C temperatūras, kā arī 10 Hz frekvences.

33. tabula SMA 11 paraugu fizikālās īpašības

Rādītājs	Standarts	Rezultāti					
		SMA 11 ar 20% RAP, B70/100 un S1					
		1.	2.	3.	4.	5.	6.
Tilpum- blīvums, Mg/m^3	LVS EN 12697-6: 2020	2,428	2,402	2,42	2,423	2,423	2,434
		7.	8.	9.	10.	11.	12.
		2,419	2,428	2,45	2,436	2,444	2,429
Porainība, %	LVS EN 12697- 8:2019	1.	2.	3.	4.	5.	6.
		1,54	2,60	1,87	1,74	1,74	1,30
		7.	8.	9.	10.	11.	12.
		1,91	1,54	0,65	1,22	0,89	1,50
		SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S1					
Tilpum- blīvums, Mg/m^3	LVS EN 12697-6: 2020	1.	2.	3.	4.	5.	6.
		2,357	2,326	2,326	2,396	2,299	2,311
		7.	8.	9.	10.	11.	12.
		2,313	2,290	2,331	2,346	2,342	2,197
Porainība, %	LVS EN 12697- 8:2019	1.	2.	3.	4.	5.	6.
		3,16	4,44	4,44	1,56	5,55	5,05
		7.	8.	9.	10.	11.	12.
		4,97	5,92	4,23	3,62	3,78	9,74

34. tabula SMA 11 paraugu fizikālās īpašības

Asfaltbetona paraugu tips un identifikācija	Standarts	Parauga nr.	Temperatūra, °C	Stinguma modulis, MPa	Vidējais stinguma modulis, MPa
SMA 11 ar 20% RAP, B70/100 un S7	LVS EN 12697-24:2018 B metode	1.	10	10 231	10 720
		2.		9733	
		3.		11 042	
		4.		10 683	
		5.		11 077	
		6.		11 371	
		7.		10 240	
		8.		10 903	
		9.		-	
		10.		10 472	
		11.		11 249	
		12.		10 917	
SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S7	LVS EN 12697-24:2018 B metode	1.	10	6552	6197
		2.		6336	
		3.		6409	
		4.		6402	
		5.		6269	
		6.		6160	
		7.		6000	
		8.		5985	
		9.		6517	
		10.		6605	
		11.		5968	
		12.		5165	



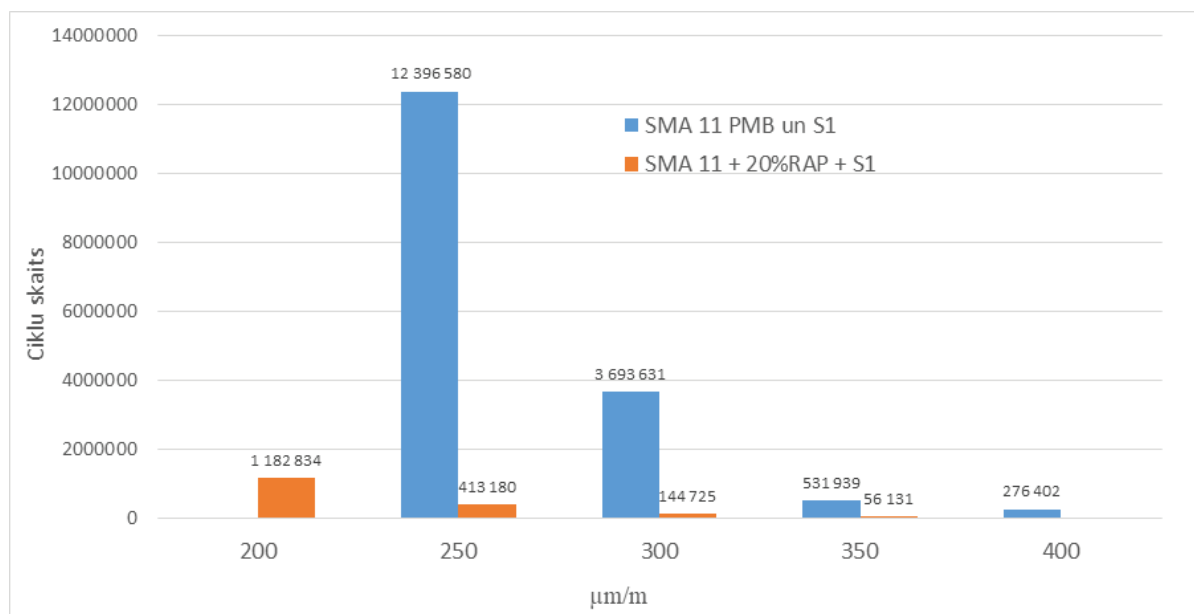
51. att. SMA11 asfaltbetona paraugu stingums

35. tabula SMA 11 asfaltbetona paraugu nogurumizturība

Asfaltbetona parauga tips un identifikācija	Standarts	Parauga nr.	Konstanta deformācija, $\mu\text{m}/\text{m}$	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standartnovirze
SMA 11 ar PMB 45/80-55 un S1	LVS EN 12697-26:2018 D pielikums	1.	150	> 3 395 000	> 3 395 000	-
		2.	250	12 396 580	12 396 580	-
		3.	300	1 702 500	3 693 631	2 106 939
		4.		2 514 000		
		10.		6 490 330		
		11.		4 067 693		
		7.	350	951 640	531 939	283 761
		8.		445 125		
		9.		400 618		
		12.		330 371		
		5.	400	164 000	276 402	158 960
		6.		388 804		

Asfaltbetona parauga tips un identifikācija	Standarts	Parauga nr.	Konstanta deformācija, $\mu\text{m}/\text{m}$	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standartnovirze
SMA 11 ar 20% RAP, B70/100 un S1	LVS EN 12697-26:2018 D pielikums	8.	200	1 803 480	1 182 834	574 203
		10.		1 074 523		
		11.		670 500		
		6.	250	392 322	413 180	18 924
		7.		417 967		
		12.		429 250		
		2.	300	162 390	144 725	24 983
		4.		-		
		5.		127 059		
		1.	350	47 026	56 131	19 329
		3.		78 331		
		9.		43 035		

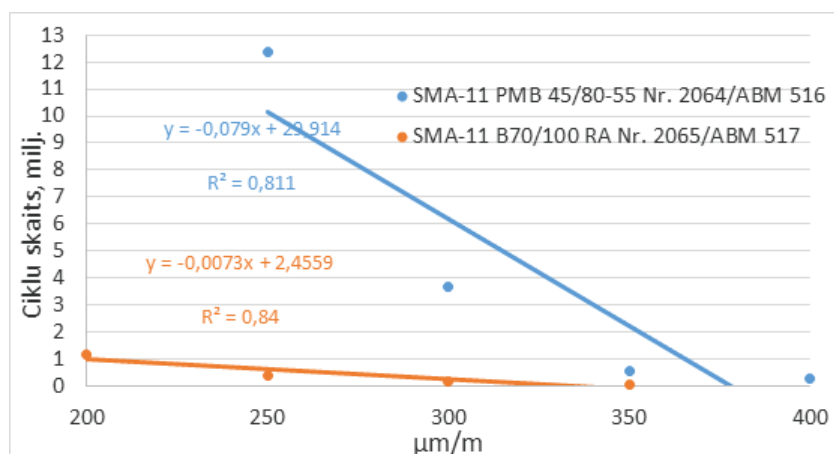
Rezultātu izkliede izskaidrojama ar paraugu atšķirīgu sablīvējumu (skat. 33. tab.).



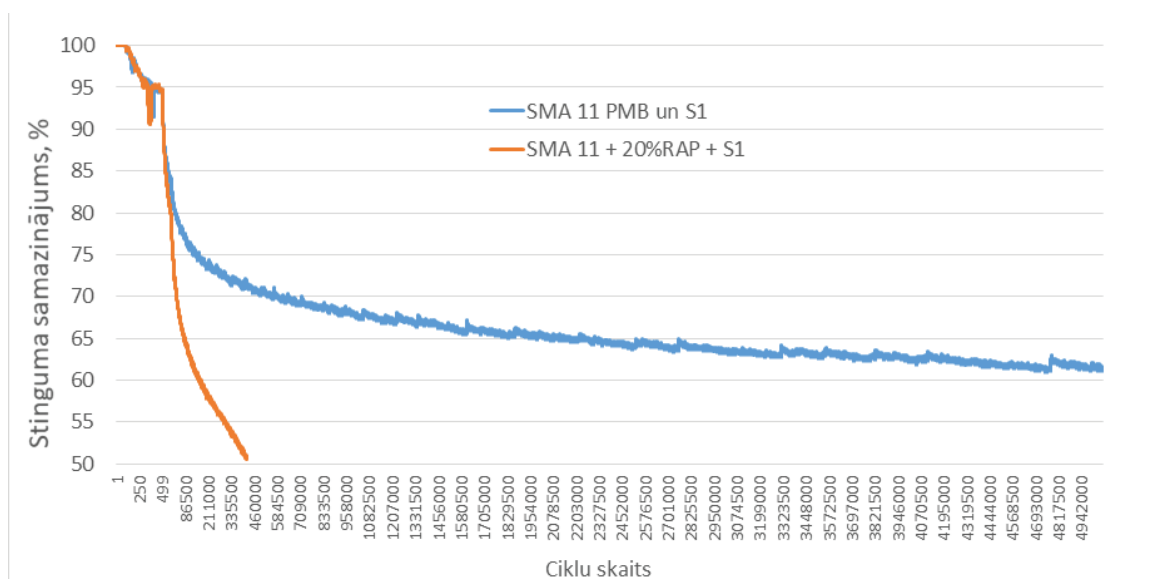
52. att. SMA 11 paraugu nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)

36. tabula Asfaltbetona paraugu nogurumizturības kategorijas noteikšana

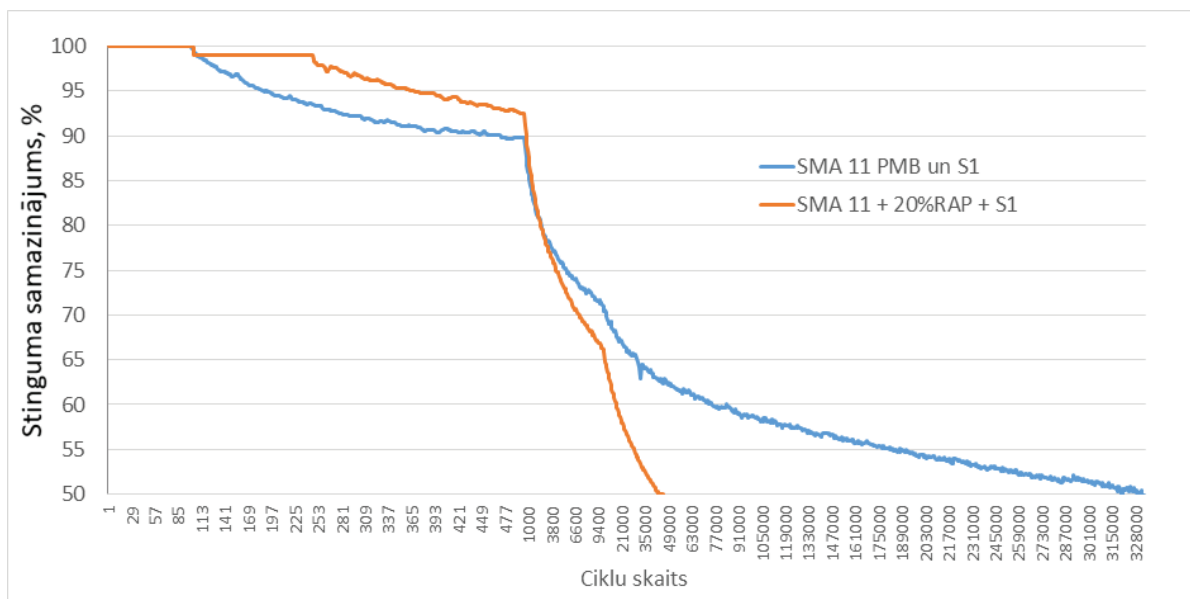
$N = A \times \epsilon_6 + B$			
N – ciklu skaits, milj.			
ϵ_6 – relatīvā deformācija, aprēķināta 10^6 cikliem			
A, B – koeficienti			
Asfaltbetona tips	A	B	ϵ_6
SMA-11 ar PMB 45/80-55 un S1 Nr. 2064/ABM 516	- 0,079	29,914	366
SMA-11 ar 20% RAP, B70/100 un S1 Nr. 2065/ABM 517	- 0,0073	2,4559	199



