

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte

Transportbūvju institūts

Viktors HARITONOVŠ

Doktora studiju programmas „Būvzinātne” doktorants

**PALIEKOŠO DEFORMĀCIJU ATTĪSTĪBAS
DINAMIKA ASFALTBETONA SEGUMA
MATERIĀLIEM**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
Juris-Rihards Naudžuns

Rīga, 2010

ANOTĀCIJA

Asfaltbetona seguma garenvirziena deformāciju (rišu) veidošanās ir būtiskākais ceļa brauktuves defekta veids. Šī problēma aktuāla ne tikai Latvijā, bet arī visā pasaulē. Šādi ceļa bojājumi ievērojami samazina asfaltbetona seguma kalpošanas laiku un transporta caurlaidspēju, satiksmes drošības un komforta līmeni, palielina ceļa seguma ekspluatācijas un uzturēšanas izdevumus, ierobežo pārvadājumu ātrumus un ass slodzes. Tā kā asfaltbetona sega ir pats dārgākais ceļa konstrukcijas materiāls, paliekošo deformāciju prognozēšanai ir liela nozīme. Tas ļauj laicīgi un izmaksu ziņā izdevīgi izplānot ceļa infrastruktūras remontdarbus.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt, izmantojot tradicionālās un netradicionālās izejvielas, asfaltbetona sastāvus un noteikt to deformāciju attīstības dinamiku, šim nolūkam lietojot izstrādāto ceļa segumu paliekošo deformāciju prognozēšanas metodiku, kas balstīta uz detalizētu ārējo faktoru izvērtējumu.

Promocijas darbā ir izstrādāti un savstarpēji salīdzināti netradicionālo un tradicionālu asfaltbetona sastāvu īpašības. Problēmas risinājums ietver netradicionālās pildvielas - martena tēraudkausēšanas sārņu, kas ir tērauda ražošanas blakusprodukts un stirols-butadiēns-stirols SBS polimērmodificētās saistvielas izmantošanu noturīgu pret plastiskajām deformācijām asfaltbetona sastāvu izstrādei.

Promocijas darbā ir izstrādāts *ESAL* aprēķina vienādojumu laika periodam ar maksimālo augstu seguma ekspluatācijas temperatūru.

Piedāvāta paliekošo deformāciju prognozēšanas metodika, kas balstīta uz viskozi-elastīgu sistēmu *VESYS* aprēķinu modeli ar karstajam (pavasara-vasaras) periodam konkretizētu *ESAL* lielumu.

Noteikta tradicionālu un netradicionālu asfaltbetona sastāvu paliekošo deformāciju attīstības dinamika.

Izstrādāta asfaltbetona seguma kvalitātes nodrošinājuma sistēmas koncepciju intensīvi noslogotām Latvijas ielām un ceļiem, kas dotu iespēju veikt sistemātisku vērtējumu.

Darba autors ir piedalījies VAS „Latvijas Valsts ceļi” organizētā pētījumu programmā „Jauno tehnoloģiju pielietošanas izpēte”. Iegūtie rezultāti tika izmantoti Latvijas ceļu būves tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasību pilnveidošanai.

Darba autors TOP projekta „Rīgas ielu, transportbūvju un satiksmes vadības attīstības koncepcija 2008. – 2018. gads” ietvaros veica kvalitātes nodrošinājuma sistēmas koncepcijas izstrādi noslogotām ar smagu satiksmi Rīgas krustojumiem un pieturvietām.

ANNOTATION

Asphalt pavement longitudinal deformations (rutting) is the most significant type of the carriageway defects. This problem is urgent not only in Latvia, but also worldwide. Such road damages considerably reduce service life and carrying capacity of asphalt pavement, the traffic safety and comfort level, increase the asphalt pavement operational and maintenance costs, limit velocity of transportation and axle load. As asphalt pavement layer is the most expensive road building material, prediction of permanent deformations is of large importance. It allows planning the road infrastructure repair works timely and cost efficiently.

The aim of the promotion paper is to develop asphalt pavement compositions by using conventional and unconventional raw materials and to determine the dynamics of their deformations by using for this purpose the developed prediction methods of road pavement permanent deformations on the basis of the comprehensive analysis of external factors.

Properties of conventional and unconventional asphalt concrete compositions have been developed and mutually compared in the promotion paper. The *ESAL* estimation equation for operating the road pavement during the highest temperature period has been developed in the promotion paper.

A method of predicting permanent deformations has been offered based on the estimation model of *VESYS* viscose-resilient systems, with the *ESAL* values specified for the hot (spring-summer) period.

The dynamics of permanent deformation development for conventional and unconventional asphalt concrete compositions have been determined.

The concept of the asphalt pavement quality provision system has been elaborated for the intensively loaded Latvian streets and roads, thus providing an opportunity for performing the systematic evaluation.

The author of the paper has participated in the “Research on Application of New Technologies” research programme organised by the State Joint Stock Company “Latvian State Roads”. The obtained results have been used to improve requirements of the Latvian road building technical regulations “Road Specifications 2010”.

Within the framework of the TOP project “The Concept of Riga Streets, Transport Structures and Traffic Management Development for 2008 – 2018”, the author of the paper has developed a concept of the quality provision system for the heavily loaded Riga crossings and transport stops.

SATURS

SATURS.....	4
1. IEVADS	6
1.1. Pētījumu objekts	6
1.2. Problēmas aktualitāte.....	7
1.3. Esošā stāvokļa raksturojums.....	8
1.4. Darba mērķis un uzdevumi.....	10
2. ANALĪTISKĀ DAĻA.....	13
2.1. Asfaltbetona īpašības no ķīmiskā aspekta	13
2.2. Asfaltbetona īpašības no fizikālā un mehāniskā aspekta.....	14
2.2.1. Spriegoti deformēts asfaltbetona seguma stāvoklis zem statiskās slodzes.....	14
2.2.2. Spriegoti deformēts asfaltbetona seguma stāvoklis zem kustīgā riteņa slodzes.....	16
2.2.3. Spriegumu sadalījums vienslāņa un vairākslāņu sistēmās	18
2.2.3.1. Vienslāņa sistēma	18
2.2.3.2. Divu un vairāk slāņu sistēma.....	20
2.2.4. Rišu veidošanās mehānisms	21
2.2.5. Rišu klasifikācija	23
2.2.5.1. Nodiluma rises.....	23
2.2.5.2. Iespieduma rises	24
2.2.5.3. Iespieduma-izspieduma rises.....	24
2.2.5.4. Jauktas izcelsmes rises	25
2.3. Spriegumu un deformāciju modelēšana bituminēto maisījumu segumu slāņos.....	25
2.3.1. Lineārā un nelineārā elastības teorija	26
2.3.2. Viskozi-elastīgā metodoloģija	27
2.3.2.1. Huka un Ņūtona modelis	28
2.3.2.2. Maksvela modelis	29
2.3.2.3. Kelvina modelis.....	31
2.3.2.4. Birgera modelis	32
2.3.2.5. Paplašinātie reoloģiskie modeļi.....	34
2.3.3. Viskozi-elastīgi-plastiskā metodoloģija	37
2.3.4. Mikromehāniskā metodoloģija.....	38
2.3.5. Empīrisku funkciju vienādojumu modeļi	40
2.4. Asfaltbetona sastāvi un izejmateriālu īpašības	46

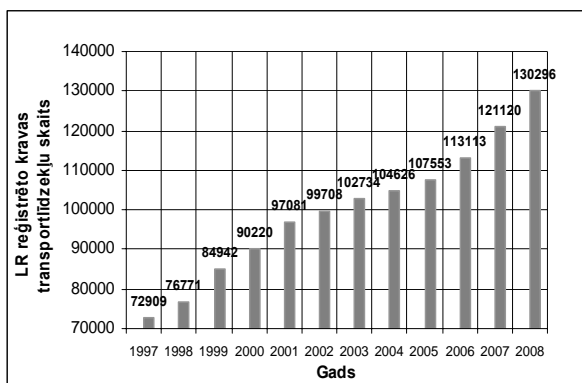
2.4.1. Saistviela.....	47
2.4.2. Pildviela.....	48
2.4.3. Aizpildītājs	50
2.5. Asfaltbetona sastāvu projektēšana.....	51
2.5.1. Asfaltbetona segumu tipi.....	52
2.5.2. Maršala metode	53
2.5.3. Hvīma metode	54
2.5.4. <i>SUPERPAVE</i> metode	54
2.6. Apkopojums un secinājumi par 2. nodaļu	55
3. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	57
3.1. Bitumena saistvielas izvēle.....	57
3.2. Pildvielas izvēle.....	58
3.3. Asfaltbetona sastāvu projektēšana un īpašības.....	60
3.4. Testēšanas iekārtas un metodika.....	65
3.4.1. Aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests	66
3.4.2. Aksiālais un triaksiālais šļūdes tests.....	67
3.4.3. Riteņu sliežu (rišu) veidošanās testa (<i>Wheel Tracking test</i>) iekārtas.....	67
3.4.4. Testēšanas metožu izvēle.....	70
3.5. Apkopojums un secinājumi par 3. nodaļu	71
4. PALIEKOŠO DEFORMĀCIJU CĒĻOŅI UN NOVĒRTĒŠANAS METODIKA	73
4.1. Asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūra	73
4.2. Transporta slodze.....	75
4.3. Asfaltbetona paraugu deformatīvo īpašību maiņa atkarībā no temperatūras	79
4.4. Ekvivalentā standarta ass slodze karstajā vasaras periodā Latvijā.....	83
4.5. Apkopojums un secinājumi par 4. nodaļu	87
5. PALIEKOŠĀS DEFORMĀCIJAS UN TO PROGNOZĒŠANA	89
5.1 Aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests	89
5.2. Riteņu sliežu veidošanās tests (<i>Wheel Tracking test</i>).....	92
5.3. Rišu veidošanās dinamikas prognozēšana.....	94
5.4. Apkopojums un secinājumi par 5. nodaļu	98
6. KVALITĀTES NODROŠINĀŠANAS SISTĒMAS KONCEPCIJA.....	100
GALVENIE SECINĀJUMI	107
LITERATŪRA	109

1. IEVADS

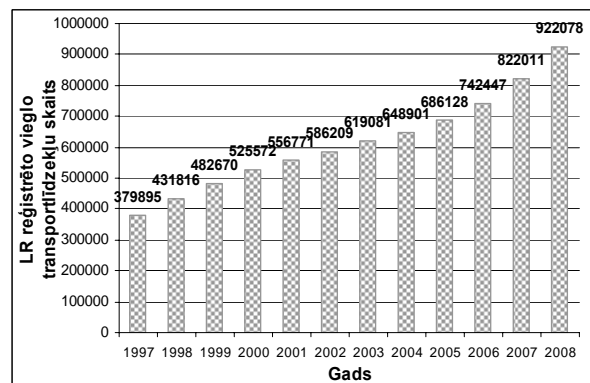
1.1. Pētījumu objekts

Karstais asfaltbetona maisījums ir mākslīgs materiāls, ko iegūst, apvienojot minerālmateriālus (šķembas, smilti, atsijas, dolomītmiltus) ar organisko saistvielu – ceļu bitumenu. Pēc apvienošanas notiek sarežģīti fizikālķīmiskie procesi, kuru raksturs lielā mērā ir atkarīgs no izejmateriālu īpašībām. Asfaltbetons ir asfaltbetona maisījums sablīvētā veidā. Tas pēc savas struktūras ir daudzkomponentu konglomerātu sistēma, kurā minerālā daļa atrodas bitumena saistvielas vidē, veidojot vienotu monolītu. Asfaltbetona struktūru raksturo pildvielu granulometriskais sastāvs, forma un īpašības, kā arī bitumena saistvielas struktūra un īpašības. Bitumena saistviela satur vismaz četrus galvenos komponentus, kas ir organiskas izcelsmes un kuru molekulmasa, gaistamība, struktūra u. c. īpašības aptver plašu diapazonu. Pildvielas tāpat veido vairāki ķīmiskie savienojumi, bet jau neorganiskas izcelsmes. Asfaltbetons spēj pildīt paredzētās funkcijas tikai tad, ja starp to veidojošajiem komponentiem pastāv pietiekami stipra adhezīvā saite, kas ir atkarīga no komponentu īpašībām un izgatavošanas un ieklāšanas tehnoloģijas [1–2]. Asfaltbetona ekspluatācijas īpašības ir atkarīgas gan no iekšējiem (asfaltbetona un izejmateriālu īpašībām), gan ārējiem faktoriem (transporta slodzes rakstura, temperatūras, saules radiācijas, lietus). Temperatūras maiņa krasi ietekmē asfaltbetona deformatīvās īpašības, kas pamatā nosaka tā darbību ceļa segumā. Augstā temperatūrā tam piemīt viskozi-plastiska materiāla īpašības, bet zemā – elastīgi-trauslas īpašības.

a)



b)



1.1. att. Latvijā reģistrēto transportlīdzekļu skaits: a) kravas; b) vieglo [3-4]

1.2. Problēmas aktualitāte

Ceļa segas konstrukcija mūsdienās ir pakļauta ļoti lielai smagā transporta ass slodzei un intensitātei, kas pēdējos gados turpina pieaugt (sk. 1.1. att.). Satiksmes drošību un ērtību lielā mērā nosaka brauktuves segas kvalitāte. Braucējiem no visiem tās kvalitātes raksturlielumiem būtiskākie ir segas līdzenums un saķere (raupjums). Pastāv trīs galvenie asfaltbetona seguma bojājuma veidi – rises, noguruma plaisas un termiskās plaisas. Rišu parādība ir uzskatāma par nozīmīgāko ceļa seguma bojājuma veidu, un tā novēršanai nepieciešama liela ceļa vai ielas posma atjaunošana. Paliekošās deformācijas jeb rises uz ceļa vai ielas ir automobiļu akvaplanēšanas galvenais cēlonis. Līdz ar to šā ceļa seguma konstrukcijas bojājuma veida minimizēšana dos iespēju būtiski uzlabot satiksmes drošību un ērtību. Jāatzīmē, ka ceļos ar intensīvu un smagu satiksmi segas rišu problēmas ir pastāvējušas vienmēr, sk. 1.2. attēlu.

a)



b)



1.2. att. Rises senās Romas impērijas ratu ceļā (a) un mūsdienu autoceļā (b)

ASV Federālā ceļu administrācija klasificējusi ceļu rises pēc to bīstamības pakāpes: 1) zema – 6–13 mm; 2) vidēja – 13–25 mm; 3) augsta – >25 mm [5]. Saskaņā ar vairāku zinātnieku pētījumiem, rises dziļums ≥ 13 mm var būt bīstams, ja braukšanas ātrums ir lielāks par 80 km/h [6–7]. Latvijas ielās un ceļos veiktie mērījumi rāda, ka lielas transporta slodzes gadījumā veidojas rises, kas ir ievērojami lielākas par 13 mm (sk. 1.3. att.). Savukārt saskaņā ar tehnisko noteikumu prasībām garenlīdzenuma mērījumos attālums no seguma virsmas līdz mērlatas plaknei nedrīkst pārsniegt 6 mm [8].



1.3. att. Ceļa segas līdzenuma mērījumi ar 3 m garu mērlatu un lineālu

1.3. Esošā stāvokļa raksturojums

Latvijā pēdējos divdesmit gados, krasi mainoties politiskajai un ekonomiskajai situācijai, notikušas būtiskas pārmaiņas arī ceļu un transporta nozarē. Mainījušās kvalitātes nodrošinājuma prasības, pārejot no agrāk lietotajiem GOST standartiem uz *FAS (Finnish Asphalt Specification)* metodiku un no 2004. gada – uz Eiropas normatīviem (EN; sk. 1.1. tabulu) [9]. Īsā laika periodā asfaltbetona ražotājiem bija jāievieš jaunas tehnoloģijas, testēšanas metodes un jāadaptē jaunie EN standarti, kas sekmētu izstrādāt kvalitatīvākus un ilgmūžīgākus asfaltbetona maisījumu sastāvus.

Mainoties tehniskajai dokumentācijai, mainījušies arī asfaltbetona maisījumu sastāvi. Asfaltbetona maisījumu A, Б, В, Г un Д vietā, kuri projektēti saskaņā ar GOST metodēm, asfaltbetona seguma dilumkārtas izbūvei plaši sāka izmantot šķembu mastikas asfaltbetonu (SMA) un blīvā asfaltbetona (AC) maisījumus, projektētus līdz 2004. gadam saskaņā ar tehnisko noteikumu „Ceļš 94” un kopš 2004. gada – ar Autoceļu specifikācijas prasībām [10 – 11]. Šie Latvijas apstākļiem jaunie sastāvi ir vairāk nekā 40 gadu ilgstošs pasaules vadošo pētnieku pētījumu objekts. Jaunajiem asfaltbetona maisījumu tipiem atšķirībā no parastajiem jeb tradicionālajiem sastāviem ir specifiskas prasības. Tiem nepieciešama jauna pieeja sastāva projektēšanā, ražošanā un izgatavošanā.

Izmantojot šobrīd ražotājiem pieejamās tehnoloģijas, izejvielas un praktiskās iemaņas, Latvijā izgatavotie un ieklātie SMA un AC asfaltbetona maisījumi uzrāda lielas plastiskās deformācijas smagā transporta slodzes iedarbībā.

Dažādu laika periodu aktuālā tehniskā dokumentācija Latvijā

Laika periods	Tehniskās dokumentācijas nosaukums	Asfaltbetona un izejmateriālu pārbaudes metodika	Karstā asfaltbetona seguma tipi
Līdz 1994. gadam	ГОСТ 9128-84	ГОСТ	A, Б, В, Г, Д
No 1994. līdz 2004. gadam	<i>Road 94</i>	<i>FAS</i> metodes	ABS, ABT, ABD, AG
No 2004. līdz 2009. gadam	Autoceļu specifikācijas 2005	Eiropas standarti EN	AC, SMA, PA, AC _b
No 2010. gada	Ceļu specifikācijas 2010		

Attīstoties ceļu būvmateriālu industrijai, pasaulē pieaug prasības izejmateriālu un asfaltbetona kvalitātei. Kļuva plašāks asfaltbetona izejvielu modifikatoru un stiegrojošo piedevu klāsts. Jāatzīmē, ka pēdējos gados strauji augošās Latvijas ekonomikas apstākļos ievērojami pieauguši ceļu būvdarbu apjomi un izmaksas. Tomēr asfaltbetona un bitumena saistvielas modifikatori, kas uzlabo materiāla mehāniskās īpašības, nav guvuši plašu lietojumu. Tāpat pēdējo gadu aktuālajās tehniskajās prasībās nebija iekļauti tādi asfaltbetona ekspluatācijas īpašību mehāniskie radītāji, kā, piemēram, paliekošo deformāciju veidošanās ātrums, nogurums un stingums. Tā rezultātā Latvijā projektētie maisījumi gan apmierināja tehnisko specifikāciju prasības, tomēr smagas transporta slodzes iedarbībā tajos veidojas lielas rīses.

Pastāvošā situācija novedusi pie tā, ka vairāk nekā pusei pēdējos gados rekonstruētajām un intensīvi slogotajām ielām un ceļiem ir novērotas asfaltbetona segas garenvirziena deformācijas rīteņu sliekšņu vietās jeb rīses.

Saskaņā ar Valsts stratēģiskā ietvardokumenta (VSID) 2007.–2013. gada periodam esošās situācijas analīzi, tajā ir uzrādītas transporta nozares vājās puses: liels satiksmes negadījumu skaits un neapmierinošs autoceļu stāvoklis – nolietojums, kas var novest pie draudiem – konkurētspējas zaudēšanas tranzītpakalpojumu sniegšanā [12].

Promocijas darbs ir veltīts tradicionālo un netradicionālo SMA un AC asfaltbetona maisījumu izstrādei, šo sastāvu paliekošo deformāciju attīstības dinamikas izpētei ar Latvijas un ES apstākļiem jaunām, standartizētām ekspluatācijas īpašību testēšanas metodēm, kā arī

perspektīvas prognozēšanas metodikas un kvalitātes nodrošināšanas sistēmas izstrādei. Promocijas darbā izmantotā metodika un iegūtie rezultāti varētu sekmēt jauno tehnoloģiju ieviešanu asfaltbetona ražošanas industrijā un problēmas pakāpenisku atrisināšanu. Tā kā asfaltbetona sega ir pats dārgākais ceļa elements, savukārt ceļa segas kvalitāte ir svarīgākais satiksmes kvalitāti un drošību, kā arī transporta un ceļa uzturēšanas izmaksas ietekmējošais faktors, ar jaunu ekspluatācijas īpašību testēšanas metožu ieviešanu kvalitātes kontrolē Latvijā iespējams panākt ievērojamu ekonomisko efektu.