53. att. . SMA 11 paraugu nogurumizturības rādītāji (10 °C, 10 Hz)



54. att. Nogurumizturības samazinājuma dinamika SMA 11 paraugiem (no sērijas) ar lielāku nogurumizturību (10 °C, 10 Hz, 250 µm/m)



55. att. Nogurumizturības samazinājuma dinamika SMA 11 paraugiem (no sērijas) ar lielāku nogurumizturību (10 °C, 10 Hz, 350 μm/m)

7. Asfaltbetona salizturības izpēte pēc nogurumizturības un stinguma kritērijiem

7.1. Metodika

Par pamatu asfaltbetona salizturības noteikšanai pēc nogurumizturības kritērija ņemta AASHTO C 666 (*Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*) standartmetode. Šī testēšanas metode ietver betona (cementbetona) mehānisko īpašību izmaiņu noteikšanu laboratorijas apstākļos atkārtotu sasaldēšanas un atkuššanas ciklu ietekmē (paraugu strauji sasaldējot un atkausējot). Standartmetode iekļauj divas procedūras: procedūru Nr. 1 – strauju parauga sasaldēšanu un atkausēšanu ūdenī, un procedūru Nr. 2 – strauju parauga sasaldēšanu gaisā un atkausēšanu ūdenī.

7.1.1. Iekārtas

Salizturības noteikšanas iekārta sastāv no piemērotas kameras ar saldēšanas un sildīšanas funkcijām, kurā paraugu var pakļaut sasaldēšanas un atkuššanas cikliem, kā arī no iekārtas, kas kontrolē identisku, atkārtotu ciklu automātisku veikšanu atbilstoši noteiktajai temperatūrai. Gadījumā, ja iekārta nespēj strādāt automātiskā režīmā, ciklisko sasaldēšanu un atkuššanu var nodrošināt manuāli.

Paraugam, kad tas atbilstoši procedūrai Nr. 1 tiek pakļauts sasaldēšanai vai atkuššanai, visu testēšanas laiku jābūt iegremdētam ūdenī (ūdens slāņa biezums virs iegremdētā parauga – 1–3 mm), savukārt, atbilstoši procedūrai Nr. 2, parauga sasaldēšana nenotiek ūdens vidē (paraugs ir piesātināts ar ūdeni, jo atkuššanas laikā tas atrodas ūdenī, bet sasaldēšanas laikā tas atrodas gaisā), turpretī atkuššana notiek ūdens vidē.

Testa veikšanai paraugus ievieto konteineros (vannīņās). Nekustīgus, stingus konteinerus, kas paraugus varētu sabojāt, lietot nav atļauts. Visiem paraugiem jābūt vienādi ievietotiem metāla konteinerā, lai temperatūras maiņas ietekme uz visiem paraugiem būtu vienāda. Kamerām jābūt aprīkotām ar kvalitatīvu temperatūras mērīšanas sistēmu, lai būtu iespējams veikt precīzus temperatūras mērījumus pašā kamerā un uz parauga centrā.

7.1.2. Sasaldēšanas un atkausēšanas cikli

Abu standartprocedūru (Nr. 1 un Nr. 2) sasaldēšanas un atkausēšanas cikls testa laikā iekļauj parauga temperatūras samazināšanu no +4 °C līdz -18 °C un paaugstināšanu no -18 °C līdz +4 °C ne mazāk kā 2 stundu un ne vairāk kā 5 stundu laikā.

Veicot procedūru Nr. 1, atkausēšanai vajadzētu aizņemt vismaz 25% no šīs procedūras kopējā laika, bet procedūras Nr. 2 gaitā atkausēšanai vajadzētu aizņemt ne mazāk kā 20% no tās kopējā laika.

Pēc saldēšanas cikla beigām paraugu centros vajadzētu būt -18 °C (+/-2 °C) temperatūrai, pēc atkuššanas cikla temperatūrai vajadzētu būt +4 °C (+/-2 °C) un visa cikla garumā parauga temperatūrai nevajadzētu nokrist zem -19 °C un pacelties virs +6 °C.

Nepieciešamais laiks parauga centra temperatūras pazemināšanai no +3 līdz -16 °C ir ne mazāks kā puse no kopējā saldēšanas cikla ilguma, bet laiks, lai parauga centra temperatūru paaugstinātu no -16 °C līdz +3 °C, ir ne mazāks kā puse no sildīšanas cikla ilguma.

Lai paraugus varētu salīdzināt citu ar citu, nepieciešamajam laikam temperatūras maiņai to centros no +2 °C līdz -12 °C nevajadzētu atšķirties vairāk kā par sestdaļu no kopējā saldēšanas perioda, savukārt nepieciešamajam laikam temperatūras maiņai paraugu centros no -12 °C līdz +2 °C nevajadzētu atšķirties vairāk kā par trešdaļu no kopēja sildīšanas cikla ilguma.

Pārejai no saldēšanas fāzes uz atkuššanu nevajadzētu pārsniegt 10 minūtes, izņemot speciāli paredzētos gadījumus.

Cementbetona paraugiem platumā, augstumā [biezumā] un diametrā nevajadzētu būt mazākiem par 75 mm un lielākiem par 125 mm, kā arī garumā ne mazākiem par 275 mm un ne lielākiem par 405 mm.

7.1.3. Testēšanas procedūra

Izzāgētie paraugi (sijas) 48 stundas pirms testa sākuma jāiztur 23 °C siltā ūdenī. Pēc parauga izturēšanas ūdenī tas nekavējoties jānovieto vietā, kuras temperatūra var būt par 1 °C zemāka nekā paredzētā atkausēšanas temperatūra (+4 °C) un līdz 2 °C augstāka, t. i., robežās no 3 līdz 6 °C (tāda tiks izmantota sasaldēšanas-atkausēšanas ciklā). Jānosaka arī šķērsvirziena frekvence, parauga svārs un dimensijas. Jānodrošina, lai paraugs nezaudētu mitrumu laikā, kad tas tiek pārvietots no mitrināšanas vietas uz sasaldēšanas-atkausēšanas vietu (kameru, ūdens vannu).

Pirmais cikls jāsāk ar paraugu ievietošanu ūdenī (piesātināšanai ar ūdeni; turpmāk, sākot ar 2. ciklu, tā būs atkausēšanas fāze). Paraugi no iekārtas jāizņem atkausētā stāvoklī, pēc laika intervāla, kas nav pārsniedzis 36 sasaldēšanas-atkausēšanas ciklus. Pēc parauga izņemšanas jāveic tā svara un dimensiju mērījumi. Pēc visu šo parametru noteikšanas paraugs jānovieto atpakaļ iekārtā. Procedūras Nr. 1 veikšanai pēc katras paraugu pārbaudes ūdens no konteinera jāizlej un jāuzpilda jauns. Tādā veidā tests jāturpina vai nu līdz 300 sasaldēšanas/atkušanas cikliem, vai arī līdz brīdim, kad parauga relatīvi dinamiskais elastības modulis sasniedzis 60% no sākotnējās elastības moduļa vērtības (vienalga, kura stadija iestājas pirmā). Novērojot parauga garuma parametrus, tests būtu jāpārtrauc, kad paraugs ir parauga garums ir palielinājies par 0,1%. Savukārt, ja paraugam tiek novērotas frekvences vai dimensiju izmaiņas, tās noteikti jāpieraksta un jāatzīmē.

7.2. Metodikas AASHTO C 666 modifikācija un pielāgošana asfaltbetona paraugu salizturības testēšanai

7.2.1. Metodikas AASHTO C 666 modifikācija

Asfaltbetona paraugu salizturība tika testēta temperatūras diapazonā no $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (standartā AASHTO C 666 – no $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Veiktas izmaiņas sasaldēšanas/atkausēšanas ciklu garumā (ilgumā). Asfaltbetona paraugu testēšanā viens cikls ilgst 8 stundas, un katru dienu paraugi izturēja 3 šādus ciklus. Tie ir agresīvāki apstākļi nekā standartā AASHTO C 666 – nolūkā, lai cikla laikā paraugs varētu pilnīgi sasalt (caursalt) un atkust. Standarts AASHTO C 666 paredz, ka parauga atkausēšana aizņem vismaz ceturtdaļu (25%) cikla ilguma, savukārt asfaltbetona paraugiem sasaldēšanas un atkausēšanas laiks ir vienāds – sasaldēšana un atkausēšana katra ilgst 4 stundas.

7.2.2. Testēšanas iekārtas un procedūra

Atbilstoši asfaltbetona paraugu – siju lielumam ($50\times 50\times 410\text{ mm}$) tika izgatavotas skārda vanniņas (skat. 56. att. a). Vanniņu izmēri – platums 65 mm, augstums 70 mm un garums 430 mm. 56. attēlā c parādīta paraugu dimensiju savstarpējā, proporcionālā atbilstība izgatavotajām skārda vanniņām, atstājot brīvu vietu sālsūdens ieliešanai.

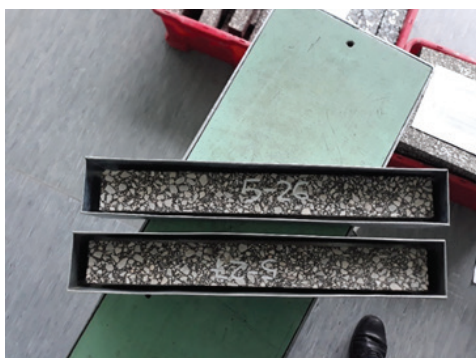
a)



b)



c)



56. att. Paraugu sagatavošana izturēšanai ūdenī salzturības testa laikā: a) skārda vanniņas; b) distanceri vanniņās; c) vanniņas ar ievietotiem paraugiem

57. attēlā parādīta 3% NaCl šķīduma sagatavošana asfaltbetona paraugu piesātināšanai ar to un paraugu izturēšanai šajā šķīdumā testa laikā. NaCl šķīduma pagatavošanai tika izmantots destilēts ūdens.

a)



b)



57. att. 3% NaCl šķīduma sagatavošana, izmantojot destilētu ūdeni (a) un NaCl tabletes (b)

Pēc tam vanniņās tika ievietoti asfaltbetona paraugi un iepildīts 3% NaCl ūdens šķīdums, pilnībā nosedzot asfaltbetona sijas (skat. 58. att.). Asfaltbetona paraugi pirms sasaldēšanas šajā šķīdumā tika izturēti 48 stundas, nodrošinot paraugu pilnīgu piesātināšanos ar to.



58. att. Asfaltbetona paraugu piesātināšana ar 3% NaCl ūdens šķīdumu, izturot tajā pirms sasaldēšanas

Pēc izturēšanas NaCl ūdens šķīdumā paraugi tika ievietoti sasaldēšanas/atkausēšanas kamerā, nodrošinot atstarpes starp tiem un vienmērīgu aukstā gaisa cirkulāciju ap visiem paraugiem (skat. 59. att.).