Jāatzīmē, ka paliekošo deformāciju jeb rišu problēma ir komplicēta un vienā darbā to nav iespējams atrisināt. Tādējādi iezīmēti un izvēlēti galvenie pētījumu virzieni, kuriem ir lielākā ietekme uz paliekošo deformāciju veidošanos:

- asfaltbetona seguma sasilšanas temperatūras izpēte;
- transporta slodzes izpēte un *ESAL* mērvienības ieviešana paliekošo deformāciju pētījumos;
- *ESAL* aprēķinu vienādojuma izstrāde periodam ar augstu seguma ekspluatācijas temperatūru;
- paliekošo deformāciju attīstības prognozēšana, izmantojot ekspluatācijas īpašību testēšanas metodes – riteņu sliežu un cikliskās spiedes testus;
- pētījuma objektu – tradicionālo un netradicionālo asfaltbetona sastāvu izstrāde un to īpašību salīdzināšana;
- kvalitātes nodrošināšanas sistēmas koncepcijas izstrāde.

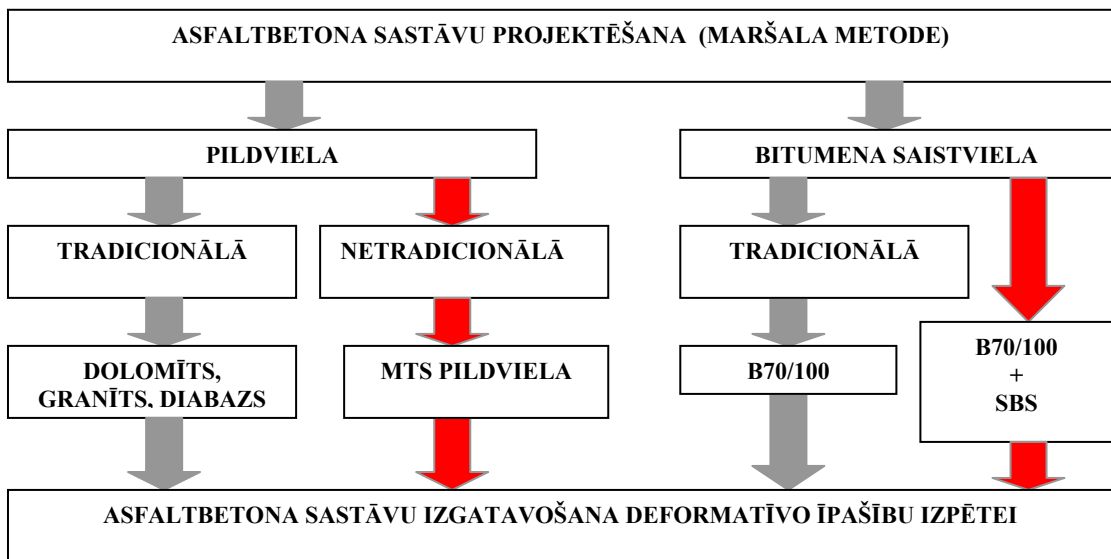
1.4. Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir, izmantojot tradicionālās un netradicionālās izejvielas, izstrādāt asfaltbetona sastāvus, noteikt to deformāciju attīstības dinamiku, pielietojot izstrādāto ceļa segumu paliekošo deformāciju prognozēšanas metodiku, kas balstīta uz detalizētu ārējo faktoru izvērtējumu.

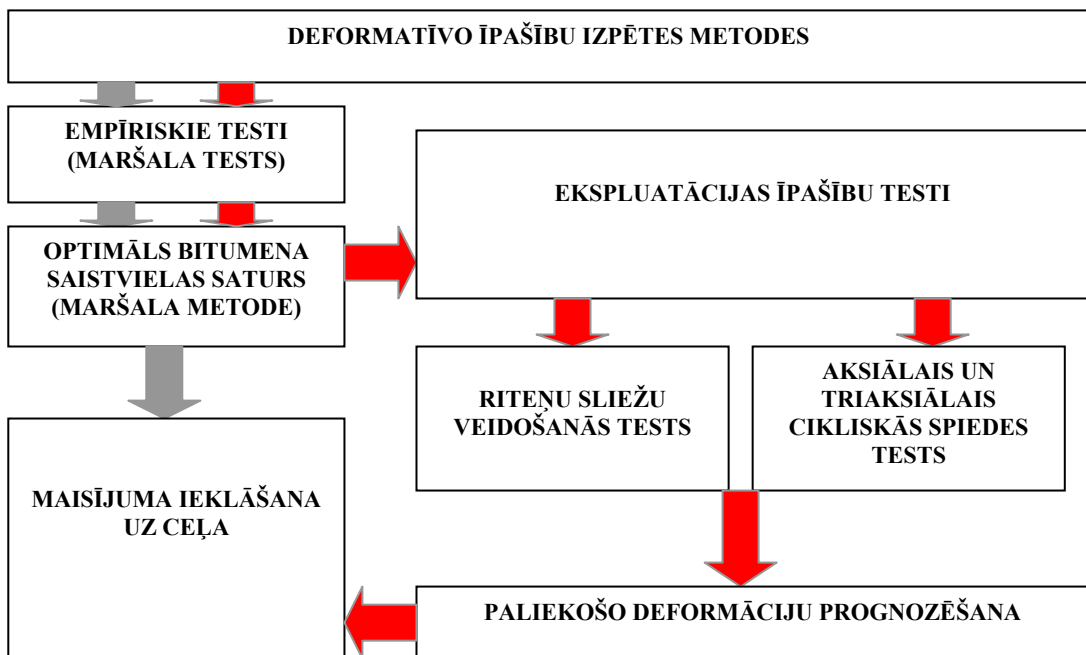
Darba uzdevumi

1. Analizēt asfaltbetona seguma paliekošo deformāciju veidošanās mehānismu, pastāvošo prognozēšanas metodiku un galvenos ietekmējošos (iekšējos un ārējos) faktorus.

2. Noteikt tērauda ražošanas blakusprodukta – martena tēraudkausēšana sārņu pildvielas īpašības un salīdzināt tās ar tradicionālo granīta, diabaza un dolomīta pildvielu īpašībām (sk. 1.4. att.).
3. Salīdzināt nemodificētās bitumena saistvielas B70/100 īpašības ar SBS modificētās saistvielas īpašībām.
4. Izprojektēt un izgatavot AC un SMA asfaltbetona sastāvus, izmantojot tradicionālās un netradicionālās pildvielas un modificēto un nemodificēto bitumena saistvielu. Salīdzināt rezultātus un izvērtēt to atbilstību tehnisko noteikumu prasībām.
5. Noteikt izprojektēto asfaltbetona maisījumu sastāvu deformatīvās īpašības ar ekspluatācijas īpašību testiem – cikliskās spiedes testu un riteņu sliežu veidošanās testu. Savstarpēji salīdzināt ar dažādām metodēm iegūtos rezultātus (sk. 1.5. att.).
6. Veikt novērojumu datu – Latvijas apstākļiem raksturīgās transporta slodzes un āra gaisa temperatūras statistisko apstrādi un asfaltbetona seguma virsmas sasilšanas dinamikas analīzi.
7. Adaptēt ekvivalentās ass slodzes (*ESAL*) aprēķinu metodiku intensīvi noslogotām Latvijas ielām un ceļiem un izstrādāt *ESAL* aprēķinu vienādojumu laika periodam ar maksimālo seguma ekspluatācijas temperatūru.
8. Izmantojot laboratorijā iegūtos asfaltbetona sastāvu deformatīvās noturības rezultātus, *VESYS* modeli, smago transportlīdzekļu slodzi, izteiktu *ESAL* vienībās, kā arī, ņemot vērā vietējo klimatisko apstākļu īpatnības, izpētīt izprojektēto asfaltbetona sastāvu paliekošo deformāciju attīstības dinamiku.
9. Izstrādāt asfaltbetona seguma kvalitātes nodrošinājuma sistēmas koncepciju intensīvi noslogotām Latvijas ielām un ceļiem, kas dotu iespēju veikt sistemātisku vērtējumu.



1.4. att. Pētījuma eksperimentālās daļas 1. fāze – izejmateriālu izvēle:
 => – tradicionālās izejvielas; => – izejvielas etalonsastāviem



1.5. att. Pētījuma eksperimentālās daļas 2. fāze – rīšu izpētes metodika:
 => – neizvērtējot ekspluatācijas īpašības; => – izvērtējot ekspluatācijas īpašības

2. ANALĪTISKĀ DAĻA

2.1. Asfaltbetona īpašības no ķīmiskā aspekta

Saskaņā ar asoc. prof. M. Dzeņa atzinumu asfaltbetons ir tipisks kompozītmateriāls, ko veido divi pēc izcelsmes pilnīgi atšķirīgi galvenie komponenti – bitumens un pildviela. Bitumens, kas ir asfaltbetona saistviela, satur vismaz četrus galvenos komponentus, kuri ir organiskas izcelsmes un kuru molekulmasa, gaistamība, struktūra u. c. īpašības aptver plašu diapazonu. Pildvielas tāpat veido vairāki ķīmiskie savienojumi, bet jau neorganiskas izcelsmes. Asfaltbetons spēj veikt paredzētās funkcijas tikai tad, ja starp to veidojošajiem komponentiem pastāv pietiekami stipra adhezīvā saite, kas ir atkarīga no komponentu īpašībām un izgatavošanas un ieklāšanas tehnoloģijas. Asoc. prof. M. Dzenis raksturo bitumenu kā cietu vai sveķveida produktu, ko veido ogļūdeņraži un to atvasinājumi, kas satur skābekli, sēru un atsevišķus metālus. Naftas bitumeni ir dispersas sistēmas, kurās dispersijas vide ir eļļa un sveķi, bet dispersā fāze – asfaltēni. [1].

Profesors I. Ļeonovičs raksturo asfaltbetona struktūru kā daudzkomponentu konglomerātu sistēmu, kurā minerālā daļa atrodas bitumena saistvielas vidē, veidojot vienotu monolītu [2]. Profesori G. Sunji un P. Saharovs savos pētījumos apskata asfaltbetona struktūru kā sistēmu, sastāvošu no divām daļām – minerālā karkasa un bitumena [13]. Savukārt profesori M. Volkovs un I. Koroļovs uzskata, ka asfaltbetonā var izdalīt trīs struktūras: 1) mikrostruktūru – saistvielas struktūru; 2) mezostruktūru – saistvielu un smalku pildvielu; 3) makrostruktūru – trīskomponentu struktūru, kas sastāv no pildvielas, aizpildītāja un bitumena saistvielas [14].

Asfaltbetona mikrostruktūru akadēmiķis P. Rebinders iedala atkarībā no pildvielas daļiņu mijiedarbības caur bitumena saistvielas slāni: koagulācijas struktūra – veido vājas starpmolekulārās saites, kondensācijas struktūra – ķīmiskās un mehāniskās saites, un kristāliskā struktūra, kas veidojas negatīvā temperatūrā. Mainoties temperatūrai, notiek struktūru secīga pāreja no koagulācijas struktūras uz kondensācijas struktūru un pēc tam uz kristālisko struktūru [15]. Līdz ar to asfaltbetona deformatīvās īpašības un ilgmūžība ir atkarīga no bitumena saistvielas īpašībām, bet tās savukārt ir atkarīgas no bitumena ķīmiskā sastāva. Tomēr, kā atzīmē asoc. prof. M. Dzenis, asfaltbetona īpašības lielā mērā ir atkarīgas no adhezīvās saites stiprības starp bitumena saistvielu un pildvielu. Pildvielas un bitumena saķere (adhēzija) ir atkarīga ne tika no bitumena ķīmiskā sastāva, bet arī no pildvielas formas,

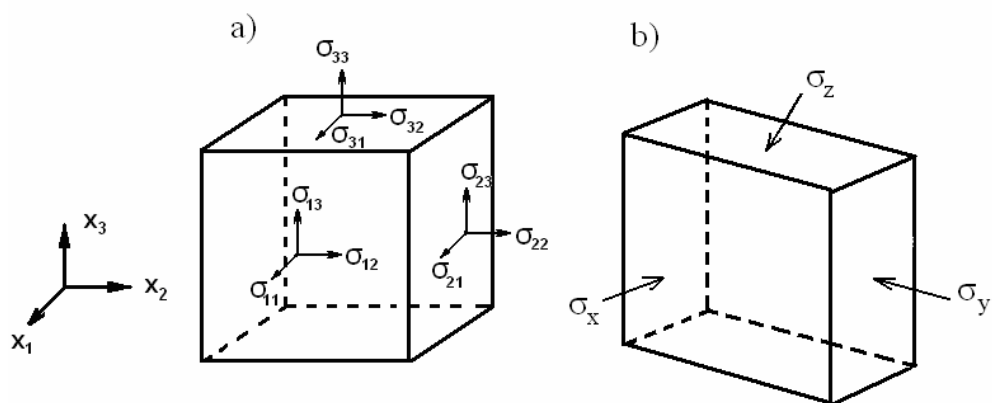
virsmas rakstura un mineralogiskā sastāva. Tā kā bitumens satur anjonaktīvās vielas, ķīmiskās saites stiprību nosaka katjonaktīvo smago un sārmezņu metālu daudzums pildvielas sastāvā. [16]. Latvijā asfaltbetona ražošanai plaši izmantotajiem minerālmateriāliem diabazam un dolomītam (to sastāvā ir virs 50% smago un sārmezņu metālu) ir labas saķeres īpašības ar bitumena saistvielu. Tāpēc Latvijas ielās un ceļos ieklāto maisījumu zemā deformatīvā noturība augstā temperatūrā var būt saistīta ar asfaltbetona struktūras īpašībām, kuru raksturo pildvielas granulometriskais sastāvs, forma un stiprība, kā arī ar bitumena saistvielas struktūra un īpašības.

2.2. Asfaltbetona īpašības no fizikālā un mehāniskā aspekta

Asfaltbetona seguma fizikālās īpašības raksturo trīs tilpuma parametri – gaisa poras (V_a), minerālā karkasa porainība (VMA) un ar bitumenu aizpildīto poru saturs (VFB). Tā deformatīvās īpašības ir atkarīgas no šo pamatkomponentu īpašībām, daudzuma un proporcijas. Svarīgākās asfaltbetona mehāniskās īpašības ir stiprība – spēja pretoties sagraušanai – un deformatīvā noturība – spēja saglabāt savu formu ārējās slodzes iedarbības gadījumā. Asfaltbetona deformatīvo īpašību pētījumu veikšanai ir izstrādāts liels metožu skaits. Testēšanas metodes var iedalīt trīs grupās: pamattesti, empīriskie testi un reālus apstākļus imitējošie testi [17]. Vairāki no tiem ir izstrādāti *SHRP (Strategic Highway Research Program)* pētījumu programmas ietvaros un ir adaptēti gan ASV, gan Eiropā. Tomēr Latvijā šīs metodes praktiski sāktas izmantot tikai kopš 2009. gada.

2.2.1. Spriegoti deformēts asfaltbetona seguma stāvoklis zem statiskās slodzes

Asfaltbetona segums reālos ekspluatācijas apstākļos atrodas sarežģītā spriegoti deformētā stāvoklī. Deformēta stāvokļa pētījumos to var apskatīt kā telpiski spriegotu materiālu. Šo spriegumstāvokli raksturo deviņi galvenie spriegumi. Ja sprieguma komponenti apzīmēt ar σ_{ij} , tad spriegumi σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} darbojas perpendikulāri bezgalīgi maza galīgā izmēra ķermeņa elementa plaknēm x_i ass virzienā, bet σ_{12} , σ_{21} , σ_{13} , σ_{31} , σ_{23} , σ_{32} ir spriegumu pieskarkomponentes (sk. 2.1.a att.). Ar spriegumu komponentu palīdzību var izrēķināt spriegumu jebkurā plaknē, kas iet caur doto punktu [18–19]. Spriegumi σ_x , σ_y un σ_z ir neatkarīgi no izvēlētās koordinātu sistēmas (x_1 , x_2 un x_3 ; sk. 2.1.b att.).



2.1. att. Sprieguma tenzora komponentes: a) galvenie spriegumi; b) no koordinātu sistēmas neatkarīgie spriegumi [20]

Vispārīgā gadījumā spriegoto stāvokli raksturo otrā ranga tenzors ar sešām sprieguma un deformācijas komponentēm. Sprieguma tenzora komponentes (sk. vienādojumu 2.1), kuras veido pārus no galvenās diagonāles, ir vienādas, tāpēc šo sprieguma tenzoru sauc par otrā ranga simetrisko sprieguma tenzoru:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_{\text{I}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{II}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{III}} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

kur $\sigma_{\text{I}}, \sigma_{\text{II}}, \sigma_{\text{III}}$ – sprieguma pamatkomponentes.

Lai sprieguma lielumi būtu atkarīgi tikai no pieliktās slodzes lieluma un neatkarīgi no izvēlētās koordinātu sistēmas, piemēram, pārejot uz novirzītām koordinātu asīm, tiek ieviesti trīs sprieguma tenzora invarianti [21]:

$$S_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}, \quad (2.2)$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{13} \\ \sigma_{31} & \sigma_{33} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

$$S_3 = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Aksiālajam spiedes sloojumam, ko materiālu pretestības kursā definē kā „vienkāršu” sloojuma veidu, sprieguma tenzors ir [22]:

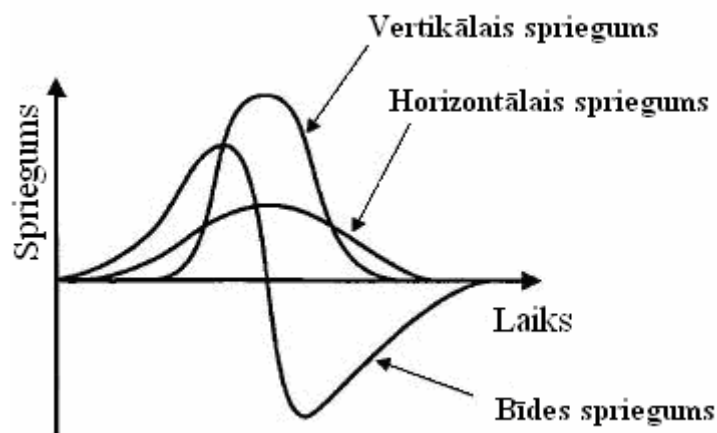
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Telpiskā jeb triaksiālā sloojuma gadījumam sprieguma tenzors ir:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

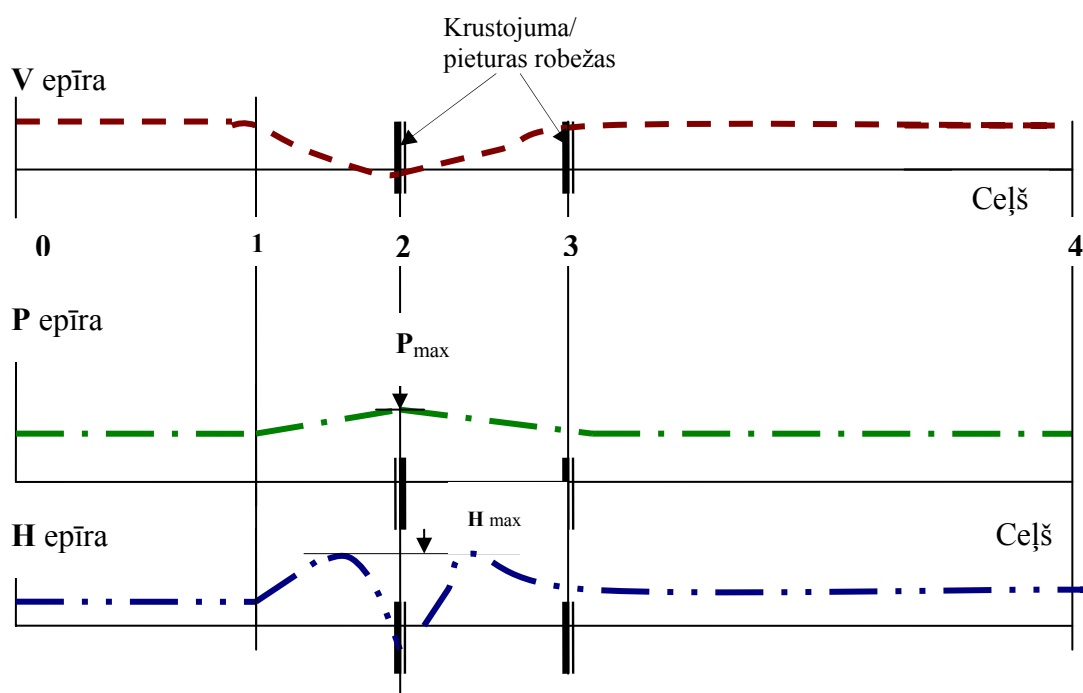
2.2.2. Spriegoti deformēts asfaltbetona seguma stāvoklis zem kustīgā riteņa slodzes

Reālos ekspluatācijas apstākļos asfaltbetona segums pakļauts kustīgā riteņa slodzei, kuras darbības rezultātā segumā parādās mainīga lieluma vertikālie, horizontālie un bīdes spriegumi (sk. 2.2. att.). Pieturvietas un krustojumi ir vietas ielu tīklā, kurās darbojas specifiski (salīdzinājumā ar parastu ceļa posmu, kurā norit vienmērīga kustība) transportlīdzekļu slodzes radītie spēki, un attiecīgi specifiski ir ceļa segas darbības apstākļi. Reālā kustībā var izdalīt šādus posmus: vienmērīgas kustības posms, bremzēšanas posms un paātrinājuma posms, un attiecīgi tiem atbilstošus spiedes P un bīdes H izraisītos spriegumus ceļa segā (sk. 2.3. att.). Rotācijas rezultātā tieši zem noslogotā riteņa centra, kad bīdes spriegumi ir vienādi ar nulli, segumā veidojas maksimālie horizontālie un vertikālie spriegumi [23].



2.2. att. Spriegumi zem kustīgā riteņa slodzes

Rises veidojas kustīgās slodzes izraisīto spriegumu koncentrācijas vietās, vienmērīgas un, īpaši, nevienmērīgas kustības apstākļos. 2.3. attēlā redzami vienmērīgas kustības posmi (0–1; 3–4), bremzēšanas sākums (1) un paātrinājuma sākums (2). Spiedes un bīdes spēku komponentes un to iedarbības laiki ir atkarīgi no kustības ātruma (ja ātrums ir lielāks, P ietekme kļūst momentāna, bet H ietekme pieaug) un kustības režīma maiņas intensitātes (uzsākot bremzēšanu, H vērtība pieaug, sasniedzot maksimālo vērtību pirms apstāšanās). Stāvošam transportlīdzeklim P vērtība sasniedz maksimumu.



2.3. att. Transportlīdzekļa slodzes vertikālās un horizontālās komponentes izmaiņa atkarībā no bremzēšanas/paātrinājuma pirms krustojuma vai pieturvietas [24]

2.2.3. Spriegumu sadalījums vienslāņa un vairākslāņu sistēmās

Ceļa segas konstrukcija ir vairākslāņu sistēma, kas sastāv no dabiskās pamatnes, segas pamatnes un seguma. Ceļa segas pamatuzdevums ir neatkarīgi no laika apstākļiem būt noturīgai pret transporta slodzi, neveidojot plaisas un plastiskās deformācijas. Seguma slāņu uzdevums ir slodzes sadalīšana, lai minimizētu spiedienu uz apakšējiem slāņiem. Tāpēc virskārtas seguma slāņi tiek veidoti no asfaltbetona vai cementbetona, un šo slāņu izmaksas salīdzinājumā ar apakškārtas slāņu izmaksām ir ievērojami lielākas. Tas savukārt dod iespēju apakšējo slāņu izbūvei izmantot vietējos materiālus.

2.2.3.1. Vienslāņa sistēma

Ceļa segas struktūras modelēšanas iespēja parādījās pēc daudzslāņu teorijas izstrādes [25]. Teorija pamatojas uz franču matemātiķa un mehāniķa Žozefa Businesska (*J. Boussinesq*) darbiem, kas pirmais matemātiski aprakstīja spriegumu sadalījumu zem vienmērīgas rotējošā riteņa slodzes elastīgajā vienslāņa ķermenī. Saskaņā ar Businesska formulu vertikālie spriegumi jebkurā dziļumā zem zemes virsmas, pieliekot slodzi tieši uz zemes virsmas, aprēķināmi pēc formulas:

$$\sigma_z = k \cdot \frac{P}{z^2}, \quad (2.7)$$

kur

$$k = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{(1 + (r/z)^2)^{\frac{5}{2}}}. \quad (2.8)$$

Ievietojot koeficienta k vērtību (sk. 2.8 vienādojumu) 2.7. vienādojumā, iegūstam:

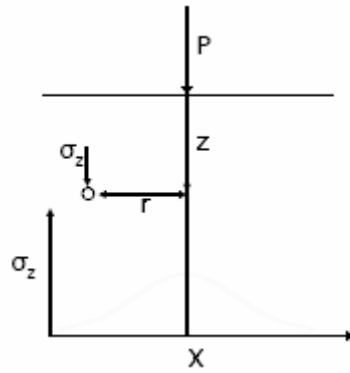
$$\sigma_z = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1 \cdot P}{z \cdot (1 + (r/z)^2)^{\frac{5}{2}}}, \quad (2.9)$$

kur σ_z – vertikālais spriegums, MPa;

z – dziļums, cm;

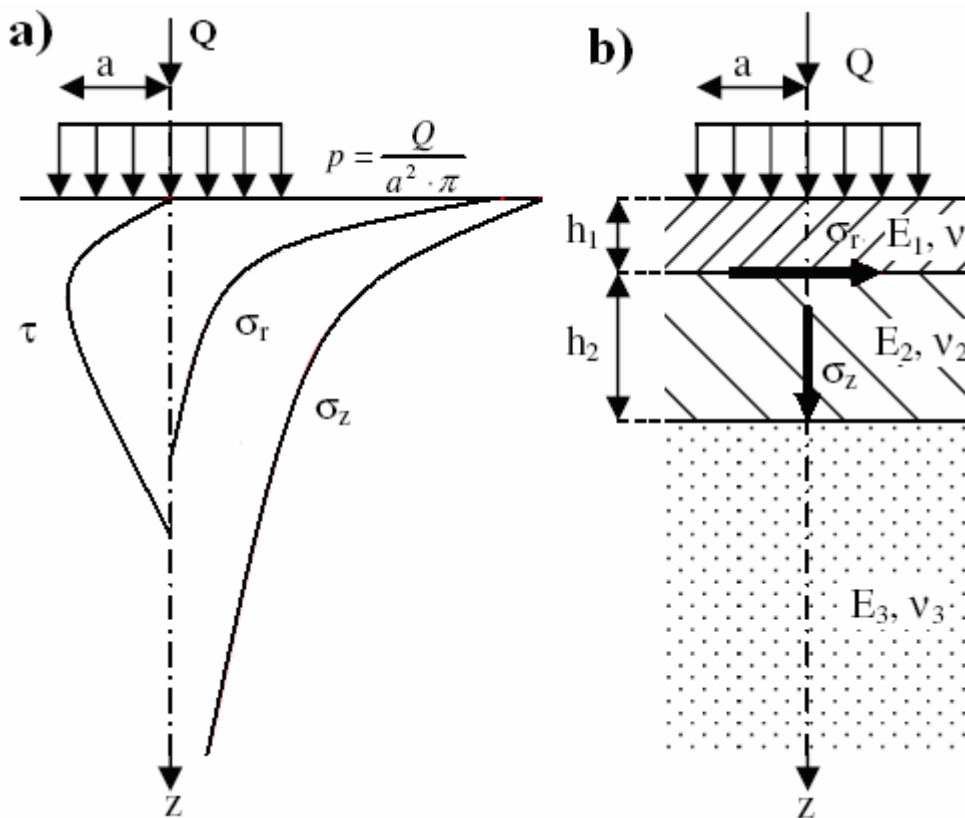
r – radiālais attālums no slodzes P , cm,

P – pieliktā koncentrētā slodze, kN.



2.4. att. Vienslāņa sistēma

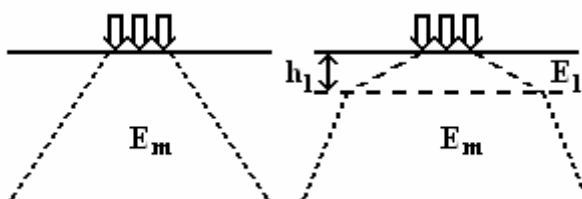
No 2.9 vienādojuma redzams, ka vertikālie spriegumi ir atkarīgi no dziļuma z un radiālā attāluma no apskatāmā punkta līdz pieliktajai slodzei r , bet nav atkarīgi no pārvietojamās vides īpašībām (sk. 2.4. att.). Maksimālais vertikālais spriegums no pieliktās slodzes P veidojas nelielā dziļumā aiz slodzes pielikšanas ass un bezgalīgā dziļumā tuvojas nullei (sk. 2.5.a att.).



2.5. att. Spriegumu sadalījums: a) vienslāņa sistēmā; b) vairākslāņu sistēmā

2.2.3.2. Divu un vairāk slāņu sistēma

2.9 vienādojums ir piemērots spriegoti deformēta stāvokļa noteikšanai zemes (lauku) ceļos, kur ceļš ir izveidots uz esošās gultnes vai no tuvumā pieejamiem dabas resursiem. Tomēr vairākos gadījumos ceļa segas konstrukcija ir vairākslāņu sistēma ar ievērojami lielāku virskārtas slāņa stingumu salīdzinājumā ar apakškārtas slāņiem. Tas nodrošina labāku slodzes sadalījumu (sk. 2.6. att.).



2.6. att. Stingākas virskārtas slāņa ietekme uz slodzes sadalījumu

Virskārtas slānis saskaņā ar Burmistera (*Burmister. D.M.*) teoriju ir bezgalīgā platumā, bet ar ierobežotu biezumu h_1 un h_2 . Pamatne gan platumā, gan biezumā saskaņā ar minēto teoriju ir pieņemta kā bezgalīga. Katrs slānis tiek apskatīts kā homogēns, izotrops materiāls no lineārā – elastības teorijas aspekta, t. i., Huka likuma darbības zonā. Bīdes deformācija sasniedz maksimumu virskārtas slāņos un pakāpeniski samazinās apakšējos slāņos [25-26]. Arī Hofstra (*Hofstra A.*) un Klomps (*Klomp A.J.G.*) savos pētījumos atklājuši bīdes spriegumu samazināšanos apakšējos slāņos, līdz ar to pieņemts, ka lielākā noturība pret plastisko šļūdi, kas ir iespaiduma rišu (sk. 2.2.5. nodaļu „Rišu klasifikācija”) veidošanās pamatcēlonis, ir konstrukcijas apakšējos slāņos, jo apakškārtas augšējā joslā veidojas vertikālie spriegumi, bet virskārtas slāņa apakšējā joslā veidojas horizontālie spriegumi, kuri var veicināt noguruma plaisu veidošanos (sk. 2.6.b att.) [27].

Spriegumu un deformāciju lielumi katrā slānī ir atkarīgi no seguma slāņu stinguma attiecības $\frac{E_1}{E_2}$, un tos raksturo ar elastības moduļiem (E). Ceļa segas slāņu deformāciju aprēķina saskaņā ar šādiem vienādojumiem:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = (\sigma_r + \eta \cdot \sigma_t - \eta \cdot \sigma_z) / E, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_z = (\sigma_z + \eta \cdot \sigma_r - \eta \cdot \sigma_t) / E, \quad (2.11)$$

kur ε_r un ε_t ir attiecīgi horizontālā radiālā un horizontālā tangenciālā deformācija, mm;

σ_r, σ_t – horizontālais radiālais un tangenciālais spriegums, MPa (sk. 2.5.b att.);

σ_z – vertikālais spriegums, MPa (sk. 2.5.b att.);

η – Puasona koeficients;

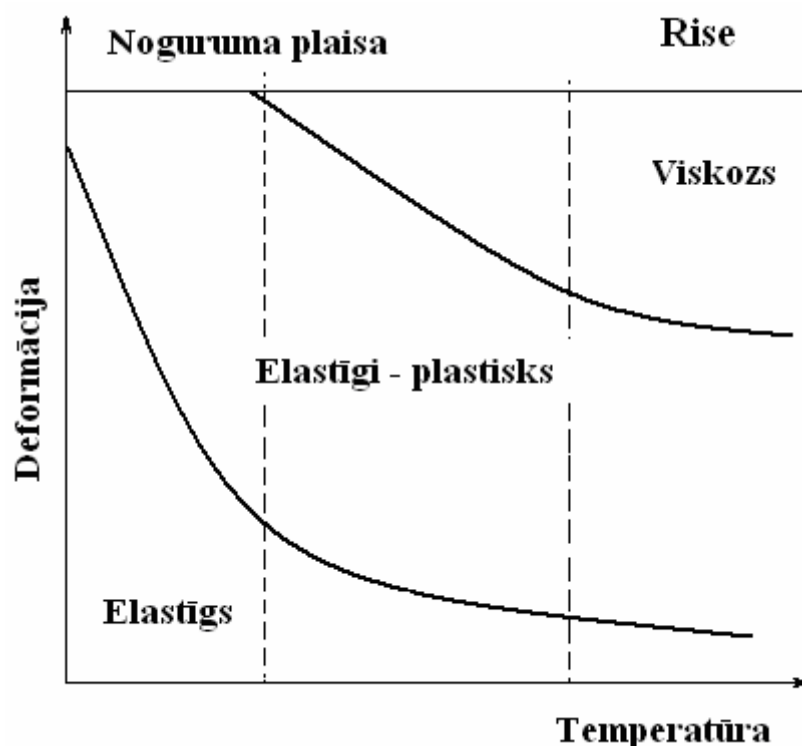
E – elastības modulis, MPa.

Spriegumu un deformāciju aprēķins trīsslāņu sistēmā pamatojas uz to pašu principu kā divslāņu sistēmā. Tomēr to sarežģī vairāki jaunie parametri, tādi kā $A = \frac{a}{h_2}$, $H = \frac{h_1}{h_2}$,

$$K_1 = \frac{E_1}{E_2} \text{ un } K_2 = \frac{E_2}{E_3}.$$

2.2.4. Rišu veidošanās mehānisms

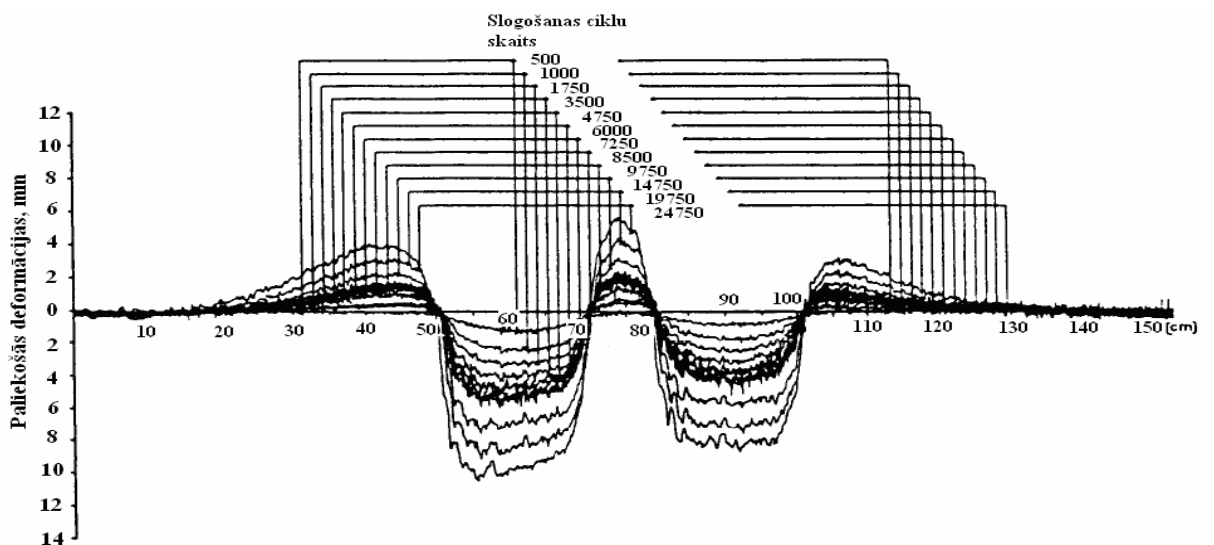
Asfaltbetons ir elastīgi-plastiski-viskozs materiāls, kam zemā temperatūrā ir augsta stiprība un izteiktas elastīgās deformācijas, kas var veicināt trauslā asfaltbetona seguma sabrukumu vai noguruma plaisu veidošanos (sk. 2.7. att.). Savukārt, ja ir augsta vasaras temperatūra, asfaltbetonam dominē viskozi-plastiskās īpašības ar zemu relaksācijas laiku, kas var veicināt paliekošo deformāciju veidošanos pēc slodzes noņemšanas.



2.7. att. Asfaltbetona mehāniskās īpašības atkarībā no temperatūras

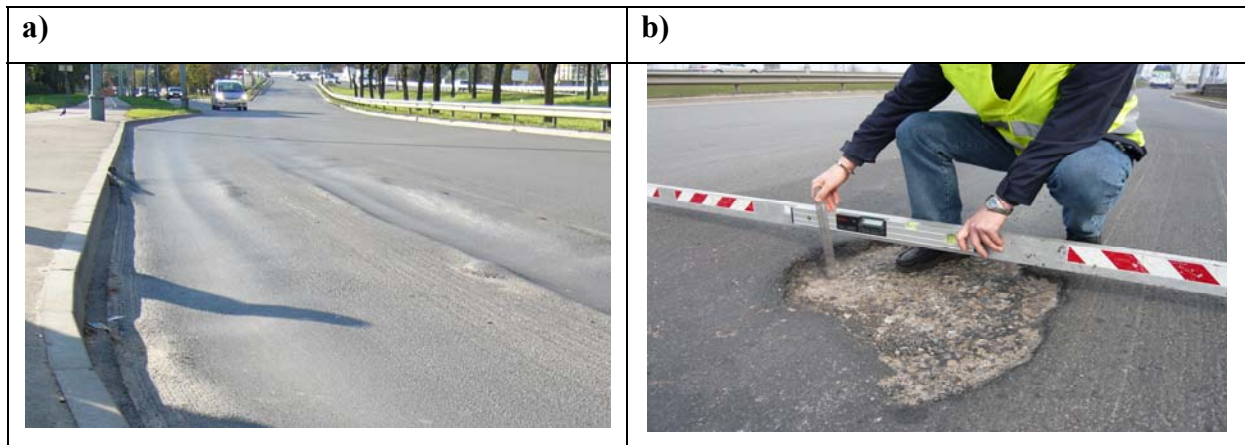
Ļoti izteiktas paliekošās deformācijas novērotas asfaltbetona segās, ja to temperatūra ir tuva asfaltbetona maisījumā izmantotā bitumena mīkstēšanas temperatūrai (45–50 °C), tāpēc tās bieži parādās karstajā vasaras periodā, kad asfaltbetona seguma virskārtas temperatūra sasniedz 50 °C un lielāku [28]. Parasti tās parādās kā garenvirziena iespaiduma deformācija ar nelielu izspiedumu uz sāniem. Rišu cēlonis ir asfaltbetona seguma sablīvēšanās (samazinās tilpums un palielinās blīvums) kombinācija ar bīdes deformāciju. Tās var veidoties vienā vai vairākos asfaltbetona seguma slāņos, kā arī segas pamatnes nestspējas zuduma rezultātā (sk. 2.2.5. nodaļu „Rišu klasifikācija”). Primārais rišu veidošanās mehānisms saskaņā Hofstra un Klompa pētījumiem ir bīdes deformācijas, nevis sablīvēšanās, tomēr jāuzsver asfaltbetona blīvuma lielā nozīme bīdes deformāciju veidošanās procesā [27]. Eisenmans (*Eisenmann J.*) un Himlers (*Himler A.*) savā pētījumā secina, ka rišu veidošanās iemesls ir **šļūde** – lēnā deformāciju attīstība laikā [29].

Austriešu zinātnieks Bolcmanis (*Boltzman*) jau 19. gs. savos pētījumos pierādījis, ka spriegumi deformētā ķermenī ir atkarīgi ne tikai no dotajā momentā pieliktās slodzes, bet arī no iepriekšējām sloģošānām un rezultējošām deformācijām. Līdz ar to paliekošā deformācija ir funkcija ne tikai no sloģošānas noteiktajā momentā, bet funkcija no visām iepriekšējām sloģošānām [30]. Eisenmana un Himlera pētījumā parādīta transportlīdzekļu riteņu sloģošānas ciklu ietekme uz rišu veidošānos. 2.8. attēlā var redzēt, ka sākotnējā stadijā izteiktas paliekošās deformācijas veidojas tieši zem transportlīdzekļu riteņiem ar ļoti nelielu izspiedumu uz sāniem. Tas pierāda, ka sākotnējā stadijā dominējošā loma ir sablīvēšānai zem transporta slodzes.



2.8. att. Transportlīdzekļu sloģošānas ciklu efekts uz paliekošo deformāciju veidošānos [29]

Pēc sākotnējās stadijas iespieduma un izspieduma deformāciju lielums ir aptuveni vienāds. Tas nozīmē, ka vairs nav sablīvēšanās, bet notiek materiāla pārvietošanās bīdes spēku iedarbībā, iespieduma vietā veidojot ļoti plānu virskārtas slāni (sk. 2.9.b att.). Šis deformācijas veids ilgstoši turpinās asfaltbetona seguma ekspluatācijas laikā (sk. 2.9.a att.).