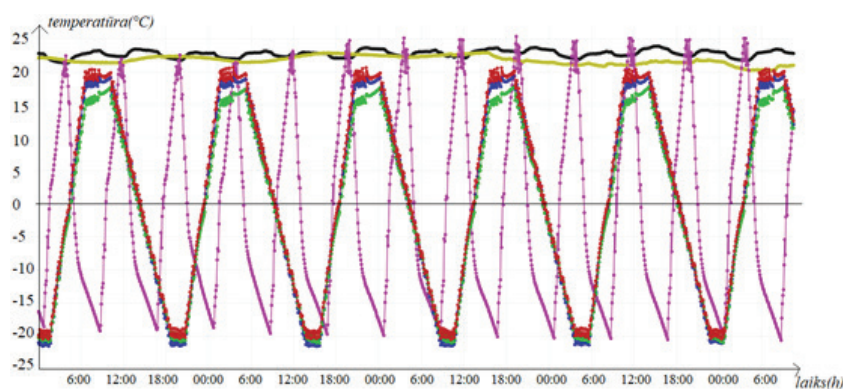
59. att. Paraugu novietojums sasaldēšanas/atkausēšanas kamerā

Sasaldēšanas procesa gaitā notika parauga pārklāšanās ar ledus kārtu – paraugs atradās sasaluša ūdens vidē, kas nozīmē, ka izvēlētajā ciklošanas frekvence (3 cikli diennaktī) ir pietiekama pilnīgai parauga caursalšanai (skat. 60. att.).



60. att. Paraugu stāvoklis ūdens vidē – 3% NaCl ūdens šķīdumā sasaldēšanas laikā

61. attēlā parādīti sasaldēšanas/atkausēšanas cikli: rozā krāsā – asfaltbetona sasaldēšanas/atkausēšanas cikli (3 cikli diennaktī), sarkanā, zaļā un zilā krāsā – cementbetona sasaldēšanas/atkausēšanas cikli (1 cikls diennaktī). Šajā pētījumā izmantotajā testēšanas metodē dati tika iegūti ar speciāli šāda veida testiem izstrādātu klimatisko parametru monitoringa sistēmu, kas grafiskā veidā fiksē ciklu amplitūdu, frekvenci un vienmērīgumu. Iegūtais temperatūras-laika grafiks apstiprina, ka sasaldēšanas/atkausēšanas iekārta paraugu ciklošanas laikā darbojas adekvāti.



61. att. Paraugu sasaldēšanas/atkausēšanas ciklu temperatūras-laika grafiks

Svarīgi atzīmēt, ka asfaltbetona maisījumu paraugiem atsevišķām minerālmateriāla daļiņām tika novēroti izteikti izdrupumi (skat. 62. att.), kuru iemesls varētu būt šo daļiņu zemā salizturība.



62. att. Asfaltbetona maisījumu paraugi pēc 100 sasaldēšanas un atkausēšanas cikliem

7.3. Sablīvējuma ietekme uz stingumu

Porainības ietekmes uz stingumu analīze veikta, analizējot 39 AC 11_{surf} + B70/100 un 14 AC 11_{surf} + PMB 45/80-55 paraugus, kas tika izgatavoti ar dažādu asfaltbetona sablīvējumu (2 – 8%). 37. un 38. tabulā apkopoti iegūtie rezultāti. Stinguma rādītāji atkarībā no porainības ir no 6145 MPa (porainība 6,54%) līdz 13 849 MPa (porainība 1,92%). Līdz ar to, asfaltbetona porainībai pieaugot no 1,92 līdz 6,54%, stingums samazinās par $\approx 55\%$. Paraugi atkarībā no to porainības sagrupēti trīs grupās: 2 – > 3%, 5 – 7% un 7 – > 8% (skat. 64. att.). Lielākais stinguma samazinājums, palielinoties porainībai no 2 – > 3% līdz 5% – 7%, konstatēts asfaltbetona AC 11_{surf} ar nemodificēto bitumenu B70/100 paraugiem – no 11 201 MPa līdz 8394 MPa (stingums samazinās par 25%), savukārt ar modificēto bitumenu – no 10 791 MPa līdz 9181 MPa (stingums samazinās par 15%). Palielinoties porainībai no 5 – 7% līdz 7 – > 8%, stingums AC 11_{surf} paraugiem ar nemodificēto bitumenu B70/100 samazinās no 8394 MPa līdz 7393 MPa (stingums samazinās par 12%). 65. attēlā attēlota korelācija starp porainību un stingumu (ar nemodificēto bitumenu $R^2 = 0,84$, ar modificēto – $R^2 = 0,76$). Stingums noteikts gan pēc 100. cikla, gan 1000. cikla ar mērķi novērtēt stinguma stabilizāciju testa laikā (skat. 63. att.).

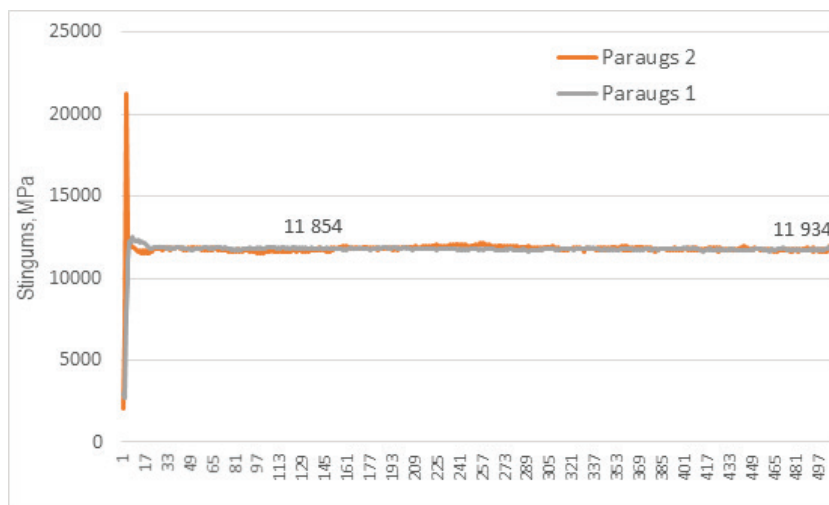
37. tabula AC 11_{surf} + PMB 45/80-55 paraugu stinguma rādītāji (10 °C, 10 Hz, 50 $\mu\text{m/m}$) pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem

Stinguma modulis, MPa		Tilpumbūvums, Mg/m ³	Maksimālais būvums, Mg/m ³	Porainība, %
100. cikls	1000. cikls			
11 489	11 330	2,466	2,552	3,37
12 174	12 083	2,472		3,13
8958	8925	2,384		6,58
11 278	11 220	2,460		3,61
9672	9262	2,412		5,49
12 975	13 223	2,463		3,49
11 764	11 330	2,478		2,90
11 543	11 275	2,451		3,96
10 398	10 200	2,402		5,88
12 587	11 366	2,470		3,21
12 316	12 204	2,485		2,63
7696	7491	2,394		6,19
11781	11555	2,495		2,23
11125	10882	2,449		4,05

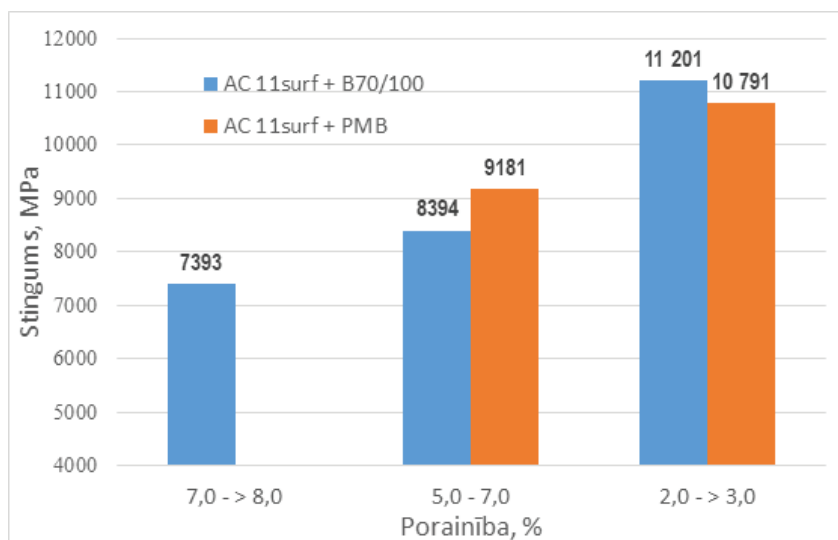
38. tabula AC 11_{surf} + B70/100 sastāvu paraugu stinguma rādītāji (10 °C, 10 Hz, 50 μm/m)
pēc 100 un 1000 slogošanas cikliem

Stinguma modulis, MPa		Tilpumbūvums, Mg/m ³	Maksimālais blīvums, Mg/m ³	Porainība, %	
100. cikls	1000. cikls				
7874	7751	2,370	2,552	7,13	7,18
8332	8154	2,370		7,13	
6689	6592	2,366		7,29	
9044	8863	2,474		3,06	3,05
11 779	11 933	2,480		2,82	
11 449	11 024	2,467		3,33	
10 149	10 432	2,476		2,98	
6856	6667	2,358		7,60	7,97
7001	6852	2,349		7,95	
7256	7091	2,342		8,23	
7363	7057	2,345		8,11	
7772	7555	2,349		7,95	7,95
11 914	11 634	2,468		3,29	3,95
8357	8182	2,379		6,78	6,49
6145	6012	2,385		6,54	
11 685	11 521	2,395		6,15	
11 789	11 562	2,472		3,13	3,13
8570	8299	2,403		5,84	5,84
12 286	11 489	2,497		2,16	2,16
8377	7997	2,375		6,94	6,62
8017	8020	2,386		6,50	
8237	7898	2,380		6,74	
7767	7566	2,391		6,31	
13 849	13 599	2,503		1,92	2,20
13 189	10 911	2,487		2,55	
11 596	11 922	2,503		1,92	
11 823	11 839	2,491		2,39	

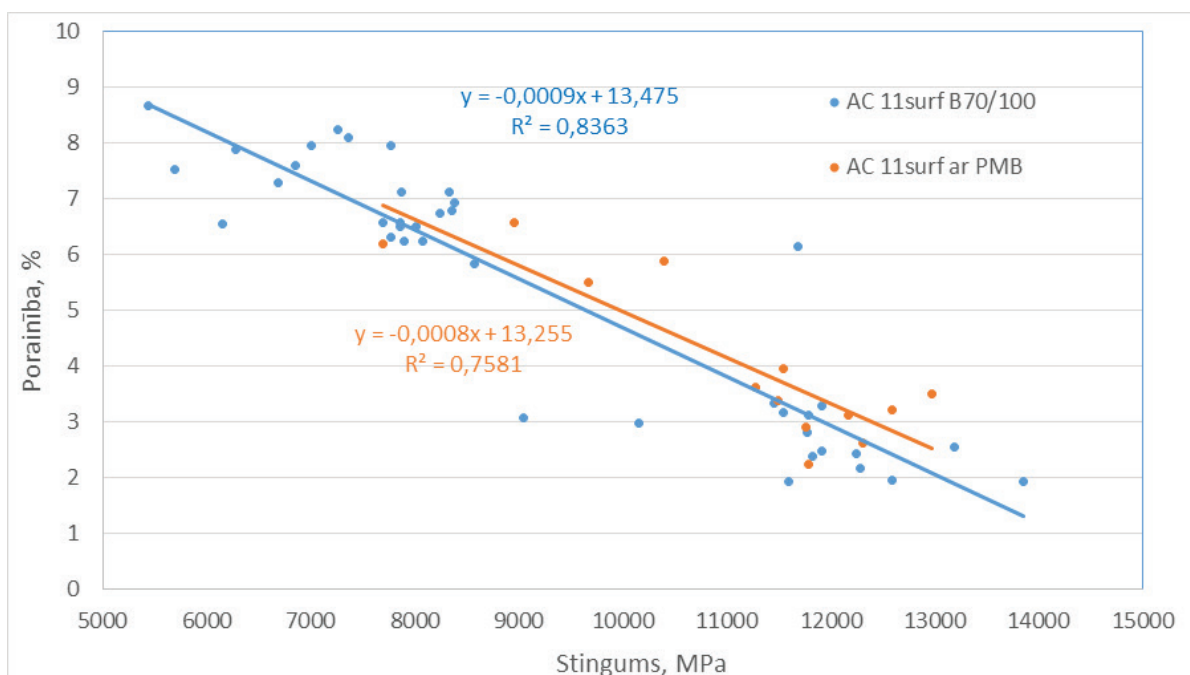
Stinguma modulis, MPa		Tilpumblīvums, Mg/m ³	Maksimālais blīvums, Mg/m ³	Porainība, %	
100. cikls	1000. cikls				
11 913	11 814	2,489	2,552	2,47	2,51
12 596	12 146	2,502		1,96	
11 550	11 159	2,471		3,17	
12 246	10 443	2,490		2,43	