2.9. att. Seguma paliekošā deformācija (a) un nofrēzētā rīses zona transportlīdzekļu pieturā „Preses nams” Rīgā (b)

2.2.5. Rišu klasifikācija

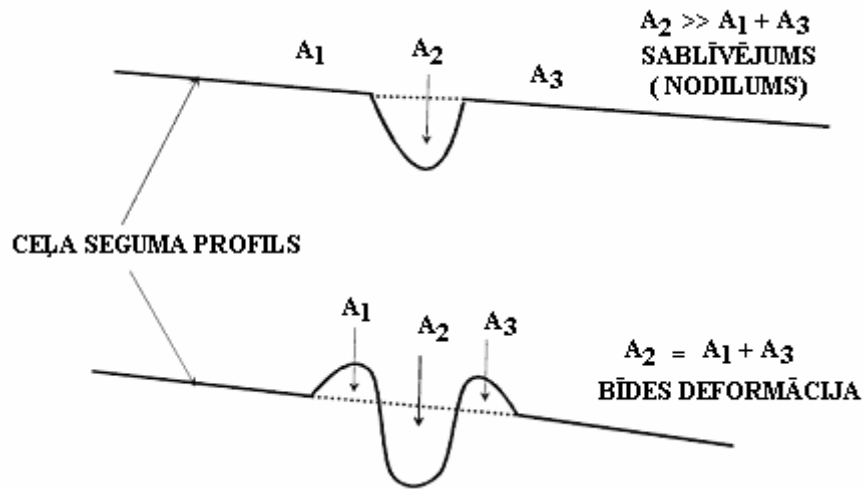
2.2.5.1. Nodiluma rīses

Radzotās riepas, kuras atļauts izmantot Latvijā, ir asfaltbetona segas nodiluma rīšu pamatcēlonis (sk. 2.10. att.). Nodiluma rīšu izcelsme ir dabiska – divu virsmu – riepu un seguma berzes spēku iedarbības rezultātā zaudēts materiāls [28]. Šādas deformācijas ir vērojamas visos ceļos un ielās. Tās ir atkarīgas no kustības intensitātes, riepu radzēm, asfaltbetona seguma tipa un tā izejmateriālu īpašībām. Nodiluma lielumu var prognozēt (aprēķināt), lietojot formulu:

$$h = a + \frac{bN}{1000}, \quad (2.12)$$

kur h – nodilums, kas veidojas gada laikā, mm;

a – parametrs, kas ievērtē klimatisko apstākļu ietekmi uz segumu ($a = 0,4-0,6$);
 b – parametrs, kas ievērtē satiksmes ietekmi uz seguma nodilumu ($b = 0,25-0,55$);
 N – gada vidējā diennakts satiksmes intensitāte, automob./24 h.



2.10. att. Rišu klasifikācija [31]

2.2.5.2. Iespieduma rises

Šā tipa rises rodas visas segas konstrukcijas vai atsevišķu tās slāņu un pamatnes grunts nestspējas zuduma rezultātā. Tāpēc tās bieži sauc par strukturālajām risēm. Nesaistīto ceļa segas konstrukcijas slāņu nestspējas zudums aizpildītāja un pildvielu izskalojuma dēļ ir viens no iespējamajiem iespieduma rišu veidošanās iemesliem.

2.2.5.3. Iespieduma-izspieduma rises

Iespieduma-izspieduma rises galvenokārt tiek novērotas vai nu īsi pēc jaunā seguma ieklāšanas un tūlītējas slogošanas, vai arī augstas apkārtējās vides temperatūras un intensīvas slogošanas gadījumā. To ģeometriskā forma ir izteikti viļņveidīga šķērsvirzienā (sk. 2.11. att.) kā asfaltbetona materiāla daļējs izspiedums virs segas sākotnējās virsmas līmeņa. Šādas, relatīvi īsā laikā radušās deformācijas, no ceļa lietošanas viedokļa nav nedz tipiskas, nedz pieļaujamas.

2.2.5.4. Jauktas izcelsmes rises

Jauktas izcelsmes rises veidojas, daļēji kombinējoties (summējoties) visām iepriekš minētajām deformācijām. Viens no to rašanās cēloņiem varētu būt reālās slodzes ievērojama palielināšanās pēdējo desmit gadu laikā.



2.11. att. Iespieduma-izspieduma rises Brīvības ielā Rīgā

2.3. Spriegumu un deformāciju modelēšana bituminēto maisījumu segumu slāņos

Analizējot 2.1.–2.2. nodaļās minētos datus, noskaidrots, ka asfaltbetons ir ļoti komplikēts materiāls. Paliesto deformāciju attīstības dinamikas analīzi sarežģī daudzie to īpašības ietekmējoši faktori, galvenie no tiem – temperatūra un transporta slodzes raksturs. Saskaņā ar vairāku zinātnieku pētījumiem asfaltbetona mehāniskās īpašības ir funkcija no transporta slodzes lieluma, cikliskuma un temperatūras [32–33]. Līdz ar to mehāniskā modeļa izstrādāšana asfaltbetona segumam, ievērojot visus mehāniskās īpašības ietekmējošos faktorus, ir ļoti sarežģīta. Pastāv iespēja vai nu samazināt lielo ietekmējošo faktoru skaitu, vai arī veikt laikietilpīgus testus pārējo parametru noteikšanai un apkopot tos vienā modelī.

Asfaltbetona paliesto deformācijas izskaidro un apraksta vairākas teorijas un metodoloģijas. Galvenās no tām ir:

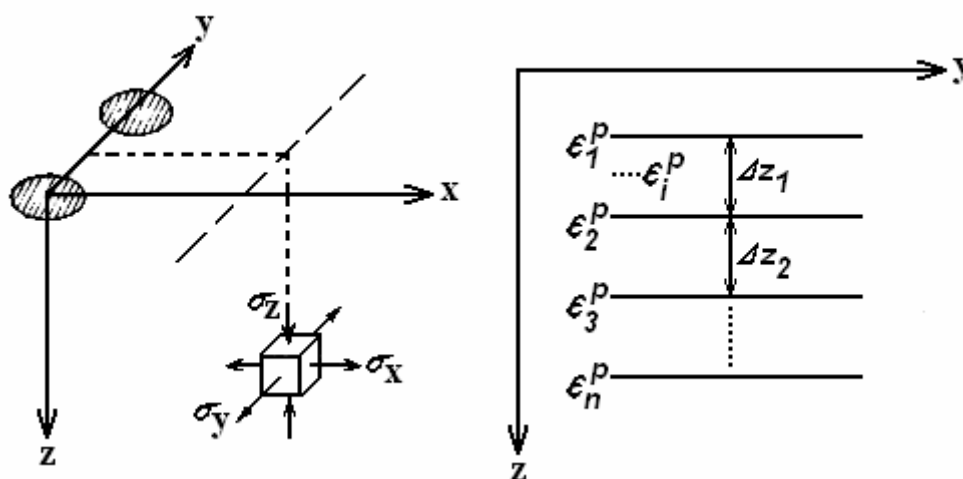
- lineārā un nelineārā elastības teorija;

- viskozi-elastīgā metodoloģija – reoloģiskie modeļi;
- viskozi-elastīgi-plastiskā metodoloģija;
- mikromehāniskā metodoloģija;
- laboratorisko pētījumu rezultātu funkciju vienādojumi.

Testēšanas metodes paliekošo deformāciju prognozēšanas modeļu parametru noteikšanai laboratorijas apstākļos ir aprakstītas 3.4. nodaļā. Tāpat laboratorijas apstākļos ir svarīgi izgatavot reprezentatīvus paraugus – paraugus ar reālajam ceļam vai ielai līdzīgām īpašībām.

2.3.1. Lineārā un nelineārā elastības teorija

Deformēto ceļa segas slāņu metodikas pamatā ir rišu prognozēšana, izmantojot paliekošo deformāciju raksturlielumus, kas noteikti, veicot ceļa seguma slāņu materiālu testēšanu laboratorijā un analizējot seguma struktūru, izmantojot lineāro vai nelineāro elastības teoriju. Šās teorijas pamatprincipus pirmie noformulējuši Barksdeils (*Barksdale R.D.*) [34] un Romēns (*Romain J.E.*) [35]. Ceļa seguma struktūra saskaņā ar deformēto ceļa segas slāņu metodi tiek sadalīta slāņos. Katrā slānī, tieši zem kustīgā riteņa slodzes, pēc noteikta sloģošanas ciklu skaita tiek aprēķināti spriegumi un deformācijas (sk. 2.12. att.).



2.12. att. Ceļa seguma struktūra paliekošo deformāciju pētījumiem [36]

Kopējo ceļa segas konstrukcijas paliekošo deformāciju pēc noteikta sloģošanas ciklu skaita aprēķina, summējot vidējos plastisko deformāciju lielumus katra slāņa vidū un konstruktīvo slāņu biezumus:

$$\varepsilon_p = \sum_{i=1}^n [(\varepsilon_p^i)(\Delta z_i)], \quad (2.13)$$

kur ε_p – kopējā ceļa segas konstrukcijas paliekošā deformācija, mm;

ε_p^i – paliekošā deformācija ceļa segas konstrukcijas i-tajā slānī, mm;

Δz_i – ceļa segas konstrukcijas i-tā slāņa biezums, mm;

n – ceļa segas konstrukcijas konstruktīvo slāņu skaits.

Šo metodi dažādās formās ir adaptējuši vairāki zinātnieki, un izstrādāta pasaulē atzītā *Shell* projektēšanas metode *BISAR*, kuras pamatā ir elastīgo slāņu teorija [37]. Metodei ir arī trūkumi, jo tā izvērtē spriegumus un deformācijas tieši zem kustīgā riteņa slodzes centra, kur bīdes spriegumi ir vienādi ar nulli (sk. 2.2. att.). Tomēr paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas prognozēšanas pētījumiem jāizvērtē visa bojājuma vai rises zona, ņemot vērā spriegumus un deformācijas aiz kustīgā riteņa slodzes centra, t. i., nosakot bīdes spriegumus un deformācijas.

2.3.2. Viskozi-elastīgā metodoloģija

Asfaltbetona mehāniskās īpašības var aprakstīt, izmantojot plastiska ķermeņa teoriju vai viskozi-elastīgā un viskozi-plastiskā ķermeņa teoriju [38]. Šīs teorijas apraksta laikā mainīga materiāla īpašības. Atkarībā no īpašību izpausmes, asfaltbetona izpētei tiek lietotas elastības teorijas, plastiskuma un šļūdes teorijas likumsakarības [39]. Materiāls ir uzskatāms par lineāri viskozi-elastīgu, ja noteiktajā laika momentā spriegumi ir proporcionāli deformācijai un tam ir spēkā lineārais superpozīcijas princips. Matemātiski to var izteikt, izmantojot vienādojumus:

$$\varepsilon[c\sigma(t)] = c\varepsilon[\sigma(t)] \quad (2.14)$$

un

$$\varepsilon[\sigma_1(t) + \sigma_2(t - t_1)] = \varepsilon[\sigma_1(t)] + \varepsilon[\sigma_2(t - t_1)], \quad (2.15)$$

kur ε – deformācija, mm;

σ – spriegums, Pa;

c – konstante.

Vienādojums 2.15 apraksta Bolcmaņa superpozīcijas principu. Vairākos gadījumos materiāls, tajā skaitā asfaltbetons, pēc slodzes noņemšanas uzrāda ne tikai elastīgās, bet arī plastiskās jeb paliekošās deformācijas. Asfaltbetons uzrāda lineāri elastīgas īpašības noteiktās

sprieguma, deformācijas, laika un temperatūras robežās, un nelineāri elastīgas īpašības, pārsniedzot šīs robežas. Asfaltbetonam piemīt elastīgi-viskozas īpašības pie nelieliem spriegumiem, vairākkārt mazākiem par tā gala stiprību [40]. Vairākos gadījumos robeža, kad materiālam īpašības mainās no lineārām uz nelineārām, balstās uz pieņēmumiem. Materiāla ar viskozām, elastīgām un plastiskām īpašībām teorētiskai izpētei lieto vairākus reoloģiskos modeļus [41]. Elastīgo īpašību uzskatāmai modelēšanai lieto atsperi (Huka modelis), kuras stingrība atbilst elastības moduļa vērtībai (sk. 2.13.a att.). Uzskatāmai viskozitātes modelēšanai lieto hidraulisko amortizatoru ar viskozo pretestību η (Ņūtona modelis; sk. 2.13.b att.).

2.3.2.1. Huka un Ņūtona modelis

Izmantojot elastības teoriju, materiāla mehāniskās īpašības var aprakstīt matemātiski. Ķermenis ir uzskatāms par elastīgu, ja pēc slodzes noņemšanas tas atgriežas savos sākotnējos ģeometriskajos izmēros, t. i., deformācijas ir atgriezeniskas. Pirmo fundamentālo atklājumu materiāla elastīgo īpašību izpētē devis Huks, nosakot sakarību starp ķermeņa pagarinājumu un pielikto slodzi. Pamatsakarību starp pagarinājumu un spēku nosaka pēc formulas:

$$\Delta l = k \cdot P, \quad (2.16)$$

kur: Δl - stieņa absolūtais pagarinājums, mm;

k – proporcionalitātes koeficients.

Pārveidojam 2.16. vienādojumu, lietojot relatīvos lielumus – relatīvo pagarinājumu $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

un spriegumu $\sigma = \frac{P}{F}$, un iegūstam Huka likumu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.17)$$

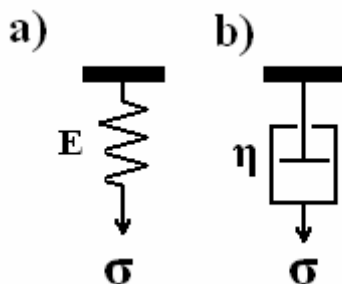
kur E – elastības modulis, MPa;

ε – deformācija.

Ja ķermenis uzņem slodzi, kas pārsniedz elastības robežu, tad pēc atslogošanas konstatējamas paliekošās deformācijas – ķermeņa forma pilnīgi vairs neatjaunojas [42]. Materiāla viskozo pretestību η Ņūtona modelī (sk. 2.13.b att.) aprēķina pēc vienādojuma:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}}, \quad (2.18)$$

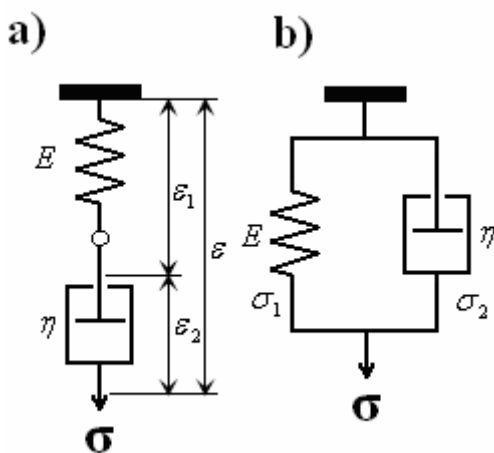
kur $\dot{\varepsilon}$ – deformācijas ātrums, s^{-1} .



2.13. att. Reoloģiskie elementārmodeļi: a) elastības; b) viskozitātes

2.3.2.2. Maksvela modelis

Viskozi-elastīga ķermeņa mehāniskās īpašības var aprakstīt, kombinējot atsperi un hidraulisko amortizatoru virknes slēgumā, kā arī paralēlā slēgumā. Kombināciju virknes slēgumā sauc par Maksvela šķidrums mehānisko modeli, bet paralēlā slēgumā – par Kelvina cieta ķermeņa mehānisko modeli (sk. 2.14. att.) [43].



2.14. att. Viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģiskie modeļi:

a) Maksvela šķidrums modelis; b) Kelvina cieta ķermeņa mehāniskais modelis

Tā kā elementārmodeļi (Nūtona un Huka modelis) ir savienoti virknes slēgumā, tad kopējā deformācija ir atsevišķo elementu deformāciju summa (sk. 2.14.a att.):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (2.19)$$

Kopējais deformācijas ātrums ir vienāds ar Maksvela modeļa atsevišķo elementu deformācijas ātrumu summu:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2. \quad (2.20)$$

No vienādojumiem 2.17 un 2.18 izsakām Maksvela šķidruma vienādojumu:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.21)$$

vai
$$\sigma + n \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \eta \cdot \dot{\varepsilon}, \quad (2.22)$$

kur $n = \frac{\eta}{E}$ – materiāla relaksācijas laiks, s;

η – viskozitāte, Pa·s;

t – slodzes darbības laiks, s;

E – elastības modulis, Pa;

ε – kopējā deformācija, mm;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – elementārmodeļu deformācija, mm;

σ – normālspriegums, Pa.

Šļūdes gadījumā $\sigma = const$, momentāni deformējas elastīgais elements un pēc tam neierobežoti plūst viskoza elements. Šļūdes vienādojums ir:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \cdot t. \quad (2.23)$$

Atslogojot šādu materiālu pēc slogošanas laika t_1 , deformācijas elastīgā daļa atgriežas nulles stāvoklī, bet viskozā daļa paliek fiksētā stāvoklī proporcionāli laikam t_1 . Kopējā paliekošā deformācija ir:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \cdot t_1. \quad (2.24)$$

Vienādojuma 2.21 atrisinājums attiecībā pret σ :

$$\sigma = e^{-\frac{E \cdot t}{\eta}} \cdot \left(\sigma_0 + E \cdot \int \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\frac{E \cdot t}{\eta}} \cdot dt \right). \quad (2.25)$$

Pie sprieguma σ_0 ķermeņa deformācijas ātrums ir $\frac{d\varepsilon}{dt}$. Ja šī deformācija ir nemainīga, t. i., $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$, tad laikā gaitā notiek sprieguma samazināšanās pēc sakarības, kas iegūta no 2.25 vienādojuma:

$$\sigma = e^{-\frac{E \cdot t}{\eta}} . \quad (2.26)$$

Sprieguma samazināšanos laikā pie konstantas deformācijas ($\varepsilon = const$) sauc par spriegumu relaksāciju. Maksvela modelī deformācijas elastīgā daļa atgriežas sākotnējā jeb nulles stāvoklī, bet viskozās daļas relaksācijas periods ir laiks, kurā spriegums samazinās e (2,7) reizes. Spriegumu relaksācijas parādība ir ļoti raksturīga asfaltbetona ceļa segumiem, kuros transporta slodzes iedarbībā var veidoties paliekošās deformācijas.

2.3.2.3. Kelvina modelis

No vienādojumiem 2.17 un 2.18 izsakām Kelvina cieta ķermeņa vienādojumu. Tā kā elementārmodeļi ir savienoti paralēlā slēgumā, kopējais spriegums ir atsevišķu elementu spriegumu summa (sk. 2.14.b att.):

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} . \quad (2.27)$$

Kelvina vienādojums šļūdes gadījumā pie $\sigma = const$ un $\varepsilon(0) = 0$ no vienādojuma 2.27:

$$E + \frac{\eta}{E} \cdot \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E} \quad (2.28)$$

iegūst šādu deformācijas kinētiku:

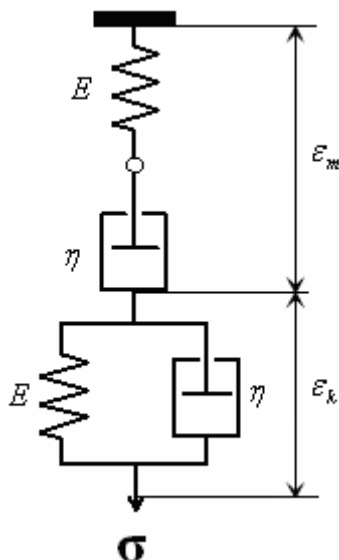
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \cdot (1 - e^{-\frac{E \cdot t}{\eta}}) . \quad (2.29)$$

No vienādojuma 2.29 redzams, ka deformācija notiek aizkavēti un, ja $t = \infty$, tiecas uz $\frac{\sigma}{E}$.

Aizkavēšanās intensitāte ir atkarīga no attiecības $\frac{\eta}{E}$, ko sauc par deformācijas viskozo aizkavēšanos. Elastīguma aizkavēšanās notiek, jo elastīgā deformācija nerodas uzreiz pēc slodzes pielikšanas, bet sasniedz maksimumu pie $t = \infty$.

2.3.2.4. Birgera modelis

Birgera šķidruma modeli veido Maksvela šķidruma modeļa un Kelvina cieta ķermeņa modeļa virknes slēgums (sk. 2.15. att.).



2.15. att. Birgera šķidruma mehāniskais modelis

Kopējā Birgera modeļa deformācija ir:

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_k, \quad (2.30)$$

kur $\varepsilon_m = \frac{\sigma}{E}$ – Maksvela modeļa deformācija;

$\varepsilon_k = \frac{\sigma}{E_1}$ – Kelvina modeļa deformācija.