63. att. Stinguma maiņas dinamika testu veikšanas laikā (līdz 1000. ciklam; 10 Hz, 10 °C, 50 µm/m)



64. att. Stinguma rādītāji atkarībā no porainības



65. att. Korelācija starp asfaltbetona paraugu stingumu un porainību

7.4. Sablīvējuma ietekme uz nogurumizturību

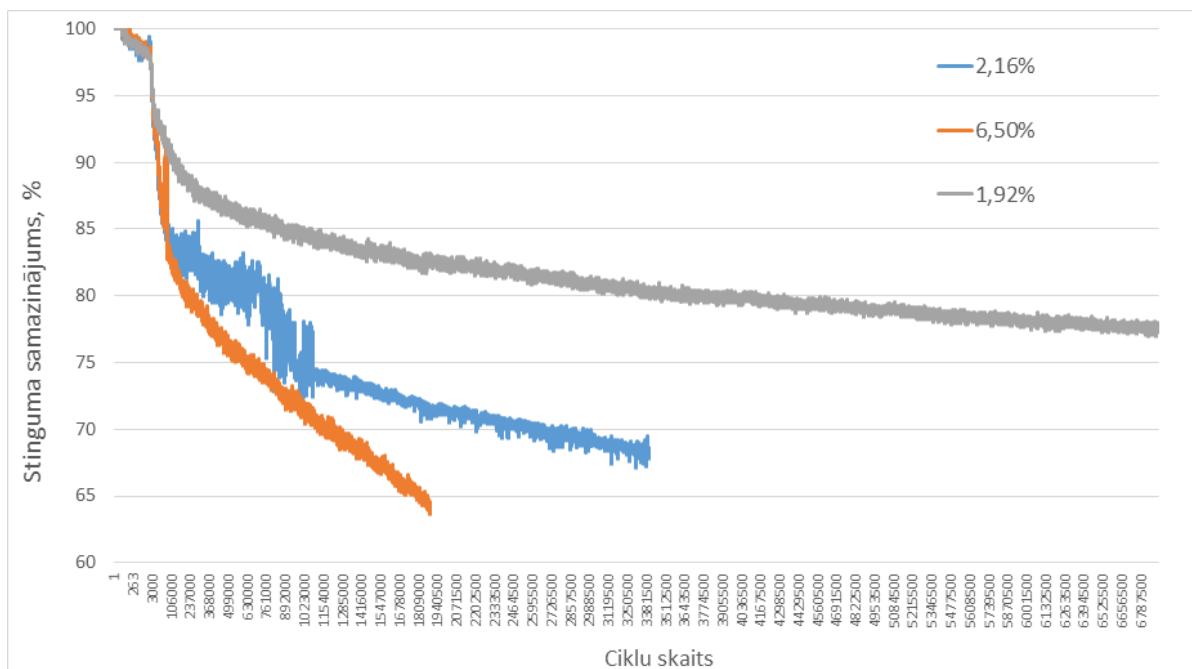
39. un 40. tabulā apkopoti katras AC 11 paraugu sērijas nogurumizturības rezultāti – ciklu skaits līdz 50% stinguma vērtības samazinājumam atkarībā no porainības. Testēšana veikta 10 °C temperatūrā, pie 10 Hz frekvences un relatīvās deformācijas no 150 līdz 300 $\mu\text{m/m}$. Asfaltbetona sablīvējuma ietekmes uz tā nogurumizturību novērtējumam tika izgatavoti asfaltbetona paraugi – sijas (50×50×410 mm) ar porainību no 2 līdz 8% (porainība noteikta atbilstoši testēšanas standarta LVS EN 12697-8 prasībām). 66. un 67. attēlā parādīta nogurumizturības tendence AC 11_{surf} paraugiem atkarībā no sablīvējuma. 66. attēlā redzams, ka AC 11_{surf} ar B70/100 paraugiem, sasniedzot 1,8 milj. sloģošanas ciklu (10 °C, 10 Hz, 150 $\mu\text{m/m}$), stinguma samazinājums (%) ir atšķirīgs. Paraugs ar lielāku sablīvējumu 1,92% zaudē 18% no sākotnējās vērtības, paraugs ar 2,16% zaudē 27% no sākotnējās vērtības, bet lielākais stinguma zudums ir paraugam ar 6,50% porainību – 35%. 67. attēlā parādīta AC 11_{surf} ar PMB 45/80-55 paraugu stinguma samazinājuma dinamika (10 °C, 10 Hz, 200 $\mu\text{m/m}$), kur var redzēt krasu nogurumizturības atšķirību starp dažādas porainības paraugiem, piemēram, pie 0,9 milj. veiktajiem cikliem paraugs ar porainību 3,13% zaudē tikai 30% no sava sākotnējā stinguma, paraugs ar 5,88% porainību – 45%, savukārt 6,19% porainības paraugam nogurums (50% stinguma zudums) iestājas jau pie 0,12 milj. veiktajiem cikliem. Tā kā nogurumizturības novērtējuma kritērijs ir stinguma izmaiņa cikliskās slodzes iedarbībā, tad tika noteikta korelācija starp AC 11 asfaltbetona sastāvu porainību un stinguma rādītājiem. 68., 69. un 70. attēlā parādītas sakarības starp AC 11 ar B70/100 paraugu poru saturu (porainību) un noguruma ciklu skaitu dažāda lieluma relatīvās deformācijas gadījumā.

39. tabula Asfaltbetona paraugu AC 11_{surf} ar B70/100 nogurumizturība

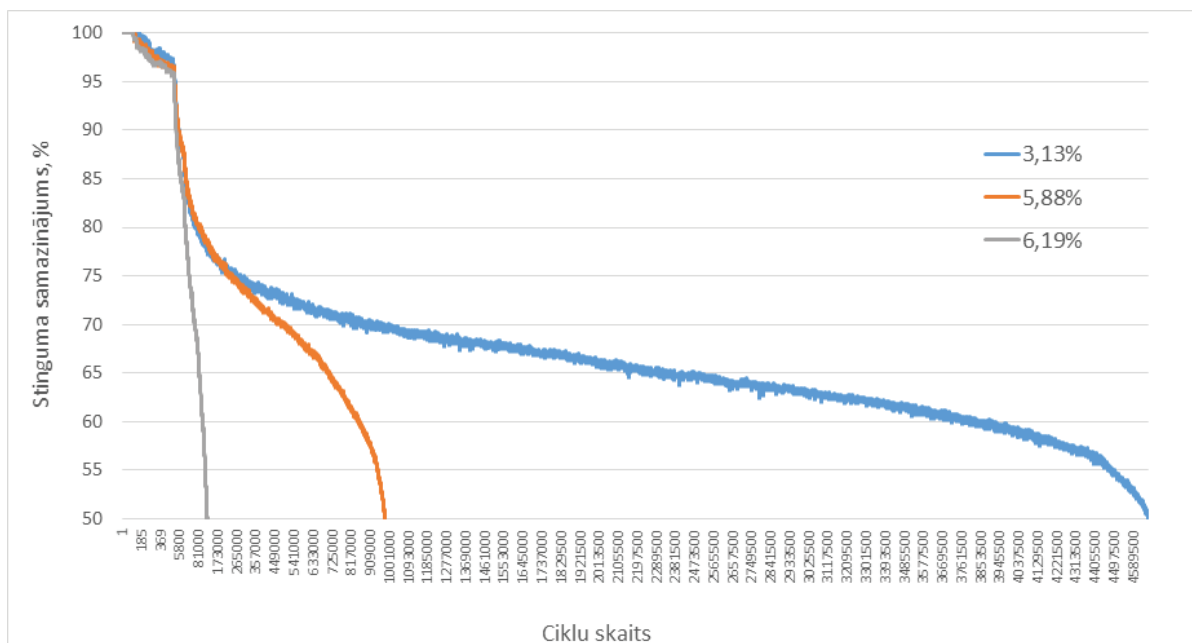
Asfaltbetona tips	Porainība, %	Konstanta deformācija, μm/m	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standart-novirze
AC 11 _{surf} ar B 70/100	2,16	150	> 3 390 000	-	-
	6,50		> 1 890 000		
	1,92		> 6 910 000		
	6,94	200	100 387	171 912	63 027
	6,74		219 318		
	6,31		196 031		
	2,55	250	350 913	350 913	-

39. tabula Asfaltbetona paraugu AC 11_{surf} ar B70/100 nogurumizturība

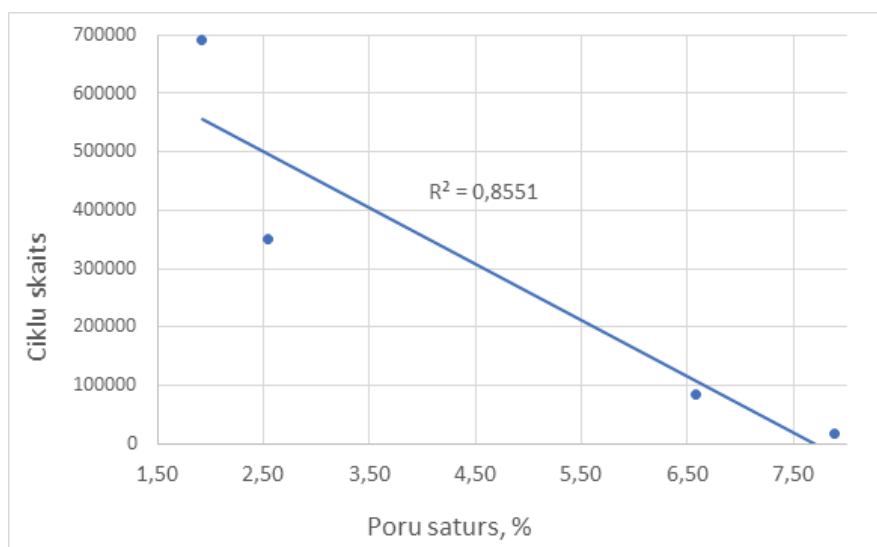
Asfaltbetona tips	Porainība, %	Konstanta deformācija, μm/m	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Standart-novirze
AC 11 _{surf} ar PMB 45/80-55	6,19	200	120 531	-	-
	5,88		978 630		
	3,13		4 660 000		
	3,21	250	466 461	-	-
	3,96		383 981		
	6,58		288 625		
	5,49	300	109 575	-	-
	2,63		208 694		



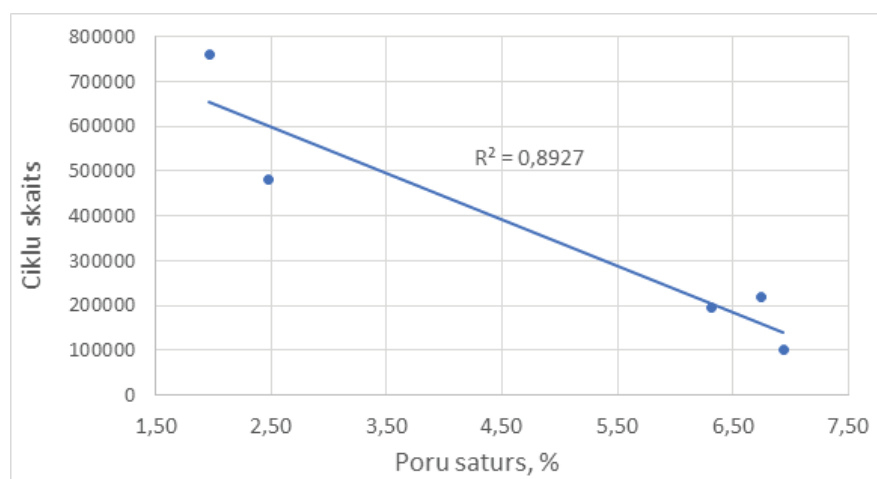
66. att. Stinguma samazinājuma dinamika (nogurumizturība) dažādas porainības
 $AC 11_{surf}$ ar B70/100 paraugiem (10 °C, 10 Hz, 150 $\mu\text{m/m}$)



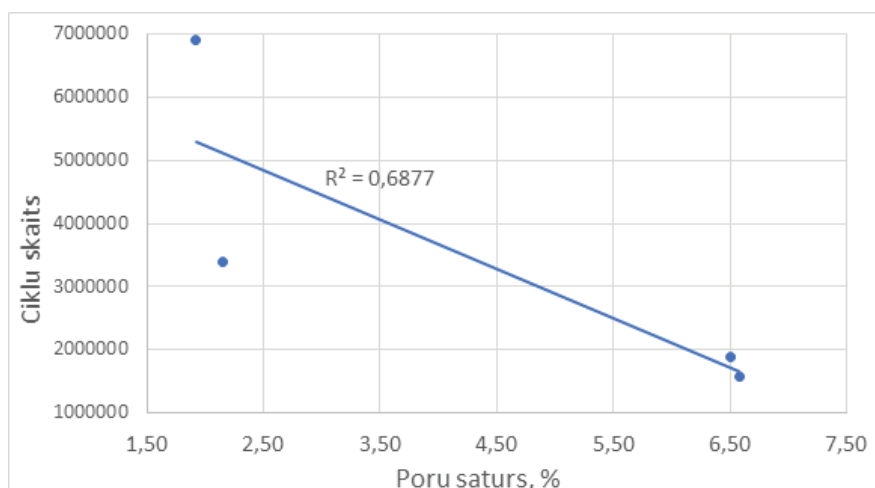
67. att. Stinguma samazinājuma dinamika (nogurumizturība) dažādas porainības
 $AC 11_{surf}$ ar PMB 45/80-55 paraugiem (10 °C, 10 Hz, 200 $\mu\text{m/m}$)



68. att. Sakarība starp porainību un noguruma ciklu skaitu AC 11 ar B70/100 paraugiem, ja relatīvā deformācija ir 250 µm/m (microstrains)



69. att. Sakarība starp porainību un noguruma ciklu skaitu AC 11 ar B70/100 paraugiem, ja relatīvā deformācija ir 200 µm/m (microstrains)



70. att. Sakarība starp porainību un noguruma ciklu skaitu AC 11 ar B70/100 paraugiem, ja relatīvā deformācija ir 150 $\mu\text{m/m}$ (microstrains)

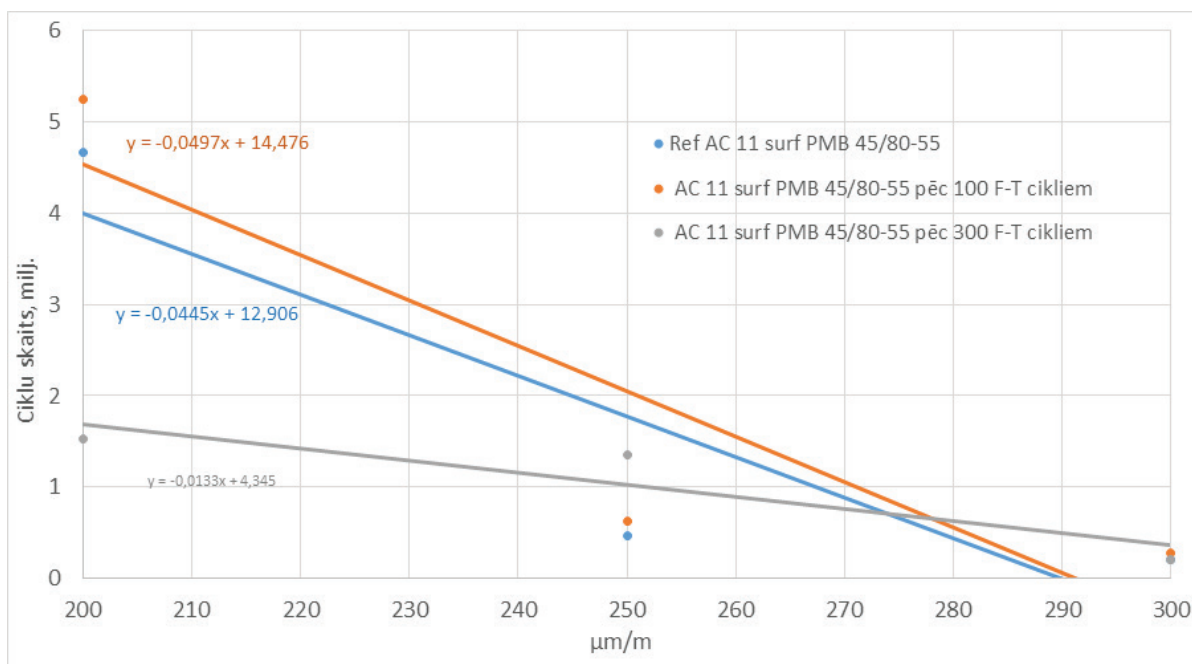
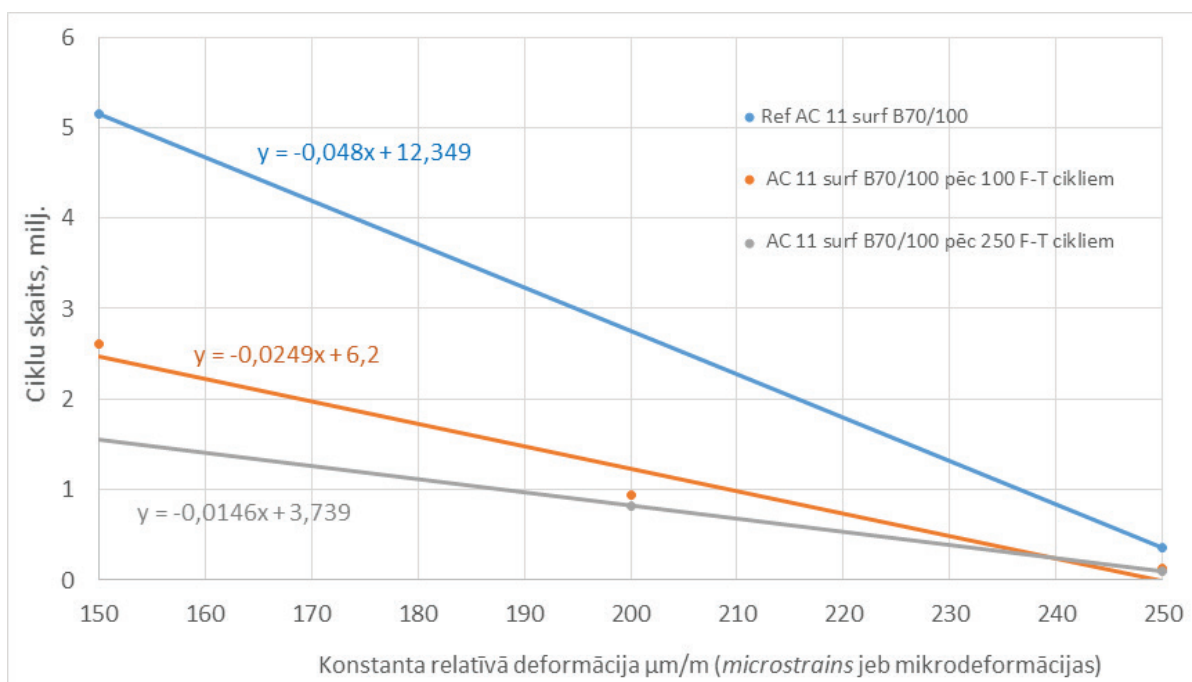
7.5. Sablīvējuma ietekme uz salizturību

41. tabulā apkopoti visu asfaltbetona AC 11_{surf} paraugu sēriju nogurumizturības rezultāti – ciklu skaits līdz 50% stinguma vērtības samazinājumam atkarībā no sasalšanas/atkuššanas ciklu skaita un porainības. AC 11_{surf} references paraugi, kas netika pakļauti salizturības cikliem, uzrādīja lielāku vidējo noguruma ciklu skaitu (ar B70/100 – ϵ_6 -236, ar PMB 45/80-55 – ϵ_6 -268; skat. 41. tab. un 71. un 72. att.). Pakļaujot AC 11_{surf} paraugus 100 salizturības cikliem, paraugiem ar nemodificēto bitumenu nogurumizturība samazinājās līdz kategorijai ϵ_6 -208 (samazinājums – 12%), bet paraugiem ar modificēto bitumenu nogurumizturības samazinājums netika konstatēts – ϵ_6 -271. Savukārt, pakļaujot AC 11_{surf} paraugus ar nemodificēto bitumenu 250 salizturības cikliem, bet paraugus ar modificēto bitumenu – 300 cikliem, nogurumizturība attiecīgi samazinājās līdz kategorijai ϵ_6 -188 (20% paraugiem ar B70/100) un kategorijai ϵ_6 -251 (6% paraugiem ar PMB 45/80-55).

73., 74. un 75. attēlā parādītas noguruma tendences – stinguma samazinājuma dinamikas līknes pie līdzīgas porainības (1,9 – 3,5%), bet dažādām relatīvās deformācijas vērtībām. Tendence neuzrādīja izteiktu nogurumizturības samazinājumu atkarībā no ciklu skaita paraugiem ar modificēto bitumenu (skat. 74. un 75. att.), tikai nogurumizturības līkņu konstruēšana deva iespēju noteikt, ka pēc 300 salizturības cikliem nogurumizturība samazinājās par 6%. Savukārt paraugiem ar nemodificēto bitumenu var skaidri redzēt nogurumizturības samazinājumu pēc salizturības cikliem (skat. 73. att.).