Diferencējot 2.30 vienādojumu un ievietojot iepriekš iegūtās ε_m un ε_k vērtības, iegūstam Birgera šķūdes vienādojumu:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta \cdot t} + \frac{\sigma}{E_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{kav}}})}, \quad (2.31)$$

2.31 vienādojumā pirmais saskaitāmais $\frac{\sigma}{E}$ ir momentānā elastīgā deformācija, $\frac{\sigma \cdot t}{\eta}$ –

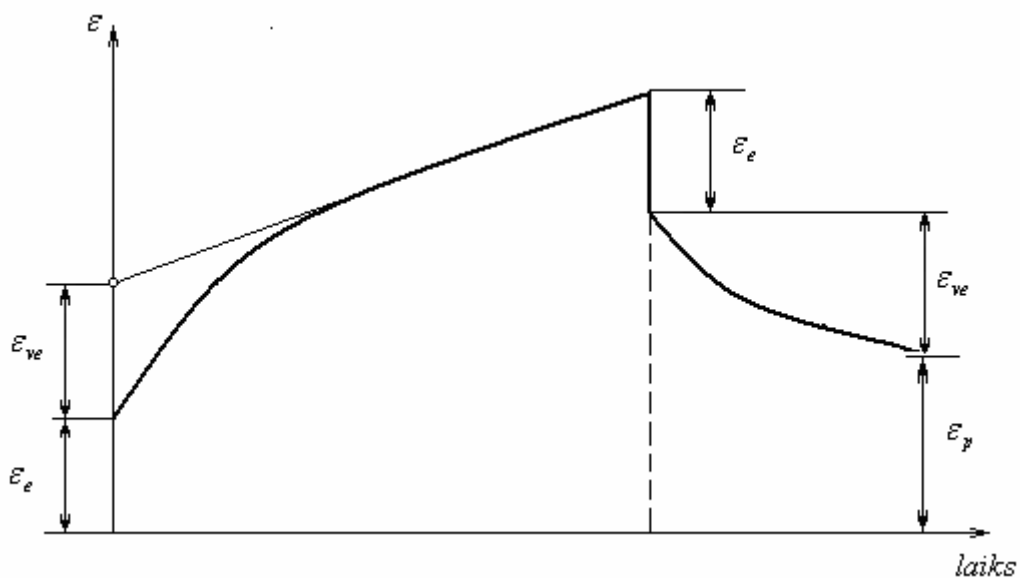
viskozās tecēšanas paliekošā deformācija un $\frac{\sigma}{E_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{kav}}})}$ ir kavējuma elastīgums. Tādā

veidā šis modelis aprakstāms kā divu veidu vienlaicīgas deformācijas – paliekošā deformācija no viskozās tecēšanas un elastīgās deformācijas. Birgera šķidruma deformācijas attīstība laikā

ir attēlota 2.16. attēlā. No grafika redzams, ka pēc atslogošanas deformācija $\frac{\sigma}{E}$ momentāni

atgriežas nulles stāvoklī, laikā $t = \infty$ nulles stāvoklī atgriežas deformācija $\frac{\sigma}{E_1}$, bet paliekošās

deformācijas daļa pie $t = \infty$ ir $\frac{\sigma}{\eta \cdot t}$. 2.1 tabulā ir apkopoti un salīdzināti reoloģiskie modeļi.



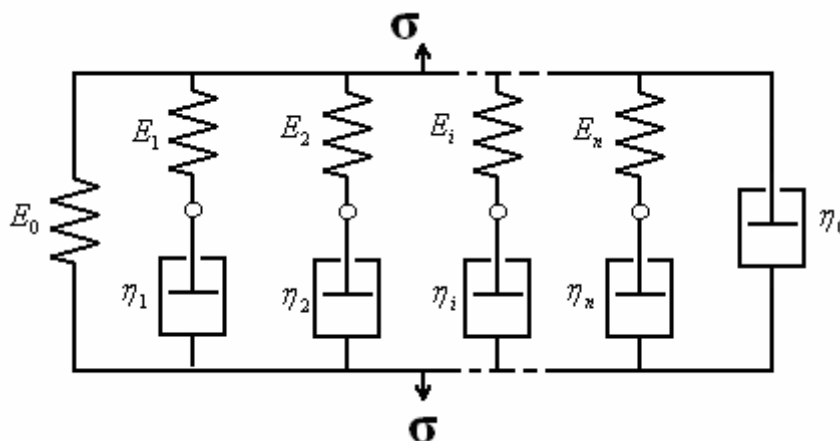
2.16. att. Viskozi-elastīga materiāla deformāciju attīstība laikā

Reoloģisko modeļu salīdzinājums

	Maksvela modelis	Kelvina modelis	Birgera modelis
Atsperes un amortizators	virknē	paralēli	Maksvela modelis un Kelvina modelis virknē
Pamatsakarība	Viskozi-elastīgs šķidrums	Viskozi-elastīgs ciets ķermenis	Viskozi-elastīgs ciets un šķidrums
Šļūdes funkcija ($\sigma = \text{const.}$)	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \cdot t$	$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon}$	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta \cdot t} + \frac{\sigma}{E_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{kav}}})}$
Kavējuma elastīgums	-	+	+
Sprieguma relaksācija	+	-	

2.3.2.5. Paplašinātie reoloģiskie modeļi

Paplašinātie jeb vispārinātie (ģeneralizētie) modeļi sastāv no vairākiem reoloģiskiem elementārmodeļiem vai to elementiem. Vairāki Maksvela modeļi, savienoti virknē, vai Kelvina modeļi, savienoti paralēli, uzrādīs tādas pašas deformatīvās īpašības kā viens atsevišķs modelis. Tomēr, ja Maksvela modeļi savienoti paralēli, tad šāds paplašinātais modelis salīdzinājumā ar atsevišķu Maksvela modeli uzrādīs momentāno elastību un aizkavēto elastību ar dažādiem kavējuma un relaksācijas laikiem (sk. 2.17 att.).



2.18. att. Paplašinātais Maksvela modelis

Kopējais spriegums šim modelim ir atsevišķu elementu spriegumu summa:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (2.32)$$

Viena i-tā modeļa deformāciju izsaka ar vienādojumu:

$$D\varepsilon = \frac{D\sigma_i}{E_i} + \frac{\sigma_i}{\eta_i}, \quad (2.33)$$

kur D – diferenciālis;

η_i – i-tā elementa viskozitāte, Pa·s;

E_i – i-tā elementa elastības modulis, Pa;

ε – kopējā deformācija, mm;

σ_i – i-tā elementa normālspriegums, Pa.

Ievietojot vienādojumu 2.33 vienādojumā 2.32, iegūstam:

$$\sigma = \left(\sum_{i=1}^n \frac{D}{\frac{D}{E_i} + \frac{1}{\eta_i}} \right) \cdot \varepsilon. \quad (2.34)$$

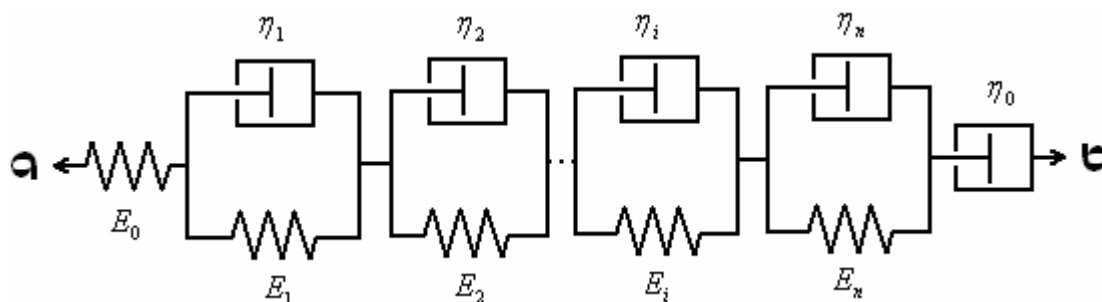
Spriegumu relaksācija paplašinātajam Maksvela modelim, ja deformācija $\varepsilon_0 = \text{const}$, ir vienāda ar:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n E_i \cdot e^{-\frac{t}{t_E^i}}, \quad (2.35)$$

kur $t_E^i = \frac{\eta_i}{E_i}$ – relaksācijas laiks.

Ja Kelvina reloģiskos modeļus savieno virknē, tad plašinātais modelis precīzāk aprakstīs viskozi-elastīga materiāla īpašības (sk. 2.18. att.). Kopējo deformāciju paplašinātajam Kelvina modelim izsaka ar vienādojumu:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (2.36)$$



2.18. att. Paplašinātais Kelvina modelis

Viena i -tā modeļa deformāciju izsaka ar vienādojumu:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{D\eta_i + R_i} \sigma. \quad (2.37)$$

Šļūdes deformācija pie konstanta sprieguma σ_0 ir katra atsevišķā elementa deformāciju summa, ko nosaka saskaņā ar vienādojumu:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n \varphi_i (1 - e^{-\frac{t}{t_c^i}}), \quad (2.38)$$

kur φ_i – šļūdes koeficients;

$$t_c^i = \frac{\eta_i}{E_i} \text{ – kavējuma laiks.}$$

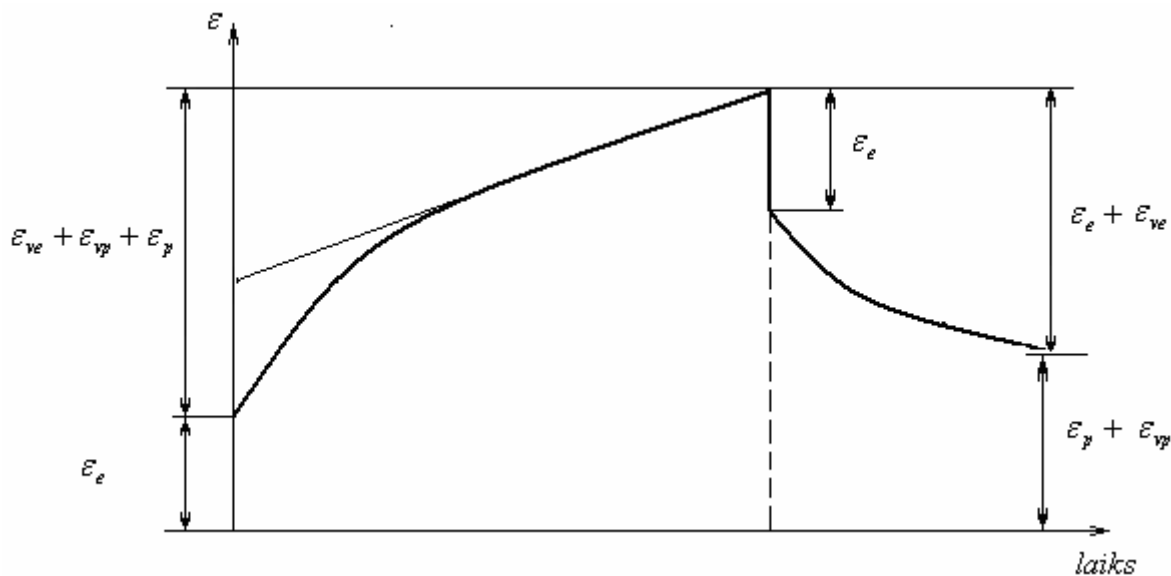
Viskozi-elastīgo sistēmu analizē paplašinātais Maksvela modelis ir vairāk piemērots nekā paplašinātais Kelvina modelis, ja ir zināmi (noteikti) deformācijas lielumi. Savukārt Kelvina modelis ir piemērots sistēmām ar aprēķinātiem spriegumiem [31].

Asfaltbetona maisījumu viskozi-elastīgo īpašību pētījuma rezultāti, kuros nosaka laikā atkarīgos spriegumu un deformāciju lielumus, veicot testēšanu ar triaksiālo spiedes testu un izmantojot Birgera modeli, uzrāda ievērojami lielākas paliekošās deformācijas salīdzinājumā ar teorētisko aprēķinu [44]. Monismits (*Monismith C.L.*) u. c. šo atšķirību izskaidro ar to, ka viskozi-elastīgais modelis nespēj precīzi aprakstīt asfaltbetona no laika atkarīgās plastiskās deformācijas. Turpinot Monismita u. c. iesāktos pētījumus, zinātnieki Gardiners un Skoks izmantoja viskozi-elastīgo koncepciju, lai laboratorijā iegūtos rezultātus salīdzinātu ar eksperimentālajiem [45-46]. Testēšanu veica gan zem konstantas slodzes, gan uz cikliskās spiedes testēšanas iekārtas. Tika secināts, ka, slogojot paraugus ar konstantu slodzi, deformācija ne vienmēr ir proporcionāla pieliktajai slodzei. Analizējot cikliskās spiedes testa rezultātus, ir secināts, ka no laika atkarīgie spriegumi ir atkarīgi no slogošanas frekvences (pieaugot slogošanas laikam, pieaug kopējā un paliekošā deformācija), slodzes lieluma,

slogošanas vēstures (*loading history*) un sānslodzes lieluma. Zinātnieki Sousa (*Sousa J.B.*) un Veismans (*Weissman S.L.*) izstrādājuši nelineāru viskozi-elastīgo modeli asfaltbetona maisījuma paliekošo deformāciju prognozēšanas pētījumiem [47]. Modelis sastāv no vairākiem paralēli savienotiem trīsdimensiju Maksvela elementiem. Katrs Maksvela modeļa elements sastāv no atsperes un viskozā amortizatora ar nelineārām īpašībām. Asfaltbetona karkasu raksturo modeļa atsperes, savukārt īpašību maiņu atkarībā no temperatūras – viskozais amortizators. Piedāvātais modelis apvieno 11 nezināmus parametrus, kurus nosaka, veicot vairākus laboratoriskos testus. Izveidotais modelis precīzāk apraksta asfaltbetona deformatīvās īpašības, tomēr tā lietošanu praksē sarežģī pārāk liels nosakāmo parametru skaits.

2.3.3. Viskozi-elastīgi-plastiskā metodoloģija

Viskozi-elastīgi-plastiskā materiāla teorija viskozās īpašības definē gan elastīgajā, gan plastiskajā zonā. Asfaltbetons ir uzskatāms par elastīgi-viskozi-plastisku materiālu, ja viskozā deformācija sastāv no atgriezeniskās un neatgriezeniskas komponentes (sk. 2.19. att.) [48].



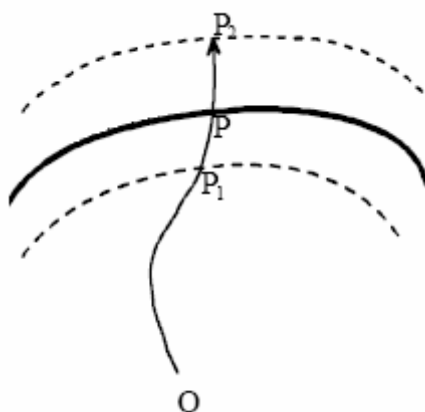
2.19. att. Viskozi-elastīgi-plastiskā materiāla deformāciju attīstība laikā (ϵ_e – elastīgā deformācija, ϵ_p – plastiskā deformācija, ϵ_{ve} – viskozi-elastīgā deformācija, ϵ_{vp} – viskozi- plastiskā deformācija)

Sprieguma tenzoru apraksta vienādojums:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^v + \epsilon_{ij}^p, \quad (2.39)$$

kur $\epsilon_{ij}^e, \epsilon_{ij}^v, \epsilon_{ij}^p$ – deformācijas tenzora komponente.

Pirmās divas sprieguma tenzora komponentes var noteikt, izmantojot elastīgo un viskozi-elastīgo teoriju. Lai noteiktu sprieguma tenzora plastiskās deformācijas komponentes, nepieciešams aprakstīt viskozi-elastīgā materiāla plastisko stāvokli. Elastīgi-plastiskā materiāla teorijā slogotā materiāla plastisko stāvokli slogošanas trajektorijā OP raksturo punkts P, kurš nav atkarīgs no laika, kad šis stāvoklis tiek sasniegts. Ja materiāls ir viskozi-elastīgi-plastisks, plastisko stāvokli var raksturot punkts P_1 vai P_2 – atkarībā no tā, kādā laikā šis stāvoklis tiks sasniegts (sk. 2.20. att.). Šo īpašību raksturo materiāla viskozitāte, kas ir atkarīga no slodzes lieluma un slogošanas laika. Turklāt, ja slogošana notiek pa trajektoriju OP vienā laikā, bet ar dažādiem deformācijas ātrumiem vienā trajektorijas punktā, tad tiks iegūtas atšķirīgas plūstamības robežas P_n .



2.20. att. Plastiskā stāvokļa maiņa pa slogošanas trajektoriju OP [31]

Tā kā elastīgi-viskozi-plastiskā materiāla teorija ir ļoti sarežģīta, nepieciešams ieviest vairākus vienkāršotus pieņēmumus, lai izstrādātu praktiskai lietošanai piemērotu modeli. Viens no veidiem ir apskatīt materiālu kā elastīgu/viskozi-plastisku ar viskozām īpašībām tikai plastiskajā zonā. To var aprakstīt ar vienādojumu [49]:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p. \quad (2.40)$$

Vienādojuma 2.40 sprieguma tenzora deformācijas ātruma plastiskā komponente $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ apraksta gan plastisko, gan viskozo efektu. Savukārt deformācijas ātruma elastīgā komponente $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ apraksta tikai elastīgās īpašības bez viskozā efekta.

2.3.4. Mikromehāniskā metodoloģija

Iepriekšējās nodaļās asfaltbetona deformatīvās īpašības aplūkotas, uzskatot to par nepārtrauktu, viendabīgu materiālu. Tomēr asfaltbetons ir heterogēns kompozītmateriāls, kurā minerālā karkasa īpašības krasi atšķiras no bitumena saistvielas īpašībām. Tas lielā mērā

sarežģī tā deformatīvo īpašību izpēti. Daži zinātnieki piedāvā asfaltbetona deformatīvās īpašības apskatīt no mikromehānikas viedokļa, t. i., aplūkot atsevišķi asfaltbetona izejmateriālu – pildvielas un bitumena saistvielas īpašības un mijiedarbības saiti starp tām [50 - 52]. Slodzes sadalījums minerālajā karkasā realizējas caur pildvielas daļiņām normālā un tangenciālā virzienā, izraisot daļiņu pārvietošanos un rotāciju. Mikromehāniskās metodes uzdevums ir atrast mainīgos mikrolīmenī – saites spēkus, daļiņu pārvietojumus un ģeometriskās īpašības – un izmatot tos deformētā stāvokļa raksturojumam makrolīmenī. Mikromehāniskā metode balstās uz diskrēto elementu metodi (*DEM*), kas sākotnēji tika izmantota sausas pildvielas (un smilts) un saistvielas īpašību modelēšanai. Metodi izmanto vairāku īpašību modelēšanai – materiāla sabrukuma analīzei, mijiedarbības saites un plaisu veidošanās modelēšanai un citiem mērķiem. Pirmkārt, nosaka katrai pildvielas daļiņai spēkus un momentus, kuri izveidojās ārējās slodzes vai gravitācijas dēļ. Tālāk, izmantojot otro Ņūtona likumu, nosaka pildvielas daļiņu pārvietojumus un rotāciju. Pēc tam katram pildvielas daļiņu pārim kontaktpunktos, izmantojot spēka pārvietojuma likumu, nosaka jaunizveidoto spēku (summējot visus spēkus, kas darbojas uz daļiņu). Zinātnieki Čangs (*Chang K.G.*) un Migoda (*Meegoda, J.N.*) granulēto un bituminēto maisījumu deformatīvo īpašību modelēšanai izstrādājuši *ASBAL* modeli [50]. Modelis apraksta divu veidu mijiedarbības saites – pildviela-bitumens-pildviela un pildviela-pildviela. Bitumena saistvielas īpašības tiek aprakstītas, aplūkojot to kā lineāri viskozi-elastīgu materiālu. Birgera modelis izmantots pildvielas-bitumena-pildvielas un daļēji pildvielas-pildvielas mijiedarbības modelēšanai. Mora-Kulona sabrukuma kritēriji izmantoti, lai novērtētu ar saistvielu pārklātas, bet pārvietojuma un rotācijas rezultāta atdalītas pildvielas daļiņas. Profesors Udins (*Uddin W.*) u. c. asfaltbetona stinguma un paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas pētījumiem izmanto mikromehānikas „šūnu” metodi [52]. Faktiskie stinguma moduļi bija 15% robežās salīdzinājumā ar prognozētajiem. Profesors Rotenburgs (*Rothenburg L.*) u. c. rišu parādību uz asfaltbetona seguma pētījumiem izmanto mikromehānisko pieeju ar diskrēto elementu metodi *DEM* [53]. Pildvielas daļiņas tiek uzskatītas par elastīgiem elementiem, bet saistviela – par lineāri viskozi-elastīgu materiālu. Daļiņu pārvietojums šļūdes dēļ tiek modelēts kā saistvielas viskozā plūstamība, kuras ātrums ir atkarīgs no saistvielas viskozitātes, plēves biezuma, kontaktprieguma un citiem parametriem. Saistviela minerālā karkasa porās apskatīta kā saspiežams Ņūtona šķidrums. Aprēķinot atsevišķu pildvielas daļiņu pārvietojumus ar Ņūtona vienādojumu, secina, ka asfaltbetona šļūde ir atkarīga no kohēzijas un iekšējās berzes saitēm, savukārt paliekošā deformācija veidojas, kad šo saišu skaits ir zem noteiktas robežas. Mikromehāniskās un *DEM* metodikas lietojums asfaltbetona deformatīvo īpašību modelēšanai

vēl ir tikai sākumstadijā. Turpmāk sagaidāmi vairāki pētījumi, kas parādīs šās metodikas priekšrocības un trūkumus.

2.3.5. Empīrisko funkciju vienādojumu modeļi

Asfaltbetona seguma paliekošo deformāciju attīstības dinamikas funkciju vienādojumu modeļi tiek izstrādāti, balstoties uz eksperimentāliem datiem. Vienādojumi apraksta materiāla deformatīvās īpašības atkarībā no transporta slodzes lieluma, satiksmes intensitātes, ātruma un apkārtējās vides īpašībām. Asfaltbetona paraugu eksperimentālo izpēti veic, izmantojot ekspluatācijas īpašību testēšanas metodes (sk. 3.4. nodaļu). Transporta slodzi un satiksmes intensitātes lielumu raksturo ekvivalentā standarta ass slodze *ESAL*, savukārt apkārtējās vides temperatūras datu statistiskā apstrāde dod iespēju noteikt seguma sasilšanas temperatūru (sk. 4.1. nodaļu).