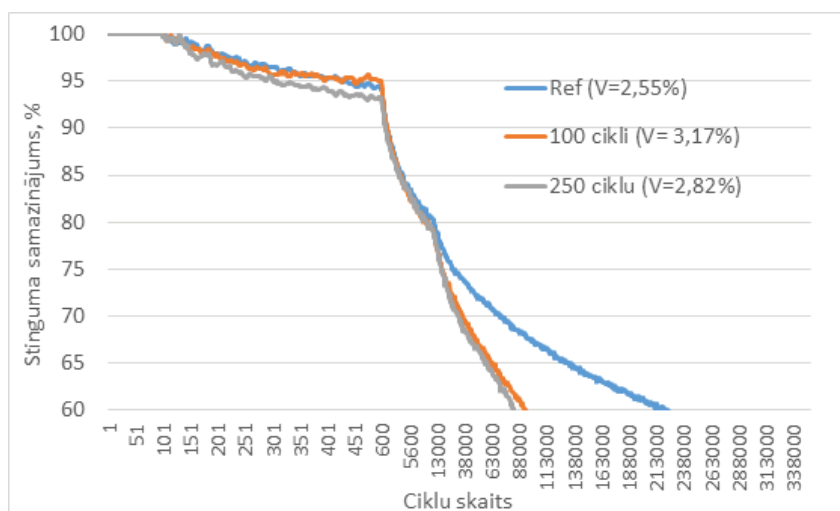
41. tabula Asfaltbetona AC 17_{surf} paraugu nogurumizturība
atkarībā no salizturības ciklu skaita

Asfaltbetona tips	Porainība,	Konstanta deformācija, $\mu\text{m/m}$	Ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam	Vidējais ciklu skaits līdz 50% stinguma moduļa samazinājumam
AC 17 _{surf} ar B70/100	2,16	0	150	> 3 390 000
	1,92			> 6 910 000
	-		200	-
	2,55		250	350 913
	3,13	100	150	> 2 614 000
	3,33		200	946 680
	3,17		250	128 873
	-	200	150	-
	1,92		200	825 321
	2,82		250	96 525
AC 17 _{surf} ar PMB 45/80-55	3,13	0	200	4 660 000
	3,21		250	46 6461
	2,63		300	208 694
	2,39	100	200	5 245 000
	3,49		250	627 286
	2,90		300	274 339
	3,37	300	200	1 531 900
	3,61		250	886 214
	2,23			1 184 200
	2,90		300	205 943

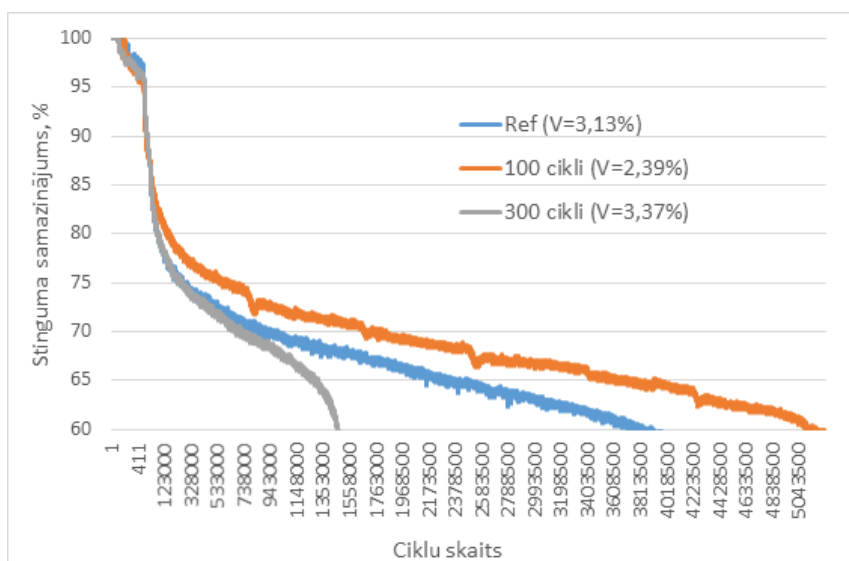


42. tabula Asfaltbetona paraugu nogurumizturības kategorijas noteikšana

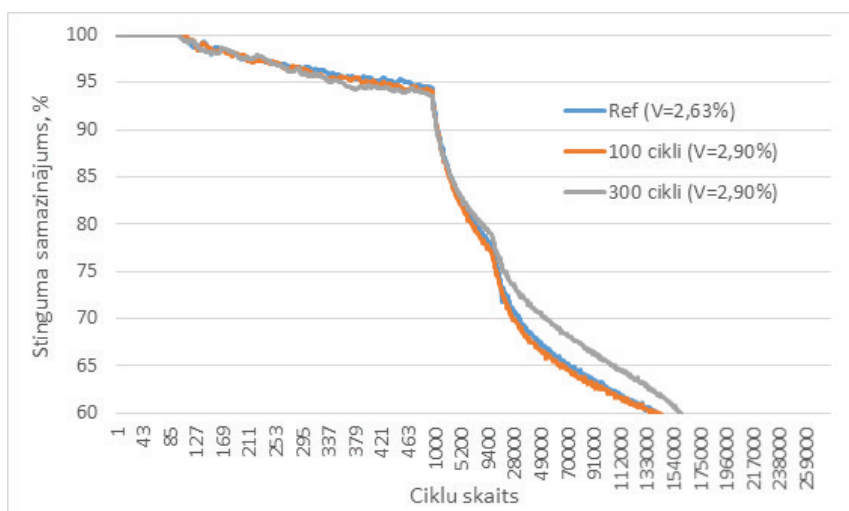
$N = A \times \epsilon_6 + B$				
N – ciklu skaits, milj.				
ϵ_6 – relatīvā deformācija, aprēķināta 10^6 cikliem				
A, B – koeficienti				
Asfaltbetona tips	Sasaldēšanas/ atkausēšanas ciklu skaits	A	B	ϵ_6
AC 11 _{surf} ar B70/100	Ref.	-0,048	12,349	236
	100	-0,0249	6,2	208
	250	-0,0146	3,739	188
AC 11 _{surf} ar PMB 45/80-55	Ref.	-0,0445	12,906	268
	100	-0,0497	14,476	271
	300	-0,0133	4,345	251



73. att. Stinguma samazinājuma dinamika AC 11_{surf} ar B70/100 paraugiem pēc 100 un 250 salizturības cikliem (10 °C, 10 Hz, 250 μm/m)



74. att. Stinguma samazinājuma dinamika AC 17_{surf} ar PMB 45/80-55 paraugiem pēc 100 un 300 salizturības cikliem (10 °C, 10 Hz, 200 μm/m)



75. att. Stinguma samazinājuma dinamika AC 17_{surf} ar PMB 45/80-55 paraugiem pēc 100 un 300 salizturības cikliem (10 °C, 10 Hz, 300 μm/m)

7.6. Ultraskaņas metode

Šajā pētījuma fāzē veikta asfaltbetona paraugu (siju) testēšana ar nesagraujošo metodi, izmantojot ultraskaņas iekārtu *Ultrasonic tester UK1401* (skat. 76. att.). Šo iekārtu plaši izmanto stingu materiālu, piemēram, cementbetona konstrukciju stiprības (t. sk. cietības, viendabīguma) noteikšanai vietās, kur testēšanai nav pieļaujama paraugu izurbšana, t. i., stiprības noteikšana ar sagraujošo testēšanu.

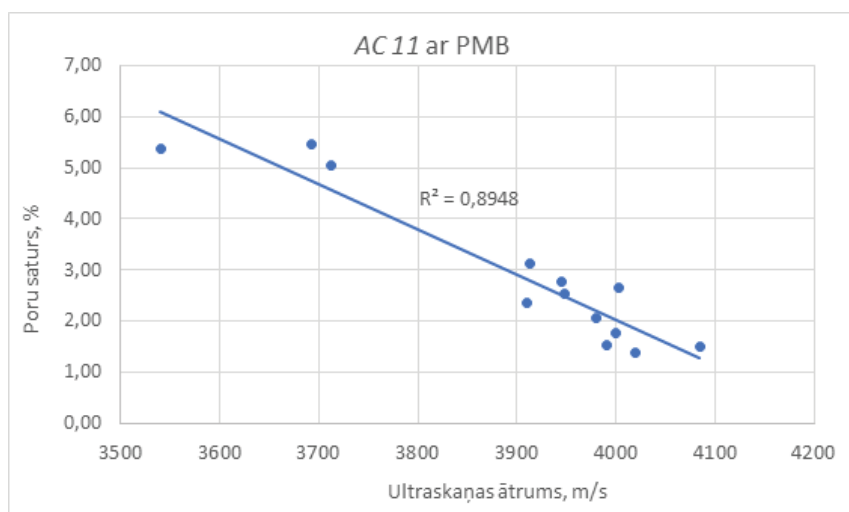


76. att. Betona nesagraujošās testēšanas iekārta Ultrasonic tester UK1401

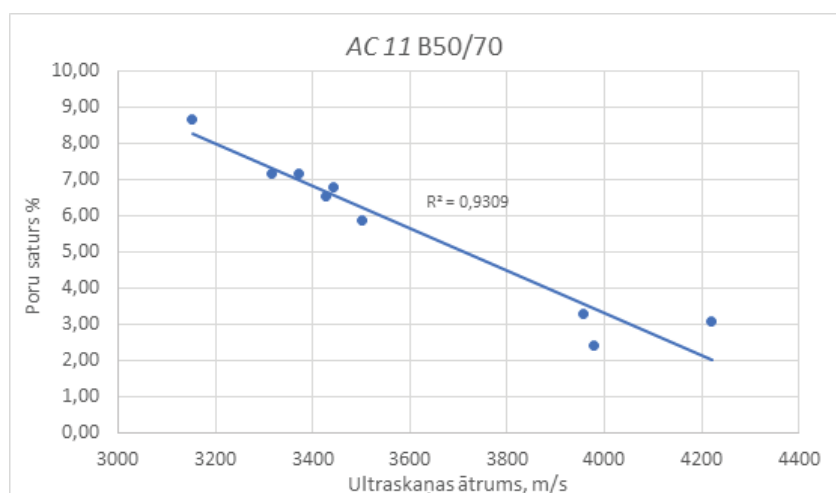
Ultraskaņas metode ir viena no visbiežāk izmantotajām nesagraujošajām testēšanas tehnoloģijām – ultraskaņas viļņu devējs raida ultraskaņas viļņus cauri konkrētajam materiālam (šajā gadījumā – asfaltbetonam); ultraskaņas viļņi materiālā atkarībā no tā cietības un viendabīguma izplatās dažādā ātrumā, un tiek mērīts laiks no to raidīšanas līdz uztveršanai. Veicot ultraskaņas testēšanu, par pamatu tika izmantota instrukcija – betona monolītās struktūras cietības testēšana ar ultraskaņas metodi, kas balstās uz standartu GOST 17624-87 “Betons. Ultraskaņas metode cietības novērtēšanai”. Saskaņā ar šo standartu monolīto struktūru testēšanu var veikt tikai ar nesagraujošām (piem., ultraskaņas) testēšanas metodēm. Standarts GOST 17624-87 ietver galvenos noteikumus betona spiedes stiprības noteikšanai uz parauga virsmas, izmantojot ultraskaņas metodi.

Standarts nosaka, ka testējamie betona paraugi ir kubiskas formas, tomēr šajā pētījumā četru punktu lieces testam sagatavoto asfaltbetona siju garenvirziena dimensijas ir daudz lielākas nekā šķērsvirziena, tāpēc daudz variāciju kā veikt ultraskaņas testēšanu nav, lai arī betona ultraskaņas testēšanas standarts iesaka ultraskaņu mērīt perpendikulāri un pa diagonāli. Standarta GOST 17624-87 instruktāžā teikts, ka vienas testēšanas zonas ietvaros vairāki mērījumi nedrīkst atšķirties vairāk kā par 2%, kas arī netika novērots, testējot asfaltbetona sijas, tāpēc rezultātus var uzskatīt par objektīviem.

77. un 78. attēlā parādīta sakarība starp AC 11 ar PMB un AC 11 ar B50/70 (references) poru saturu un ultraskaņas ātrumu – jo mazāks ir poru saturs, jo lielāks ir ultraskaņas ātrums. Līdz ar to ultraskaņas mērījumu metodi var izmantot ne tikai asfaltbetona paraugu sablīvējuma noteikšanai, bet arī mehānisko īpašību (stinguma) raksturošanai.