Piedāvāti vairāki paliekošo deformāciju prognozēšanas funkciju vienādojuma modeļi, kurus var iedalīt trīs pamatgrupās: empīriskie korelācijas vienādojumi, plastisko deformāciju pamatlikumi un funkciju (pielikto slodžu skaits – deformācija) vienādojumi, kas iegūti laboratorijas testu rezultātā [36].

Vienkāršākais un izplatītākais paliekošo deformāciju prognozēšanas modelis ir pakāpes funkcijas vienādojums [29] :

$$\varepsilon_p = a \cdot N^b, \quad (2.41)$$

kur ε_p – paliekošā deformācija;

a, b – materiāla konstantes;

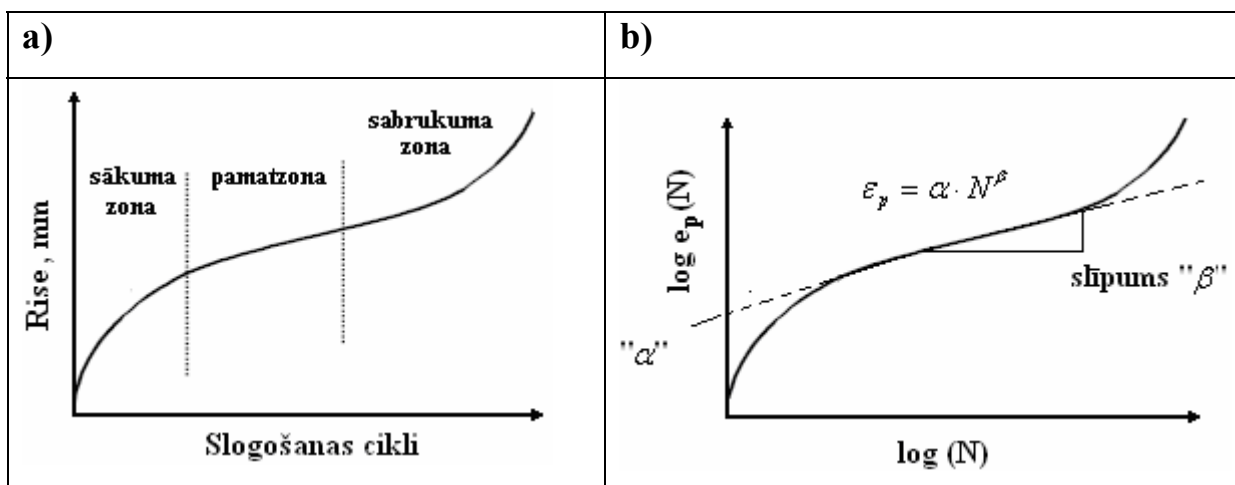
N – slogošanas ciklu skaits.

Materiāla konstantes a un b iegūst, analizējot uz cikliskām slogošanas iekārtām iegūtās līknes. Šīs līknes (ciklu skaits – plastiskā deformācija) var sadalīt trīs zonās: sākuma zona, pamatzona un sabrukuma zona (sk. 2.21.a att.) [54]. Sākotnējā stadijā īsā testēšanas laika periodā attīstās ievērojamas deformācijas. Tas ir saistīts ar parauga sablīvējumu pildvielas daļiņu pārorientācijas un pārbīdes vai parauga nelīdzenās virsmas dēļ. Vidējā posmā paliekošo deformāciju pieaugums ir nemainīgs. Deformāciju pieauguma iemesls šajā posmā ir bīdes šļūde. Deformāciju pieauguma ātrums šajā stadijā ir viens no galvenajiem asfaltbetona maisījuma rišu noturības rādītājiem. Pēdējā – trešajā posmā – deformāciju pieaugums strauji palielinās līdz parauga sabrukumam. Šī stadija parasti identificējās ar plaisu veidošanos asfaltbetona paraugos.

Korelācijas konstante α (sk. 2.21.b att.) parāda paliekošo deformāciju pieaugumu pēc pirmā sloģošanas cikla ($N = 1$), savukārt konstante β – paliekošo deformāciju pieauguma ātrumu.

Tā kā temperatūra ir paliekošās deformācijas ietekmējošs pamatcēlonis, paliekošās deformācijas var izteikt kā funkciju no sloģošanas ciklu skaita un temperatūras [55–57]:

$$\varepsilon_p = \alpha \cdot N^\beta \cdot T^\theta. \quad (2.42)$$



2.21. att. Paliekošo deformāciju pieauguma dinamika zem cikliskās slodzes:

a) sadalījums zonās; b) līkne log-log skalā ar korelācijas vienādojuma konstantēm α un β

Asfaltbetonam augstā temperatūrā piemīt viskoza materiāla īpašības, kā rezultātā, ja sloģošanas ātrums ir lielāks, tam ir ievērojami lielāka deformatīvā noturība. Kravas automobilis, kurš brauc ar ātrumu 20 km/h, veidos ievērojami lielāku ceļa risi nekā tad, ja tas brauc ar ātrumu 90 km/h. Saskaņā ar Bolcmaņa superpozīcijas principu kopējo rises dziļumu nosaka, summējot pie dažādiem ātrumiem iegūtos rišu dziļuma lielumus, citiem vārdiem, rises dziļums pie slodzes ātruma 20 km/h ir vienāds ar piecos sloģojumos iegūto rišu dziļumu pie sloģošanas ātruma 100 km/h [58]. Rišu dziļumu atkarībā no sloģošanas ātruma var aprēķināt no vienādojuma:

$$\varepsilon_p = \alpha \cdot \left(\frac{V_{ref}}{V} \cdot N_V\right)^\beta \cdot T^\theta, \quad (2.43)$$

kur V_{ref} – references ātrums;

N_V – sloģošanas ciklu skaits pie ātruma V .

VESYS modelis izsaka attiecību starp vertikālo plastisko deformāciju vienas transporta ass slodzes ciklā $\frac{d\varepsilon_p}{dN}$ un elastīgo deformāciju ε_r kā eksponentfunkciju no transporta slodžu ciklu skaita N , jo ārējās slodzes iedarbības rezultātā asfaltbetona segumā rodas gan elastīgās, gan plastiskās deformācijas (sk. 2.22. att. un 2.44 vienād.). Modeļi izstrādājuši Kenis (*Kenis W.*) un Vangs (*Wang W.*), balstoties uz viskozi-elastīgas sistēmas analīzi [59].

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \frac{d\varepsilon_p}{dN} = \mu N^{-\alpha}, \quad (2.44)$$

kur ε_p – paliekošā deformācija, mm;

ε_r – elastīgā deformācija, mm;

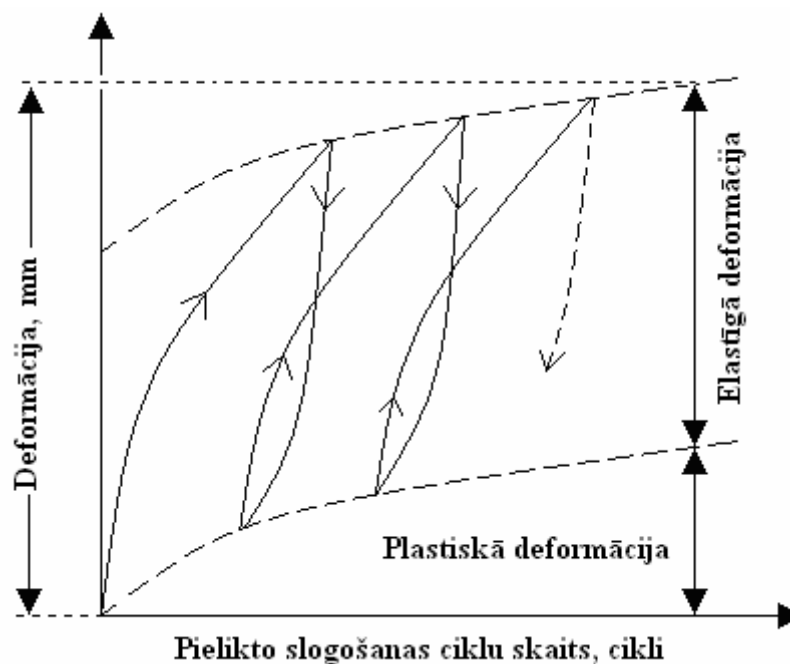
N – pieliktās transporta slodzes ciklu skaits (*ESAL* vienībās);

μ – elastīgas un plastiskās deformācijas proporcionalitātes koeficients;

α – deformācijas pieauguma koeficients.

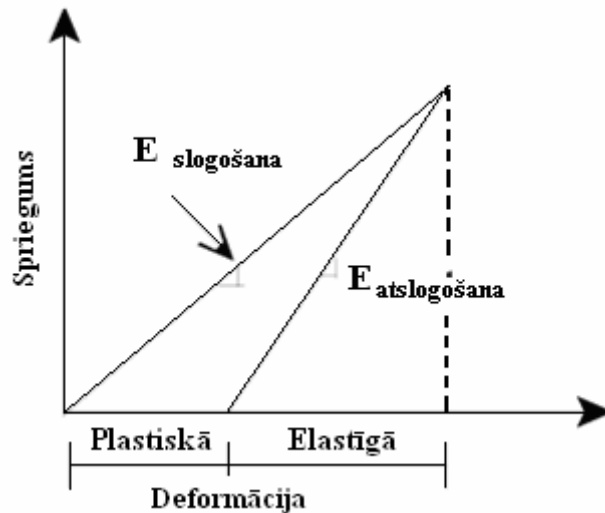
Paliekošā deformācija 2.44. vienādojumā ir proporcionāla elastīgajai deformācijai (sk. 2.22. att.). Šo deformāciju vienkāršoti var izsacīt ar divām elastīgās un plastiskās deformācijas komponentēm:

$$\varepsilon_p(N) = \mu \cdot \varepsilon_r \cdot N^\alpha. \quad (2.45)$$



2.22. att. Paliekošo deformāciju uzkrāšanās cikliskās transporta slodzes rezultātā

VESYS metodē pieņemts, ka elastīgā deformācija asfaltbetona segumā tā kalpošanas laikā paliek nemainīga, bet plastiskā palielinās, palielinoties transporta slodzes ciklu skaitam. Izņēmums ir zemas satiksmes intensitātes gadījumā un pirms sabrukuma [60].



2.23. att. Vienkāršotā sakarība paliemošo deformāciju pieaugumam cikliskās transporta slodzes rezultātā

Ja paliemošo deformāciju atkarībā no slodzes ciklu skaita izsaka ar funkciju $Y = a \cdot x^b$, tad 2.45 vienādojumā paliemošo deformāciju parametrus α un μ nosaka pēc vienādojuma:

$$\mu = \frac{a \cdot b}{\varepsilon_r}, \quad (2.46)$$

kur ε_r – elastīgā deformācija, mm;

$\alpha = 1 - b$ – deformācijas pieauguma koeficients.

Balstoties uz Parka (*Park S.*) un Lūtona (*Lytton R.*) pētījumiem, VESYS metodi iespējams piemērot daudzslāņu sistēmas paliemošo deformāciju dinamikas prognozēšanai [61]. No 2.23. attēla seko, ka elastības modulis slogošanas laikā ir:

$$E_{lo}^N = \frac{\sigma}{\varepsilon_r + \varepsilon_p}. \quad (2.47)$$

Elastības modulis atslogošanas laikā:

$$E_{un}^N = \frac{\sigma}{\varepsilon_r}. \quad (2.48)$$

No 2.33 un 2.34 vienādojumiem seko, ka elastības modulis slogošanas laikā ir:

$$E_{lo}^N = \frac{\sigma}{\varepsilon_r + \varepsilon_p} = \frac{\sigma}{\varepsilon_r(\mu N^{-\alpha} + 1)} = \frac{E_{un}}{1 + \mu N^{-\alpha}}. \quad (2.49)$$

2.35 vienādojums dod sakarību starp slogošanas un atslogošanas elastības moduļiem kā funkcija no paliekošo deformāciju parametriem α un μ . No 2.24. attēla, izmantojot ģeometrijas pamatlikumus, seko, ka:

$$\frac{\varepsilon_p}{dN} = \sigma \cdot \left[\frac{1}{E_{lo}} + \frac{1}{E_{un}} \right]. \quad (2.50)$$

Kopējās deformācijas daļējais pieaugums $F(N)$, kurš palielinās, palielinoties transporta slodzes ciklu skaitam, ir:

$$F(N) = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r + \varepsilon_p} \cong \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}. \quad (2.51)$$

Deformācijas daļējo pieaugumu var izteikt ar paliekošo deformāciju parametriem α un μ , izmantojot formulu:

$$F(N) = \mu \cdot N^{-\alpha} \text{ jeb } \varepsilon_p^{(N)} = \varepsilon_r \cdot \mu \cdot N^{-\alpha}. \quad (2.52)$$

Rišu veidošanās dinamiku atkarībā no seguma biezuma var aprakstīt ar vienādojumu:

$$\delta_p(N) = \int_0^N \int_0^{Z_{\max}} \varepsilon_p(z) \cdot F(N) \cdot dz \cdot dN, \quad (2.53)$$

kur Z_{\max} – seguma slāņa biezums, cm;

$\varepsilon_p(z)$ – deformācija no riteņa slodzes dziļumā z .

2.39 vienādojumu var paplašināt, iekļaujot visus segas konstrukcijas slāņus:

$$\delta_p(N) = \int_0^N \int_0^{d_1} \varepsilon_p(z) \cdot F_1(N) \cdot dz \cdot dN + \int_0^N \int_0^{d_2} \varepsilon_p(z) \cdot F_2(N) \cdot dz \cdot dN + \dots + \int_0^N \int_0^{d_n} \varepsilon_p(z) \cdot F_n(N) \cdot dz \cdot dN, \quad (2.54)$$

kur d_1, d_2, \dots, d_n – ceļa seguma atsevišķo slāņu biezums, cm;

F_1, F_2, \dots, F_n – kopējās deformācijas daļējais pieaugums katrā slānī.

Izsakot kopējo deformāciju ar deformācijas parametriem α un μ , kad $F(N) = \mu \cdot N^{-\alpha}$, iegūstam vienādojumu:

$$\delta_p(N) = \sum_{i=1}^n \left[\int_0^N \mu_i N^{-\alpha} dN \int_{d_{i-1}}^{d_i} \varepsilon_c(z) dz \right]. \quad (2.55)$$

Ir izstrādāti vairāki asfaltbetona paliekošo deformāciju vienādojumi un modeļi, to apkopojums dots 2.2. tabulā. Vairāki no tiem, kā jau iepriekš minēts, ir iegūti korelācijas līkņu slodzes ciklu skaits – deformācija analīzes rezultātā.

2.2. tabula

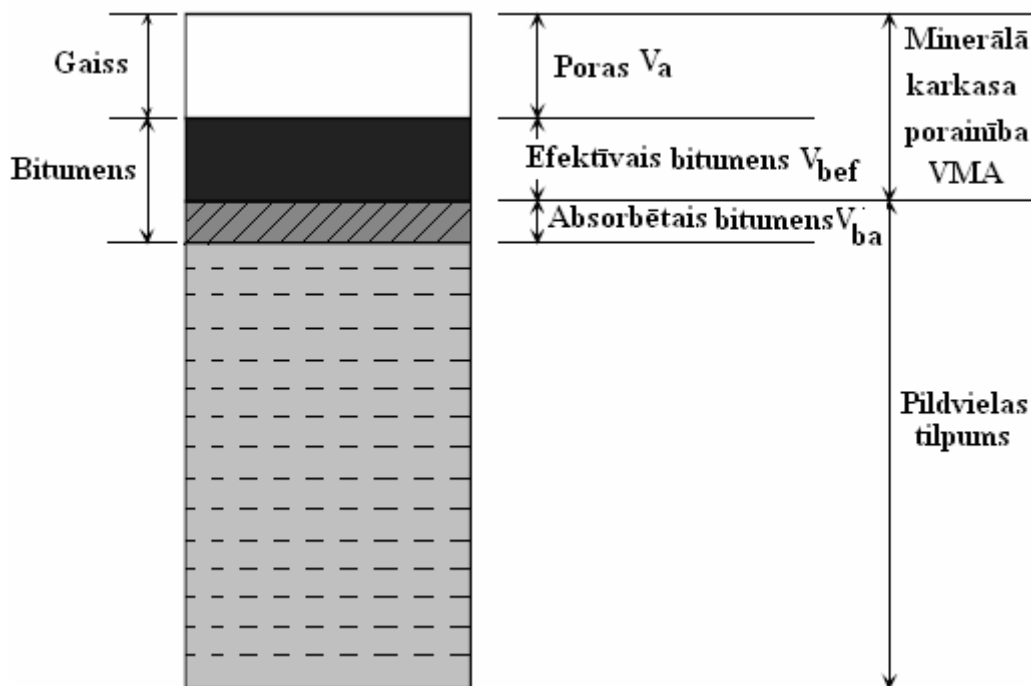
Paliekošo deformāciju vienādojumu un modeļu apskats [44]

Autors	Analīzes metodes	Paliekošo deformāciju vienādojums	Mainīgie	Testēšanas metode
Van de Loo (1976)	BISAR elastīgā slāņa teorija	$\varepsilon_p = c \cdot \sigma \cdot N^a$	ε_p – aksiālā paliekošā deformācija c – konstante σ – aksiālais spriegums (103,5 kPa) N – slogošanas ciklu skaits a – konstante	Aksiālais šļūdes tests
Kenis un Vangs (1997)	VESYS	$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_r \cdot \mu \cdot N^{-\alpha}$	ε_p – paliekošā deformācija N – slogošanas ciklu skaits ε_r – elastīgā deformācija $\mu = \frac{a \cdot b}{\varepsilon_r}$, $\alpha = 1 - b$,	Aksiālais cikliskās spiedes tests
Čengs un Lūtons (1988)		$\varepsilon_p = e_0 \cdot \exp \left[- \left[\frac{\rho}{N} \right]^b \right]$	ε_p – paliekošā deformācija e_0, ρ un b – korelācijas vienādojuma parametri	Cikliskās spiedes tests
Leahi (1989)		$\varepsilon_p = f(T, \sigma_d, V, N, \eta_{as}, P_{Was})$	ε_p – paliekošā deformācija T – temperatūra V – porainība σ_d – deviatora spriegums η_{as} – viskozitāte P_{Was} – bitumena saturs	Aksiālais cikliskās spiedes un šļūdes tests
Andersons (1989)		$\varepsilon_{vp} = a(\sigma) \cdot t^b$	ε_{vp} – viskozi-plastiskā deformācija $a(\sigma) = b_1 \sigma + b_2 \sigma^2$ t – laiks b, b_1, b_2 – korelācijas parametri	Aksiālais šļūdes tests

2.4. Asfaltbetona sastāvi un izejmateriālu īpašības

Asfaltbetona segums sastāv no trīs tilpuma pamatkomponentiem – bitumena, minerālmateriāla un gaisa porām. Asfaltbetona seguma deformatīvās īpašības ir atkarīgas no šo pamatkomponentu daudzuma un proporcijas. Pamatkomponentu proporciju raksturo šādi tilpuma parametri (sk. 2.24. att.).

- **Porainība (V_a)** – gaisa poru procentuālais tilpums starp ar bitumena saistvielu pārklātām pildvielas daļiņām sablīvētā asfaltbetona maisījumā.
- **Saistvielas saturs (P_b)** – bitumena saistvielas saturs masas procentos asfaltbetona maisījumā.
- **Minerālā karkasa porainība (VMA)** – ar minerālpildvielu neaizpildītais tilpums sablīvētā asfaltbetona maisījumā.
- **Absorbētās saistvielas saturs (V_{ba})** – asfaltbetona maisījuma minerālmateriāla absorbētais bitumena saistvielas saturs.
- **Neabsorbētās (efektīvais) bitumena saistvielas saturs (V_{bef})** – asfaltbetona maisījuma minerālmateriāla neabsorbētais bitumena saistvielas saturs.
- **Ar bitumenu aizpildīto poru saturs (VFB)** – minerālā karkasa procentuālais aizpildījums ar bitumena saistvielu.



2.24. att. Asfaltbetona seguma tilpuma parametri

Porainība (V_a), minerālā karkasa porainība (VMA) un poru aizpildījuma pakāpe ar bitumenu (VFB) ir galvenie iekšējie asfaltbetona paliekošo deformāciju veidošanos ietekmējoši parametri. Zems poru saturs asfaltbetona segumā ir iemesls zemei deformatīvajai noturībai, jo poru saturs asfaltbetona segumā tiek kompensēts ar bitumena saistvielu. Zema porainība tiek sasniegta ar lielu saistvielas saturu [62]. Savukārt pārāk liela porainība nodrošina labu ūdensuzsūci, līdz ar to zemu salizturību. Apakšējās un augšējās porainības robežas Latvijā stingri reglamentē tehnisko noteikumu prasības. Minerālā karkasa porainība (VMA) ir atkarīga no asfaltbetona maisījuma pildvielas granulometriskā sastāva, formas un smalknes satura [63]. Ar bitumenu aizpildīto poru saturs (VFB), tāpat kā porainība, ir atkarīgs no saistvielas satura asfaltbetona maisījumā. Palielinoties ar bitumenu aizpildīto poru daudzumam, samazinās rišu noturība, jo bitumena saistvielas termiskās izplēšanās koeficients ir daudz lielāks nekā tas ir minerālmateriālam. Augstās temperatūrās, bitumena saistvielai palielinoties tilpumā, aizpildās minerālā karkasa tukšumi, kas var veicināt pildvielas daļiņu savstarpējo attālināšanos. Šajā gadījumā pazūd minerālmateriāla granulometrijas un formas rakstura nozīme. Izprojektētā asfaltbetona maisījuma deformatīvā noturībā lielā mērā ir atkarīga no seguma sablīvēšanas pakāpes, ko raksturo iepriekš aprakstītie sablīvēta asfaltbetona seguma tilpuma parametri (V_a , VMA, VFB). Ir veikti vairāki pētījumi, kuros salīdzinātas paraugu sablīvēšanas metodes ar mērķi laboratorijas apstākļos noteikt reālajiem apstākļiem atbilstošāko asfaltbetona maisījumu sablīvēšanas metodi. Secināts, ka veltna blīvētājs saskaņā ar LVS EN 12697-33 un tā priekštecis Hvīma kompaktors laboratorijas apstākļos sablīvē paraugus līdzīgi kā ceļa veltnis uz ceļa. [64].

2.4.1. Saistviela

Bitumeni ir cieti vai sveķveida produkti, kurus veido ogļūdeņraži un to atvasinājumi, kas satur skābekli, slāpekli, sēru un atsevišķus metālus. Bitumeni nešķīst ūdenī, bet daļēji vai pilnīgi šķīst benzolā, hloroformā, sērogleklī u. c. organiskajos šķīdinātājos. Starp bitumeniem plašāku lietojumu guvuši naftas bitumeni. Naftas bitumeni pēc savas struktūras ir dispersas sistēmas, kurās dispersijas vide ir eļļas un sveķi, bet dispersā fāze ir asfaltēni (sk. 1.1. un 2.1. nodaļas) [1].

Bitumena īpašību svarīgākais raksturlielums ir viskozitāte, jo augstā temperatūrā tā īpašības ir līdzīgas šķidrums, savukārt zemās temperatūrās – cieta ķermeņa īpašībām. Viskozitātes raksturošanai ir izstrādātas vairākas gan standarta, gan zinātniskās metodes [65]. Viskozitāte ir deformācijas ātrums zem pieliktās slodzes, mērvienība – paskālsekunde (Pa·s);

praksē šo lielumu sauc par dinamisko viskozitāti. To nosaka saskaņā ar standarta LVS EN 12596 prasībām [66]. Dinamiskā viskozitāte ir pieskaitāma pie tiešiem viskozitātes rādītājiem, tomēr praksē bitumena saistvielu klasificē saskaņā ar LVS EN 12591 pēc netiešiem viskozitātes rādītājiem – tādiem kā mīkstēšanas temperatūra un adatas ieग्रimes dziļums jeb penetrācija [67–69]. Netiešie viskozitāte rādītāji ir noteikti ar normētiem testēšanas apstākļiem un neatspoguļo bitumena saistvielas tiešo fizikālo jēgu, bet dod iespēju to sagrupēt standarta klasēs (saskaņā ar LVS EN 12591). Dinamiskā viskozitāte ir neatņemama sastāvdaļa jebkuram reālās asfaltbetona īpašības aprakstošam reoloģiskajam modelim (sk. 2.3.2. nodaļu). Bitumena saistvielas elastīgo īpašību uzlabošanai augstās un zemās ekspluatācijas temperatūrās izmanto SBS polimēru, gumiju u. c. modifikatorus [70]. Modificētajam bitumenam salīdzinājumā ar parasto ceļu bitumenu ir augstāka izturība pret noguruma plaisu veidošanos zemās temperatūrās un rišu veidošanos augstā vasaras temperatūrā [71–72].

2.4.2. Pildviela

Pildviela ir otrs svarīgākais asfaltbetona izejmateriāls. Pildviela ir ciets, inerts materiāls, ko izmanto maisījumā sadrupinātu daļiņu veidā. Pildviela aizņem ap 70–85% no asfaltbetona maisījuma absolūtā tilpuma, veidojot minerālo karkasu [73–74]. Pildvielas pareiza izvēle un granulometriskā sastāva aprēķins ir viens no svarīgākajiem asfaltbetona maisījuma projektēšanas posmiem, kas ietekmē asfaltbetona reoloģiskās, fizikālās, mehāniskās īpašības un ilgmūžību. Pildvielas izvēles pamatkritēriji ir tās fizikālās un mehāniskās īpašības, kamēr tās ķīmiskais sastāvs un struktūra raksturo bitumena saistvielas un pildvielas adhēzijas īpašības.

Asfaltbetona deformatīvā noturība saskaņā ar Mora-Kulona (*Mohr-Coulomb*) vienādojumu (sk. 2.56 vienād.) ir atkarīga no minerālā karkasa un adhezīvās saites starp bitumena saistvielu un pildvielas daļiņu stiprību un ir izsakāma ar vienādojumu:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.56)$$

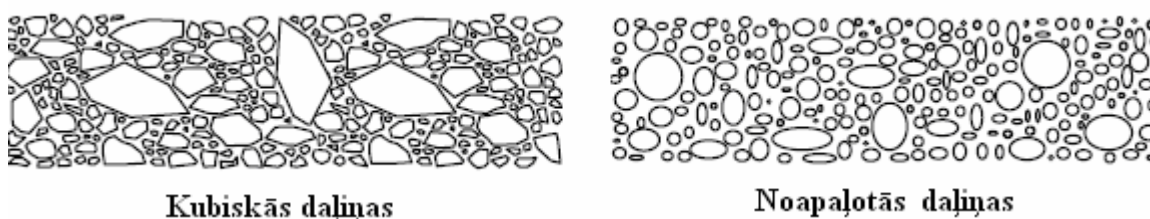
kur τ – bīdes spriegums, MPa;

c – kohēzija;

σ – normālais spriegums, MPa;

α – iekšējās berzes leņķis.

Minerālā karkasa stiprību nodrošina pildvielas daļiņu stiprība, forma un virsmas faktūra. Kubiskās daļiņas ar raupju virsmu nodrošina lielāku minerālā karkasa stiprību nekā noapaļotās daļiņas ar gludu virsmu (sk. 2.25. att.) [75]. Minerālā karkasa stiprību ietekmē arī bitumena saistvielas saturs, jo liela bitumena satura gadījumā attālinās blakusesošās pildvielas daļiņas, tādējādi samazinot minerālā karkasa stiprību [76]. Savukārt, ja ir zems saistvielas saturs, samazinās adhezīvās saites stiprība. Adhezīvās saites stiprība lielā mērā ir atkarīga no bitumena saistvielas ķīmiskā sastāva un minerālās pildvielas mineralogiskā sastāva. Labu adhezīvo saiti starp savā starpā slikti savienojamiem materiāliem, piemēram, bitumena saistvielu un granītu nodrošina ar virsmaktīvo vielu (VAV) ievadīšanu asfaltbetona maisījumā.



2.25. att. Minerālmateriāla daļiņu forma

Pildvielas īpašības, kas jāņem vērā, projektējot asfaltbetona sastāvu, var nosacīti sadalīt divās grupās[77].

- Materiālu īpašības
 - Ķīmiskais un mineralogiskais sastāvs
 - Blīvums
 - Porainība
 - Ūdens absorbcija
- Ģeometriskās īpašības [78–81]
 - Pildvielas daļiņu forma
 - Pildvielas daļiņu virsma
 - Granulometriskais sastāvs

Pašlaik, attīstoties Eiropas standartizācijai, tiek pieņemts un adaptēts jauns LVS EN 13043 standarts „Minerālmateriāli bituminētiem maisījumiem”, kurā sistematizētas pildvielas īpašības, lietošanas noteikumi un dotas atsauces uz attiecīgiem testēšanas standartiem – tipa testēšana [82].

Asfaltbetonā par pildvielām vairumā gadījumos izmanto dažāda izmēra granīta un dolomīta šķembas, oļus, smiltis.

Granīts – magmatiskais dziļumiezis, kas sastāv no laukšpata (ortoklaza – $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), kvarca un vizlas ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$). Granītam ir graudaini kristāliska uzbūve, blīvums – vidēji 2700 kg/m^3 , porainība – tikai 0,5–1,5%, spiedes robežstiprība – 100–250 MPa. Granītam raksturīga augsta salizturība, maza ūdensuzsūce un liela dilumizturība.

Dolomīts dabā sastopams dubultsāls veidā ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). Dolomīta blīvums ir $2800\text{--}2900 \text{ kg/cm}^3$, tas ir porains, ar labu ūdensuzsūci. Dolomītam ir vāji bāzisks raksturs [1].

2.4.3. Aizpildītājs

Aizpildītājs ir minerālmateriāls, kura daļiņas iziet cauri 0,063 mm granulometriskajam sietam. Aizpildītāja daļiņas aizpilda pildvielas karkasa tukšumus, tādā veidā palielinot asfaltbetona seguma blīvumu un stiprību. Lielās īpatnējās virsmas dēļ tās absorbē bitumena saistvielu, izveidojot asfalta mastiku. Mastikai salīdzinājumā ar tīro bitumena saistvielu ir daudz lielāka viskozitāte, tā uzlabo asfaltbetona deformatīvās īpašības augstā vasaras temperatūrā, tomēr ar aizpildītāju panāktais asfaltbetona seguma stinguma efekts ir salīdzinoši neliels zemu segas kalpošanas temperatūru gadījumā [83–84]. Ar pārāk lielu aizpildītāja daudzumu var zaudēt panākto pozitīvo efektu, jo būs nepieciešams liels bitumena saistvielas daudzums, lai pārklātu lielo īpatnējo virsmu, līdz ar to maisījums kļūs grūti sablīvējams un ātri novecosies. Mastikas viskozitāti ietekmē aizpildītāja daļiņu lielums, īpaši svarīgi novērtēt daļiņu saturu starp 0,063 un 0,25 mm sietiem: lielākās daļiņas nodrošina mastikas stingumu, savukārt smalkās uzlabo adhezīvās īpašības ar bitumena saistvielu. [85]. Minerālā pulvera un bitumena mijiedarbība ir atkarīga no pulvera ķīmiskā un mineralogiskā sastāva. Labākas adhezīvās īpašības ir bāziska rakstura aizpildītājiem – dolomīta un kaļķu miltiem.

2.3. tabulā apkopotas asfaltbetona izejmateriālu īpašību un ārējo faktoru izmaiņu ietekme uz paliekošo deformāciju veidošanos.

Rišu veidošanos ietekmējošie faktori [36]

	Faktors	Faktora izmaiņa	Faktora izmaiņas ietekme uz plastisko deformāciju
Pildviela	Daļiņu virsmas raupjums	No līdzenas uz raupju	Palielinās
	Granulometrija	No laužas uz nelauzta (taisnu)	Palielinās
	Daļiņu forma	No noapaļotas uz kubisko	Palielinās
	Daļiņu izmērs	Rupjo daļiņu daudzuma palielinājums	Palielinās
Saistviela	Viskozitāte	Palielinās	Palielinās
Asfaltbetona maisījums	Saistvielas saturs	Palielinās	Samazinās
	Porainība	Palielinās	Samazinās
	Sablīvējuma veids	Laboratorijā vai uz ceļa	
	Minerālā karkasa porainība	Palielinās	Samazinās
Ekspluatācijas apstākļi	Temperatūra	Palielinās	Samazinās
	Ūdens	No sausiem uz mitriem	Samazinās, ja maisījums ir ūdens jutīgs
	Daudzkārtējā slogošana	Palielinās	Samazinās
	Sprieguma/piepūles stāvoklis	Palielinās spiediens riteņu kontaktzonā ar segumu	Samazinās

2.5. Asfaltbetona sastāvu projektēšana

Ir izstrādātas vairākas asfaltbetona sastāvu projektēšanas metodes. Tādas ir Maršala, Hvīma un *Superpave* metodes, kuru mērķis ir izprojektēt noturīgus pret plastisko deformāciju un plaisu veidošanos maisījumus, balstoties uz noteiktiem, iepriekš uzdotiem kritērijiem [86]. To parasti sasniedz, izvēloties tehnisko specifikāciju prasībām atbilstošus izejmateriālus (pildvielu, aizpildītāju un bitumena saistvielu) un nosakot optimālu šo izejmateriālu saturu asfaltbetona maisījumā, tādā veidā sabalansējot vēlamo īpašību (stiprības, cietības, iestrādājamības, nogurumizturības un stabilitātes) kvantitatīvos rādītājus. Tomēr jāuzsver, ka nav tāda saistvielas satura, kas vienlaikus maksimizētu visas minētās īpašības. Līdz ar to projektējamā maisījuma optimālais saistvielas saturs tiek izvēlēts, balstoties uz to īpašību optimizāciju, kādas nepieciešamas konkrētajiem ekspluatācijas apstākļiem [87].

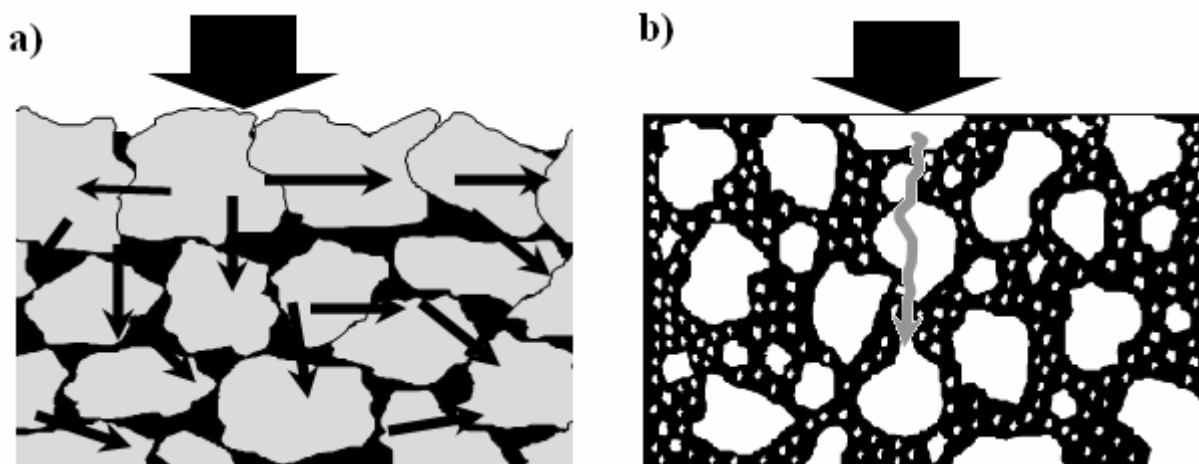
Asfaltbetona sastāva izvēles un projektēšanas metodika iekļauj šādus posmus.

- 1) Asfaltbetona maisījuma virskārtas tipa izvēle atkarībā no ekspluatācijas nosacījumiem un projekta uzdevuma.
- 2) Asfaltbetona maisījuma izgatavošanai paredzēto izejmateriālu – pildvielas un aizpildītāja testēšana saskaņā ar standarta LV EN 13043 prasībām un atbilstības Ceļu specifikācijas 2010 prasībām izvērtējums.

- 3) Asfaltbetona maisījuma izgatavošanai paredzētās bitumena saistvielas testēšana saskaņā ar standarta LVS EN 12591 prasībām un atbilstības Latvijas ceļu būves tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām izvērtējums.
- 4) Dažādu frakciju minerālmateriāla optimālās attiecības noteikšana – granulometriskā sastāva aprēķins.
- 5) Bitumena saistvielas optimālā satura noteikšana.
- 6) Asfaltbetona paraugu izgatavošana.
- 7) Asfaltbetona paraugu testēšana un rezultātu atbilstības tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām izvērtējums.
- 8) Bitumena saistvielas un minerālpulvera daudzuma korekcija nolūkā iegūt Ceļu specifikācijas 2010” prasībām atbilstošu asfaltbetona maisījuma sastāvu.

2.5.1. Asfaltbetona segumu tipi

Kopš deviņdesmito gadu sākuma šķembu mastikas asfaltbetona (SMA) un blīvā asfaltbetona (AC) tipu segumi guvuši plašu lietojumu Latvijas ceļu un ielu būvniecībā. Šķembu mastikas asfaltbetons izgudrots pagājušajā gadsimta sešdesmitajos gados Vācijā, un tā plašais lietojums Eiropā un citur pasaulē izskaidrojams ar daudzām tam piemītošajām pozitīvajām īpašībām [88–89]. SMA ir blīvs materiāls ar teicamu dilumizturību. Tam ir ļoti laba stiprība, saķere ar automobiļu riepām un deformatīvā noturība smagas transporta slodzes gadījumā [90]. Bitumena saistvielas lielā satura dēļ tam ir maza novecošanās intensitāte, tomēr saistvielas stabilitātes paaugstināšanai jālieto celulozes šķiedras [91]. Minerālo karkasu veido lauztā, nepārtrauktā granulometriskā līkne. Līdz pat 75% veido pildviela ar frakcijas lielumu virs 2 mm, nodrošinot slodzes sadalījumu minerālajā karkasā gan normālā, gan tangenciālā virzienā. (sk. 2.26. att.).



2.26. att. Slodzes sadalījums: a) SMA asfaltbetona seguma karkasā;
b) AC asfaltbetona seguma karkasā

2.5.2. Maršala metode

Maršala metodes pamatkonceptiju pirmoreiz noformulēja tās autors – Brūss Maršals (*Bruce Marshall*) 1939. gadā Misisipi Ceļu departamentā (*Mississippi Highway Department*). Metode tika standartizēta Amerikas materiālu un testēšanas biedrībā (*American Society for Testing and Materials*) kā *ASTM D-1559* standarts: „Bituminētā maisījuma noturība pret plastisko plūstamību (*Plastic Flow*), izmantojot Maršala iekārtu” [92]. Izmantojot standarta procedūras maisījuma sildīšanai, maisīšanai un sablīvēšanai, tika izgatavoti 63,5 mm augsti 100 mm diametra cilindriski asfaltbetona paraugi.

Projektēšanas metodes galvenās iezīmes ir sablīvēšanas veids, tilpumanalīze un Maršala stabilitātes un plūstamības tests. Paraugu sablīvēšanu veic ar triecienslodzi, izmantojot Maršala āmura iekārtu [93]. Triecienu skaits izvēlēts atkarībā no sagaidāmās transporta slodzes intensitātes un lieluma. Zemas satiksmes intensitātes gadījumā ($ESAL < 10^4$) triecienu skaits ir 35, vidējas ($ESAL = 10^4 - 10^6$) – 50, augstas ($ESAL > 10^6$) – 75. Maršala stabilitāte ir parauga uzņemtā maksimālā slodze pirms sagraušanas 60 °C temperatūrā. Maršala plūstamība ir parauga vertikālā deformācija pie maksimālās uzņemtās slodzes. Maršala metode ar Maršala stabilitātes un plūstamības testu dod iespēju atrast optimālo bitumena saistvielas saturu, kas apmierinātu tehniskajos noteikumos „Ceļu specifikācijas 2010” reglamentēto tilpuma parametru (V_a , VTM , VMA un VFB) robežas. Maršala metodes galvenā priekšrocība ir lētas un viegli pārvietojamas iekārtas, kā arī salīdzinoši īss testēšanas laiks. Metodes galvenais trūkums ir tas, ka paraugu sablīvēšana ar triecienslodzi atšķiras no maisījuma sablīvēšanas uz reālā ceļa vai ielas ar ceļa rulli. Turklāt Maršala stabilitātes tests neprecīzi novērtē asfaltbetona paraugu bīdes stiprību. Šo iemeslu dēļ

ar Maršala metodi bez papildpārbauzu veikšanas ir sarežģīti novērtēt izprojektētā maisījuma rišu noturību [94].