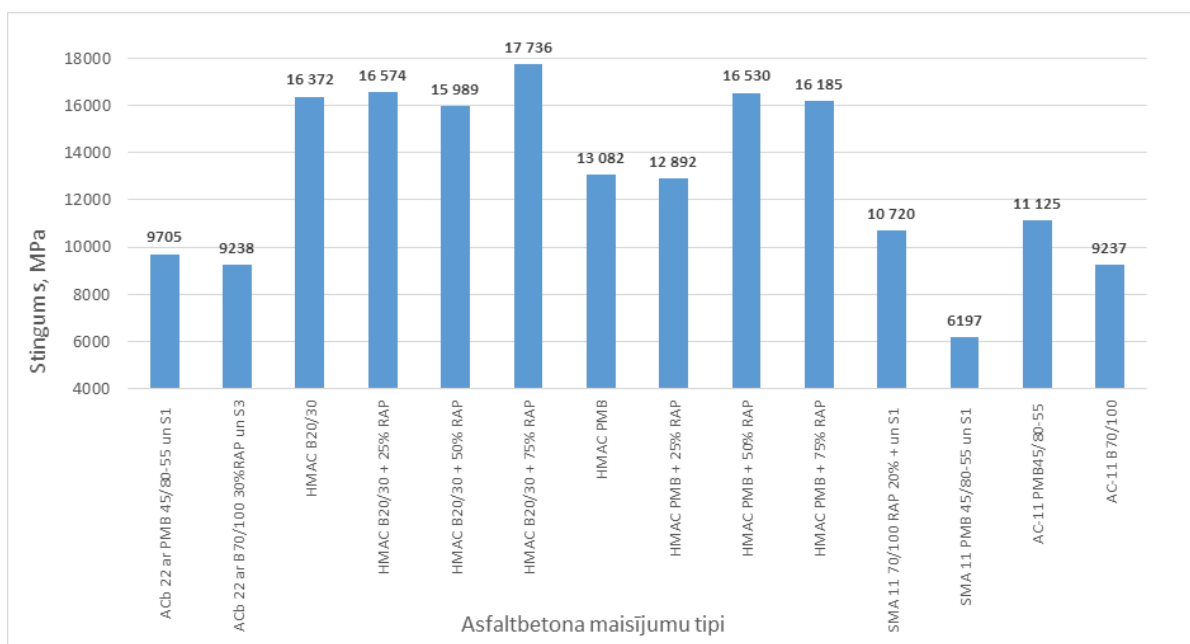


77. att. Sakarība starp AC 11 ar PMB poru saturu un ultraskaņas ātrumu

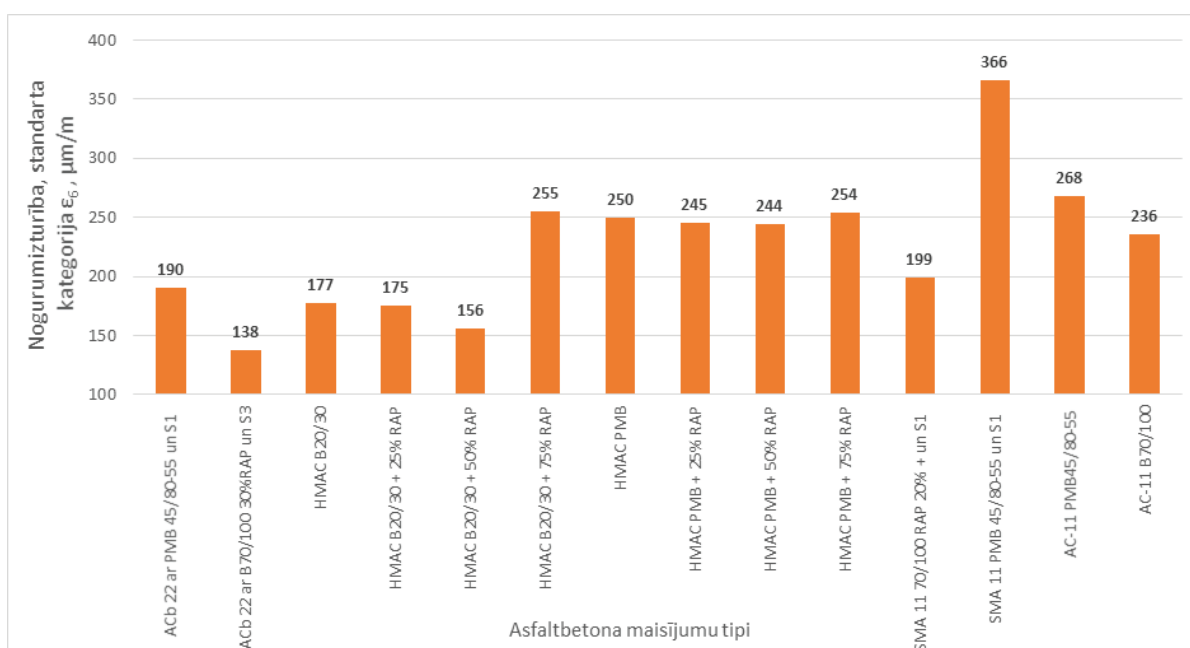


78. att. Sakarība starp AC 11 ar B50/70 poru saturu un ultraskaņas ātrumu

79. un 80. attēlā apkopoti visu šajā pētījumā izmantoto asfaltbetona maisījumu tipu stinguma rādītāji un nogurumizturības kategorijas.



79. att. Dažādu asfaltbetona maisījumu tipu stinguma rādītāji (10 °C, 10 Hz)



80. att. Dažādu asfaltbetona maisījumu tipu nogurumizturības kategorijas (10 °C, 10 Hz)

8. Rekomendācijas

Pēdējos 20 gados pasaulē ir gūti panākumi asfaltbetona standartizēto ekspluatācijas īpašību testēšanas metožu izstrādē un ieviešanā. Viena no svarīgākajām asfaltbetona seguma ekspluatācijas īpašībām ir tā nogurumizturība vidējā un zemā temperatūrā, un tas ir arī viens no lielākajiem izaicinājumiem, ar kuru šodien sastopas autoceļu inženieri. Šī bojājuma cēloņi, kā, piemēram, apakšējo slāņu zemā nestspēja, bitumena novecošanās, lielā transporta slodze u. c., ir aprakstīti šajā pētījumā. Šobrīd Latvijā, kā arī visā pasaulē tiek meklēti veidi, kā saistīt asfaltbetona seguma maisījumu projektēšanu ar ceļa segas un seguma konstruktīvo slāņu (struktūras) projektēšanu. Projektējot ceļa segas konstruktīvos slāņus, viens no svarīgākajiem aprēķinu parametriem ir elastības modulis. Svarīgi atzīmēt, ka elastības modulis E ir **materiāla** mehāniskā īpašība, kas nav atkarīga no ķermeņa formas un izmēriem. Savukārt stingums ir **struktūras** (konstrukcijas, konstrukcijas elementa utt.) spēja pretoties deformācijai, piemēram, ārējās slodzes iedarbībā.

The Strategic Highway Research Program (SHRP-A-404) pēc vairāku dažādu asfaltbetona nogurumizturības testēšanas metožu salīdzinājuma nogurumizturības novērtēšanai **rekomendē izmantot četru punktu lieces testēšanas metodi**, jo pētījumā iegūtie rezultāti ir ticami un viegli atkārtojami.

8.1. Porainība

Šī pētījuma nogurumizturības rezultāti, kurā izmantoti $AC\ 11_{surf}$ asfaltbetona sastāvi ar nemodificēto un modificēto bitumenu rāda, ka $AC\ 11_{surf}$ ar B70/100 un sablīvējumu 2%, kas atbilst CS 2019 6.2-24. tabulas prasībām (1,5 – 4%), ir gandrīz 1,5 – 2 reizes lielāka nogurumizturība salīdzinājumā ar parauga nogurumizturību, kam sablīvējums ir 6,5%. Savukārt $AC\ 11_{surf}$ ar PMB 45/80-55 un porainību 3,13% ir gandrīz 1,5 reizes nogurumizturīgāks par paraugu ar 5,88% porainību (nogurumizturība samazinās par 45%), bet paraugs ar porainību 6,19% neiztur pārbaudi.

Atbilstoši CS 2019 6.2-76. tabulas prasībām porainība asfaltbetona maisījumiem, kam $D \leq 16$, var atšķirties no darba formulas par $\pm 1,5\%$. Līdz ar to pieļaujamā porainība var sasniegt 5,5%. Kārtas sablīvējums atbilstoši CS 2019 6.2-77. tabulas prasībām var atšķirties no asfaltbetona maisījuma porainības (Maršala paliekošās porainības) par $\pm 2,5\%$, bet asfaltbetona seguma sablīvējums var sasniegt 8%.

Amerikāņu zinātnieks G. Baladi pētījumā “*Fatigue Life and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete Mixes*” norāda, ka, palielinoties porainībai no 3 līdz 4%, nogurumizturība (NFL – ciklu skaits līdz 50% stinguma samazinājumam) samazinās 7,7 reizes.

Līdz ar to **kvalitātes kontroles nolūkos CS 2019 p. 6.2.7. rekomendēts** iekļaut nogurumizturības kritēriju ieklātam segumam vai asfaltbetona maisījumam, ja:

- 1) dilumkārtu sablīvējums ir $\geq 5\%$;
- 2) apakškārtas/saistkārtas sablīvējums ir $\geq 6\%$.

Gadījumos, kad nav iespējams testēt urbtos paraugus, pārbaudi veic iepriekš paņemtam masas paraugam, laboratorijā izgatavojot paraugus (sijas) ar sablīvējumu, kurš atbilst ieklātā seguma sablīvējumam ar pielaidi $\pm 0,3\%$.

Nogurumizturībai jāatbilst 43. tabulā norādītām prasībām.

43. tabula Nogurumizturības kritēriji

AADT 7 pievestā				
Līdz 500	501 – 1500	1501 – 3500	3501 – 5000	Virs 5001
$\epsilon_{6 \text{ min}}$ 115				

8.3. RAP

Šajā pētījuma veikta *HMAC*, *AC_b 22* un *SMA 11* asfaltbetona sastāvu ar un bez nofrēzētā asfaltbetona nogurumizturības izpēte. Eksperimentāli noteikts, ka:

- 1) *SMA 11* sastāviem ar 20% *RAP*, B70/100 un *S1* dinamiskais stingums pēc 100 cikliem ir 10 720 MPa, bet *SMA 11* ar PMB 45/80-55 un *S1* – 6197 MPa (starpība $\approx 40\%$). Savukārt *SMA 11* ar 20% *RAP*, B70/100 un *S1* nogurumizturības kategorija ir ϵ_6 -199, bet *SMA 11* ar PMB 45/80-55 un *S1* – ϵ_6 -366 (starpība $\approx 45\%$);
- 2) *AC_b 22* sastāviem ar B70/100, 30% *RAP* un *S3* dinamiskais stingums pēc 100 cikliem ir 9705 MPa, bet *AC_b 22* ar PMB 45/80-55 un *S1* – 9238 MPa (starpība $\approx 5\%$). Savukārt *AC_b 22* ar B70/100, 30% *RAP* un *S3* nogurumizturības kategorija ir ϵ_6 -138, bet *AC_b 22* ar PMB 45/80-55 un *S1* – ϵ_6 -190 [*AC_b ?*](starpība $> 25\%$);
- 3) *HMAC* sastāvu ar B20/30 un PMB 25/55-80, kā arī *RAP* saturu no 0 līdz 75% pētījumos sastāviem ar PMB nogurumizturības samazinājums netika konstatēts, savukārt sastāviem ar B20/30 konstatēts neliels nogurumizturības samazinājums, t. i., ja *RAP* saturs bija 25%, nogurumizturība samazinājās tikai par 1,5%, bet, palielinoties *RAP* saturam līdz 50%, nogurumizturības samazinājums bija jau 12%.

Līdz ar to **kvalitātes kontroles nolūkā CS 2019 p. 6.2.4.4. rekomendēts** iekļaut nogurumizturības kritēriju ieklātam segumam vai asfaltbetona maisījumam:

- 1) reciklēto asfaltu var lietot $AC_{base/bin}$ asfalta maisījumos apakškārtām un saistkārtām – **līdz 50 masas %**. Asfalta maisījumiem ar **RAP saturu $\geq 30\%$** jāapmierina **44. tabulas prasības**;

44. tabula Nogurumizturības kritēriji AC_b/b

AADT_{j, pievestā}				
Līdz 500	501 – 1500	1501 – 3500	3501 – 5000	Virs 5001
$\epsilon_{6\ min}^{110}$				

- 2) reciklēto asfaltu var lietot AC_{surf} asfalta maisījumos dilumkārtām:
- līdz 15 masas %;
 - līdz 40 masas %, ja apliecināma reciklētā asfalta izcelsme, kas nodrošina atbilstošās klases minerālmateriāliem izvirzīto prasību izpildi:
 - o saistvielas kvalitātei jāatbilst 6.2-12. tabulas prasībām;
 - o nofrēzētā asfalta minerālmateriālu izcelsmi un tajos esošo minerālmateriālu atbilstību no būvobjektiem, kas būvēti saskaņā ar Ceļu specifikāciju 2010 (vai jaunākas redakcijas) prasībām, drīkst apliecināt, izmantojot datus no būvobjektu izpildedokumentācijas par būvniecībā lietotajiem būvmateriāliem;
 - o **RAP saturam no 30 līdz 40% jānovērtē nogurumizturība atbilstoši prasībām**, kas minētas 45. tabulā.

45. tabula Nogurumizturības kritēriji AC_{surf}

AADT_{j, pievestā}				
Līdz 500	501 – 1500	1501 – 3500	3501 – 5000	Virs 5001
$\epsilon_{6\ min}^{115}$	$\epsilon_{6\ min}^{115}$	$\epsilon_{6\ min}^{115}$	$\epsilon_{6\ min}^{115}$	$\epsilon_{6\ min}^{115}$

Nākotnes pētījumu virzieni

Šajā atskaitē aprakstīti asfaltbetona nogurumizturības pamati, bet ir vairāki jautājumi, kurus vēl nepieciešams apskatīt. Šeit minēti divi potenciālie.

Lai iegūtu uzticamus datus, pie viena slodzes līmeņa būtu jāveic vēl lielāks testu skaits, turklāt, ja vēlamies novērtēt nogurumu ilgtermiņā (veicot desmitiem miljonu ciklu), tad šie testi būs ļoti laikietilpīgi. Tomēr ir iespējams aptuveni aplēst šo ilgo testu rezultātus no īsāku, ne tik ilgu testu rezultātiem, atrodot kādu atbilstošu paņēmieni, piemēram, izmantojot ekstrapolācijas metodi vai simulējot ilgāka perioda datus no īsāka laika perioda datiem. Lai arī kādu metodi izvēlētos, šeit būtu nepieciešams starpdisciplinārs pētījums, jo šis jautājums jāaplūko gan no būvniecības, gan no matemātikas un statistikas viedokļa.

Šajā darbā laboratorijā tika testēti viena asfalta slāņa paraugi, taču segums tikai no viena asfalta slāņa tiek izbūvēts vienīgi zemas intensitātes ceļiem. Noslogotāku ceļu gadījumā to konstrukcijā ir vairāk nekā viens slānis, un uz noguruma laiku iespaidu atstāj katra atsevišķā slāņa īpašības un starpslāņu sasaiste. Turklāt, izbūvējot ceļa konstrukciju dabā, tā nekad perfekti neatbildīs projektētajai.

Otrs pētījumu virziens būtu jau visa seguma noguruma analīze un pāreja no laboratorijas uz lauka apstākļiem, proti, laboratorijā iegūtu vairākslāņu paraugu noguruma īpašību pētīšana. Dabā tiktu izbūvēts identisks asfalta segums ar sensoriem, kas mēritu relatīvo deformāciju tā apakšējā slānī. Šādā pētījumā būtu iespējams salīdzināt seguma konstrukcijas un laboratorijas paraugu sabrukuma atkarību no slogošanas reižu skaita, tādā veidā pārbaudot atšķirību starp laboratorijas testiem un situāciju reālos ekspluatācijas apstākļos.

Secinājumi

1. Iegūtie rezultāti rāda, ka *RAP* izmantošana asfaltbetona sastāvos var samazināt nogurumizturības rādītājus, kas jāņem vērā sastāvu projektēšanā, piemēram, izvēloties atjaunojošo piedevu un/vai atbilstošu izejas bitumena tipu.
 - 1.1. Analizējot pamatkārtai un/vai saistkārtai lietotā AC_b 22 tipa asfaltbetona nogurumizturības rādītājus, noteikts, ka sastāvs AC_b ar PMB un S1 klases šķembām uzrāda par 25% lielāku nogurumizturību salīdzinājumā ar AC_b ar bitumenu B70/100, 30% *RAP* un S3 klases šķembām.
 - 1.2. Balstoties uz asfaltbetona seguma virskārtai lietotā SMA 11 tipa asfalta nogurumizturības rādītāju analīzi noteikts, ka SMA 11 ar PMB un S1 klases šķembām piemīt par 45% augstāka nogurumizturība salīdzinājumā ar SMA 11 ar bitumenu B70/100, S1 klases šķembām un 20% *RAP*.
2. Veicot bitumena saistvielas tipa ietekmes uz virskārtas asfaltbetona AC 11 nogurumizturības rādītājiem analīzi, noteikts, ka AC 11 ar PMB uzrāda par 10% augstāku nogurumizturību salīdzinājumā ar AC 11 ar bitumenu B70/100.
3. Analizējot AC 11 tipa asfaltbetona salizturības rādītājus, kas noteikti atbilstoši šajā pētījumā izstrādātajai metodei, kura balstās uz standarta AASHTO C 666 metodi, noteikts, ka pēc 100 un 250 sasalšanas/atkušanas cikliem asfaltbetona sastāviem AC 11 ar PMB ir no 12 līdz 20% lielāka salizturība nekā AC 11 ar bitumenu B70/100.
4. Analizējot asfaltbetona AC 11 ar PMB salizturības rezultātus pēc 100 un 300 sasalšanas/atkušanas cikliem noteikts, ka pēc 100 ciklu veikšanas nogurumizturības rādītāji netika ietekmēti, bet pēc 300 cikliem nogurumizturība samazinājās tikai par 6%.
5. Iegūtie rezultāti rāda, ka nepietiekami sablīvētai asfaltbetona kārtai ir ievērojami mazāka nogurumizturība, jo paraugi ar porainību $\geq 6\%$ uzrādīja nogurumizturības samazinājumu $\geq 45\%$ salīdzinājumā ar 2 – 4% porainības paraugiem. Tādējādi, veicot objekta gala kvalitātes kontroli, no sablīvējuma parametriem iespējams jau laicīgi secināt, vai asfalta kārta apmierina atbilstošos nogurumizturības priekšnosacījumus.
6. Analizējot AC 11 tipa asfaltbetona ar bitumenu B70/100 un dažādu sablīvējumu stinguma rezultātus noteikts, ka, palielinoties poru saturam no 2 – 4% līdz 6 – 8%, seguma stingums samazinās par 40 – 50%, t. i., no 10 000 – 12 000 MPa līdz 6000 – 8000 MPa.
7. Analizējot *RAP* satura ietekmi uz stingumu noteikts, ka visiem pētījumā izmantotajiem asfaltbetona sastāviem ar *RAP* stingums palielinās, savukārt nogurumizturības samazinājums, ja *RAP* saturs maisījumā ir 20 – 30%, var sasniegt 40 – 50%. Tāpēc nogurumizturības testa izmantošana kvalitātes kontrolei dotu iespēju uzlabot asfaltbetona ekspluatācijas īpašības, palielinot *RAP* saturu.
8. Nogurumizturības testēšanas laika samazināšanai piedāvāts nogurumizturības testiem izvēlēties ticamības intervālu atkarībā no autoceļu satiksmes intensitātes un klases, kas dotu iespēju samazināt testējamo paraugu skaitu. Tomēr sākotnējai tipa testēšanai jāveic testēšana atbilstoši standarta prasībām, bet turpmāko testēšanu kvalitātes kontroles nolūkā, ja nemainās sastāvs un izejmateriāli, pieļaujams veikt mazākam

paraugu skaitam.

9. Iegūtie rezultāti rāda, ka *SMA* sastāviem salīdzinājumā ar *AC* sastāviem, projektētiem ar vienādiem izejmateriāliem, ir vidēji labāki stinguma rādītāji visās sloģošanas frekvencēs. Turpmākajos pētījumos tiks salīdzināti nogurumizturības rādītāji.

Literatūra

1. Ali Qabur (2018). Fatigue Characterization of Asphalt Mixes with Polymer Modified Asphalt Cement. Master thesis.
<https://core.ac.uk/download/pdf/161809873.pdf>
2. Sure-Seal Pavement Maintenance Inc. (2020). Alligator Cracking/Fatigue Cracking in Pavement.<http://maintain.suresealpavement.com/engage/alligator-cracking-fatigue-cracking-in-pavement-11118>
3. Pavement interactive (2020). Fatigue cracking.
<https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/fatigue-cracking/>
4. Anthony P. Stubbs. Fatigue Behaviour of Hot Mix Asphalt for New Zealand Pavement Design. Master thesis.
<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/6520>
5. H. Wen (2001). Fatigue performance evaluation of WesTrack asphalt mixtures based on viscoelastic analysis of indirect tensile test.
<https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/3354>
6. S. Abo-Qudais and I. Shatnawi (2007). Prediction of bituminous mixture fatigue life based on accumulated strain. Constr. Build. Mater., vol. 21, no. 6, pp. 1370–1376.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061805002874>
7. F. M. Nejad, E. Aflaki, and M. A. Mohammadi (2010). Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 7, pp. 1158–1165.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180900436X>
8. CONTROLS Group LCC (2020). Testing equipment
https://www.controls-group.com/ita/asfaltomiscele-bituminose-testing-equipment/trapezoidal-two-point-bend-test-for-utm-ast-pro-and-asphaltcube_.php
9. Doo-Yeol Yoo et al (2019). Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials. Journal of Materials Research and Technology, 2019, Vol. 8., Issue 1, Pages 827-839 Doi: 10.1016/j.jmrt.2018.07.001
https://www.researchgate.net/publication/326753644_Self-healing_capability_of_asphalt_concrete_with_carbon-based_materials
10. Delft TU (2020). Department of Engineering Structures
<https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/engineering-structures/sections-labs/pavement-engineering/laboratory/facilities/>
11. Surface Tech LLC (2020). Technical review of Indirect Tensile Strength testing advises caution in relying on results
<https://surface-tech.com/tag/indirect-tensile-strength-testing/>
12. Daniel Perraton et al (2019). Link between different bottom-up fatigued law coefficients of mechanical-empirical pavement design software. Construction and Building Materials, Vol. 216, 2019, Pages 552-563, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.256.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819311468>

13. R. J. Barlow (1989). Statistics. A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences. ISBN:0471922943
14. Transportation Research Board (TRB); National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2010). Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14360>.
15. H. Sharma, and A. K. Swamy (2016). Development of probabilistic fatigue curve for asphalt concrete based on viscoelastic continuum damage mechanics. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.07.004
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301511>
16. Douglas G. Altman, David Machin, Trevor N. Bryant (2000). Statistics with Confidence: Confidence Intervals and Statistical Guidelines, 2nd Edition. ISBN: 978-0-727-91375-3
17. Austroads (2019). Guide to Pavement Technology Part 2. Pavement Structural Design.
18. Jameson, G (2013). Technical basis of Austroads Guide to Pavement Technology: Part 2: Pavement Structural Design, research report ARR 384, ARRB Group, Vermont South, Vic. Research report ARR, 384