2.5.3. Hvīma metode

Viena no vecākajām maisījuma projektēšanas metodēm radīta 1927. gadā, kad Kalifornijas inženieris Frānsiss Hvīms (*Francis Hveem*) uzsāka izstrādāt asfaltbetona maisījuma projektēšanas metodiku bitumena saistvielas optimālā satura noteikšanai. Tās pamatā bija pildvielas īpatnējās virsmas koncepcija [95]. Saskaņā ar šo metodi saistvielas saturs ir atkarīgs no pildvielas daļiņu lieluma: jo smalkāka pildviela, jo lielāks bitumena saistvielas daudzums nepieciešams pildvielas daļiņu virsmas pārklāšanai. Tika izstrādātas projektēšanas diagrammas un tabulas ar bitumena saistvielas indeksa vērtībām, kas atkarīgas no pildvielas daļiņu īpatnējās virsmas. Īpatnējās virsmas reizinājums ar bitumena saistvielas indeksu dod saistvielas daudzumu kilogramos uz vienu kilogramu pildvielas. Nosakot teorētiski optimālo bitumena saistvielas saturu, tika izgatavota 64 mm augstu un 102 mm diametra cilindrisku paraugu sērija, izmantojot speciālu rotējošo blīvētāju. Bitumena daudzuma optimizēšanai maisījumā tika veikta sērija testu ar Hvīma stabilometru, kohezimetru, kā arī izplešanās tests (*swell-test*). Hvīma stabilometrs ir triaksiālā testa priekštecis, kurā izmantota triaksiālā tipa testēšanas sistēma stabilitātes noteikšanai, mērot šķērsdeformāciju zem aksiāli pieliktas slodzes. Maisījumi ar lielu saistvielas saturu uzrāda lielu deformāciju. Ar kohezimetru tiek novērtēta sasaiste starp pildvielas daļiņām, pārbaudot asfaltbetona sijas liecē. Izplešanās tests novērtē asfaltbetona paraugu ūdensjutību, nosakot ūdenscaurlaidību un paraugu uzbriešanu (tilpuma palielinājumu) ūdens absorbcijas rezultātā. Hvīma metodei ir divas galvenās priekšrocības: paraugu sablīvēšanas veids laboratorijā saskaņā ar Hvīma metodi ir līdzīgs reālajam asfaltbetona sablīvējumam uz ceļa vai ielas, un Hvīma stabilometrs atspoguļo karkasa iekšējo berzi, līdz ar to asfaltbetona paraugu noturību pret šķērsdeformācijām zem vertikālās slodzes. Tomēr metodes galvenais trūkums ir iekārtu lielie gabarīti un dārdzība. Hvīma stabilitātes radītāju izmanto ASV asfaltbetona seguma kvalitātes kontrolei saskaņā ar *ASTM D1561* un *AASHTO T246* [96–97].

2.5.4. SUPERPAVE metode

Superpave ir saīsinājums no *Superior Performing Asphalt Pavements* jeb asfaltbetona segums ar uzlabotām ekspluatācijas īpašībām un ir piecu gadu (no 1987. līdz 1992. gadam) un 150 miljonu dolāru vērtās *SHRP* (*Strategic Highway Research Program*) programmas pētījumu rezultāts. Viens no galvenajiem šās programmas pētījuma mērķiem bija izstrādāt

uzlabotu maisījuma projektēšanas procedūru, kurā būtu ņemtas vērā dažādas satiksmes intensitātes, ass slodzes un klimatiskie apstākļi. No 1993. gada tika ieviesta jaunā maisījumu projektēšanas metode ar nosaukumu „*Superpave*”. Jaunā maisījuma projektēšanas metode ietver jaunu bitumena saistvielas klasifikācijas apzīmējumu *PG (Performance Grading)*, vairākus specifiskus testus, kā arī karstā asfaltbetona maisījuma paraugu izgatavošanu ar rotējošu blīvēšanas iekārtu (*Gyratory Compactor*) [98]. *Superpave* metodē līdzīgi kā Maršala metodē ir veikta specifiskajām atbilstošu tilpuma parametru – porainības, minerālā karkasa porainības un ar bitumenu aizpildīto poru satura noteikšana. Būtiskā atšķirība no Maršala metodes – paraugu izgatavošanas veids ar rotējošu blīvētāju un ekspluatācija īpašību testēšanas metožu lietojums sablīvētā maisījuma deformatīvo īpašību izpētei.

Saskaņā ar Imres Papa (*Imre Pap*) pētījumu *Superpave* metode ar rotējošu blīvētāju un Maršala metode ar tricīenblīvētāju **dod līdzīgus optimālā bitumena saistvielas satura rezultātus** [99]. Tas dod iespēju izdarīt secinājumu, ka Maršala metode **ir piemērota** bitumena daudzuma optimizācijai maisījumā.

2.6. Apkopojums un secinājumi par 2. nodaļu

1. Asfaltbetona īpašības analizētas no fizikālķīmiskā un mehāniskā viedokļa. Asfaltbetons ir komplicēts materiāls, kas kā ceļa segas konstruktīvais slānis pie noteiktiem transporta slodzes un vides faktoriem var uzrādīt elastīgi-plastiski-viskozās īpašības.
2. Analizējot asfaltbetona segu rišu veidošanās apstākļus un procesus seguma virskārtā, noskaidrots paliekošo deformāciju veidošanās mehānisms, t. i., plastisko deformāciju uzkrāšanās sākotnējā stadijā notiek materiāla sablīvēšanās līdz maksimālajam blīvumam. Pēc maksimālā blīvuma sasniegšanas notiek materiāla pārvietošanās bīdes spēku iedarbības rezultātā. Tas nozīmē, ka izspieduma rišu veidošanās cēlonis zem smagas transporta slodzes ir asfaltbetona seguma, nevis apakšējo slāņu zemā deformatīvā noturība.
3. Neskatoties uz kvalitātes nodrošinājuma prasību izmaiņām Latvijas ceļu un transporta nozarē, pārejot no agrāk lietotajiem GOST standartiem uz *FAS (Finnish Asphalt Specification)* metodiku un kopš 2004. gada adaptējot Eiropas normatīvu (EN) prasības,

ceļu segumu kvalitāte Latvijā nav uzlabojusies. Tas nozīmē, ka pastāv būtiskas nepilnības ceļu segas kvalitātes nodrošinājuma sistēmā. Līdz 2009. gadam aktuālajos Latvijas ceļu būves tehniskajos noteikumos – Autoceļu specifikācijās 2005 – nav reglamentētas prasības ceļa seguma noturībai pret paliekošo deformāciju veidošanos.

4. Pastāv dažādas teorijas un metodes šo materiālu pētījumiem un modelēšanai. Noskaidrots, ka visperspektīvākais matemātiskais modelis paliekošo deformāciju prognozēšanai ir pakāpes funkcija, kas adekvāti apraksta sakarību: slogošanas ciklu skaits – paliekošā deformācija. Šīs sakarības ir iegūtas ar ekspluatācijas īpašību testēšanas metodēm – *wheel tracking test* un cikliskās spiedes testēšanas metodēm. Pakāpes funkcijas kā prognozēšanas metodes būtiska priekšrocība ir eksperimentālo pārbaužu veikšana un testa paraugu izgatavošana tuvināti reālajiem ceļa apstākļiem. Paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas izpētei, izmantojot šo metodi, jāveic detalizēts ārējo faktoru izvērtējums – transporta slodze jāizsaka ekvivalentās standarta ass slodzes (*ESAL*) vienībās un jānosaka Latvijas apstākļiem maksimālā ceļa seguma ekspluatācijas temperatūra.
5. Pastāv vairākas asfaltbetona projektēšanas metodes – Maršala, Hvīma un *Superpave* metodes, kuru mērķis ir izstrādāt noteiktiem ekspluatācijas apstākļiem atbilstošu, deformatīvi noturīgu maisījumu. Šo mērķi var sasniegt, nosakot optimālo izejvielu saturu asfaltbetona maisījumā, kas apmierinātu tehnisko specifikāciju prasības. Analizējot nesen veiktos šo metožu salīdzinošos pētījumus, noskaidrots, ka asfaltbetona ražošanas industrijā Latvijā plaši tiek lietota Maršala projektēšanas metode, kas salīdzinājumā ar *Superpave* metodi uzrāda līdzīgus optimālā saistvielas satura rezultātus, līdz ar to var secināt, ka Maršala metode ir piemērota bitumena daudzuma optimizācijai maisījumā.
6. Asfaltbetona ražošanai Latvijā plaši lietotām pildvielām – diabazam un dolomītam, kuru sastāvā virs 50% ir smagie un sārmzemju metāli, ir labas saķeres īpašības (adhēzija) ar bitumena saistvielu. AC un SMA asfaltbetona segumu, izgatavotu no šīm pildvielām, zemā doformatīvā noturība augstās seguma ekspluatācijas temperatūrās – saskaņā ar Mora-Kulona teoriju – ir saistīta ar asfaltbetona karkasa stiprības īpašībām, kas ir atkarīgas no pildvielu granulometriskā sastāva, formas un stiprības, kā arī bitumena saistvielas īpašībām un daudzuma.

3. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

3.1. Bitumena saistvielas izvēle

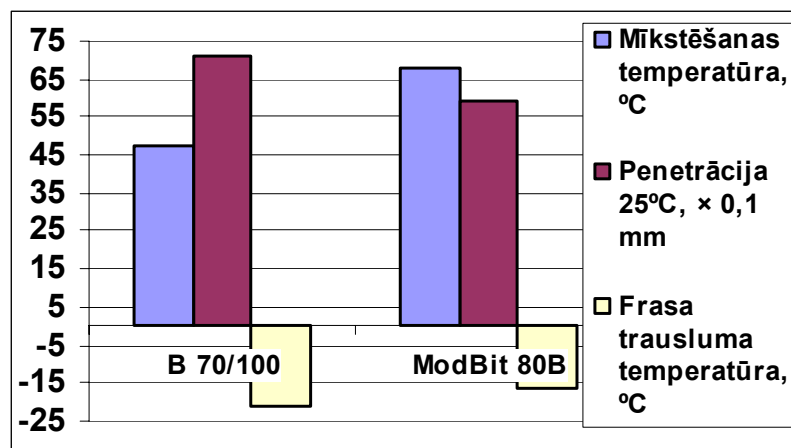
Asfaltbetona sastāvu izgatavošana veikta, izmantojot tradicionālo (B70/100) un netradicionālo SBS polimērmodificēto bitumena (PMB) saistvielu. Bitumeniem saskaņā ar LVS EN 12591 standartu „Ceļu bitumenu tehniskie noteikumi” noteiktas galvenās fizikālās, mehāniskā un ķīmiskās īpašības un izvērtēta atbilstība Latvijas ielu un ceļu būves tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām (sk. 3.1. tab.) [100].

3.1. tabula

Bitumenu B 70/100 un PMB īpašības

Rādītājs	Standarts	Prasība		Rezultāts		Novērtējums	
		Tradicionālā	Modificētā	Tradicionālā	Modificētā		
Penetrācija 25 °C t-rā, ×0,1 mm	LVS EN 1426	70–100	50–70	71	59	Atbilst	
Mīkstēšanas temperatūra, °C	LVS EN 1427	43-51	> 53	47,7	67,7	Atbilst	
Parafīna saturs, %	LVS EN 12606	≤ 2,2	–	1,1	–	Atbilst	
Frasa trausluma temperatūra, °C	LVS EN 12593	≤ –10	> –15	–21,1	–16	Atbilst	
Šķīdība toluolā, %	LVS EN 12592	> 99,0	–	99,27	–	Atbilst	
Kinemātiskā viskozitāte 135 °C t-rā, mm ² /s	LVS EN 12595	> 230	–	322	–	Atbilst	
Uzliesmošanas temperatūra, °C	LVS EN 22592	> 230	> 235	320	349	Atbilst	
Elastīgā atjaunošanās, %	LVS EN 22592	–	> 50	–	88		
Cietējumpretestība LVS EN 12607-1	Masas izmaiņa, %	≤ 0,8	< 0,5	-0,050	0	Atbilst	
	Paliekošā penetrācija, %	LVS EN 1426	> 50	> 35,4	72,2	40	Atbilst
	Elastīgā atjaunošanās, %	LVS EN 22592	–	> 50	–	84	Atbilst
Homogēniskums pēc noslāņošanās	Mīkstēšanas temperatūras atšķirība, °C	–	< 5	–	1,9	Atbilst	
	Penetrācijas 25 °C t-rā atšķirība, 0,1 mm	LVS EN 13399	–	< 9	–	6	Atbilst

Praktiskā pieredze Latvijā rāda, ka asfaltbetona maisījumi ar tradicionālo bitumenu B70/100 uzrāda neapmierinošas deformatīvās īpašības, pat ja tās atbilst vietējo tehnisko noteikumu prasībām. Šim mērķim veikta bitumena saistvielu B70/100 un PMB īpašību izpēte. Viens no galvenajiem cēloņiem ir neapmierinošās tradicionālās saistvielas īpašības augstās vasaras temperatūrās. Bitumena saistvielas B70/100 īpašības ir salīdzinātas ar PMB bitumena saistvielas īpašībām. Analizējot iegūtos rezultātus, konstatēts, ka PMB saistvielai ir zemāka adatas penetrācija (+25 °C t-rā), augstāka mīkstēšanas temperatūra, lielāka kinemātiskā viskozitāte, kā arī augstāka (-16 °C) trausluma temperatūra (sk. 3.1. att.).



3.1. att. Bitumena saistvielu B70/100 un PMB īpašību salīdzinājums

3.2. Pildvielas izvēle

Asfaltbetona pildviela izvēlēta tā, lai būtu iekļauti galvenie asfaltbetona ražošanai Latvijā lietotie dabiskie akmensmateriāli – dolomīts, granīts un diabazs (tradicionālās pildvielas). Pildvielai ir noteiktas galvenās fizikālās (daļiņu forma, blīvums u. c.) un mehāniskās (Losandželosas koeficients – ložu dzirnavu rādītājs) īpašības un izvērtēta atbilstība tehnisko noteikumu prasībām, kuros ir reglamentēta pildvielu kategoriju (pēc kvalitātes rādītājiem) piemērotība asfaltbetona ražošanai atkarībā no autoceļa ekspluatācijas nosacījumiem – satiksmes intensitātes (sk. 3.2. tab.). Pildvielu īpašību iedalījums kategorijās ir dots LVS EN 13043 standartā „Minerālmateriāli bituminētajiem maisījumiem un virsmas apstrādēm ceļiem, lidlaukiem un citiem satiksmes laukumiem” [82].

Pildvielu fizikāli mehānisko īpašību salīdzinājums

Šķembu izcelsme	Frakcija, mm	Īpašības					
		Daiļu <0,063 mm saturs, %	Losandželas koeficients	Ložu dzirnavu rādītājs (<i>Nordic</i>)	Plāksnainības indekss	Salukusum- izturība	Daiļu blīvums, kg/m ³
„Dolomitas” Lietuva (LIM)	2–5	3,1	–	–	11	6	2790
	5–8	1,3	–	–	11	4	2790
	8–11	0,9	23	18	9	4	2780
	11–16	2,4	25	–	9	5	2790
Granīts, Zviedrija (GR)	2–5	1,1			7	–	2680
	5–8	0,7			11	–	2690
	8–11	1,1	21	8	10	–	2650
	11–16	0,9	21	8	12	–	2670
Diabazs (D) <i>NCC ROAD AB</i>	2–5	1,5	–	–	9	–	3030
	5–8	1,5	–	–	5	0,9	3030
	8–11	1,4	19	–	8	0,6	3010
	11–16	0,9	19	10	4	0,5	3010
Martena tēraudkausēšanas sārņi (MTS)	11–16	–					
	5–11	–					
	2–11	–	10	4	3	2	3310
	0–5	–	–	–	–	–	3310

Ražošanas nozarēs Eiropā un Latvijā veidojas lieli tērauda ražošanas blakusproduktu atkritumu krājumi, kurus var lietderīgi izmantot par netradicionālo izejvielu asfaltbetona ražošanai. Akciju sabiedrībā „Liepājas metalurģis” martena tēraudkausēšanas procesā kā blakusprodukts rodas martena tēraudkausēšanas sārņi (MTS). MTS materiāls ilgstošā laika periodā uzkrājas bez plašāka lietojuma. Patlaban tā kopējie pieejamie krājumi ir aptuveni 5 miljoni m³. MTS sārņi veidojas, atdziestot izkausētām silikātu un metālu oksīdu maisījumiem (sk. 3.3.tab.).

MTS šķembu ķīmiskais sastāvs

Oksīdu saturs, %					
CaO	MgO	SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃
30,4 – 40,1	14,5 – 18,57	16,9 – 19,1	9,8 – 16,3	5,2 – 5,6	4,0 – 5,2

Drupinātā un frakcionētā veidā šos sārņus ir iespējams izmantot asfaltbetona ražošanā, pilnīgi vai daļēji ar tiem aizstājot tradicionālos minerālmateriālus. Veikta tradicionālās un MTS pildvielas īpašību izpēte un izvērtēta to atbilstība tehnisko noteikumu prasībām. Salīdzinot iegūtos rezultātus, konstatēts, ka MTS pildvielai ir zemāka drupināmība (LA=10% un NT=4%), labāka forma (FI=3%) un zems aizpildītāja saturs (< 0,063 mm = 0,1%; sk. 3.4. tab.). Iegūtie rezultāti dod iespēju izvirzīt hipotēzi, ka, izmantojot MTS pildvielu asfaltbetona ražošanā, tiks iegūts pret lielām slodzēm izturīgs materiāls ar lielu minerālā karkasa iekšējo berzes leņķi, nodrošinot teicamu automobiļu riepu saķeri ar ceļa segumu.

Rupjās pildvielas atbilstība „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām pie $AADT > 3500$

Rādītājs	Standarts	Prasība		Rezultāts				Novērtējums
		Blīvais (AC)	Šķembu mastikas (SMA)	Lim	D	GR	MTS	
Formas indekss	LVS EN 933-3	≤ 15	≤ 15	11	9	12	3	Atbilst
Losandželosas koeficients	LVS EN 1097-2	≤ 20	≤ 20	25	13	12	10	Lim neatbilst
Magnija sulfāta tests	LVS EN 1367-2	≤ 18	≤ 18	6	0,9	–	2	Atbilst
Aizpildītājs < 0,063 mm	LVS EN 933-1	≤ 2	≤ 2	2,4	1,4	1,1	0,1	Lim neatbilst
Nordisks (Nordic) tests	LVS EN 1097 - 9	≤ 10	≤ 10	18	10	8	4	Lim un D neatbilst

3.3. Asfaltbetona sastāvu projektēšana un īpašības

Saskaņā ar Maršala metodi, izmantojot tradicionālos un netradicionālos (MTS pildvielu un modificēto bitumenu) izejmateriālus, izprojektēti šķembu mastikas (SMA) un blīvā asfaltbetona (AC) sastāvi. Kopā laboratorijas apstākļos izgatavoti septiņi asfaltbetona maisījumi, divi no kuriem ir ar netradicionālajām izejvielām – AC 11/Ref asfaltbetona

maisījums ar MTS pildvielu un bitumenu B70/100 un SMA 16/Mod ar granīta pildvielu un PMB saistvielu. 3.5. tabulā ir apkopoti dati par izprojektēto asfaltbetonu sastāviem.

3.5. tabula

Asfaltbetona maisījumu AC un SMA sastāvi

Asfaltbetona maisījuma tips	Pildvielas frakcija d-D, masas %							Bitumens	
	11-16	5-11	8-11	5-8	2-5	0-5	Dolomīta milti	B70/100	ModBit
AC 11/Lim ³⁾	–	37,7	–	–	11,3	37,7 ¹⁾	7,6	5,7	–
AC 11/D5 ⁵⁾	–	–	21,9	7,6	1,9	60,2	3,8	4,6	–
AC 11/Ref ⁶⁾	14,0	29,8	–	–	–	42,9	6,5	6,8	–
AC 16/Lim	20,9	29,5	–	–	1,0	37,1 ²⁾	6,6	4,9	–
AC 8/Lim	–	–	–	27,2	15,0	42,2 ¹⁾	9,4	6,1	–
SMA 16/Gr	39,9	–	28,3	9,5	–	14,1	7,3	–	5,9
SMA 11/D	–	–	51,7	17,9	0,9	15,1	8,5	5,5	–

¹⁾ Dabiskā mazgātā smiltis

²⁾ Drupinātā smiltis

³⁾ Lim – dolomīts

⁴⁾ Gr – granīts

⁵⁾ D – diabazs

⁶⁾ Martena krāsns sārņi

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

- granulometriskais sastāvs;
- tilpuma parametri (V_a , VMA un VFB);
- paraugu izgatavošanas nosacījumi – triecienu skaits un sablīvēšanas temperatūra;
- Maršala stabilitātes un plūstamības atbilstība „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām.

Granulometriskā sastāva projektēšanas pamatuzdevums ir noteikt dažādu frakciju pildvielas proporciju tā, lai uzprojektētā pildvielas maisījuma granulometriskais sastāvs apmierinātu asfaltbetona maisījumu AC un SMA minimālo un maksimālo pieļaujamo robežu, kas dota tehniskajos noteikumos.

Tilpuma parametru noteikšanai nepieciešams aprēķināt teorētisko bitumena saistvielas saturu, kurš saskaņā ar 3.1 vienādojumu ir atkarīgs no izvēlētā materiāla daļiņu blīvuma un dažādu frakciju minerālmateriāla daudzuma projektētā asfaltbetona maisījumā (sk. 3.2 vienād.).

$$B^{teor} = \frac{2,650}{\rho_{min}} \cdot B^{2,650} \quad (3.1)$$

kur B^{teor} – teorētiskais saistvielas saturs, masas %;

$B^{2,650}$ – saistvielas saturs, ja pildvielas daļiņu blīvums ir 2,650 g/cm³;

ρ_{min} – minerālmateriāla daļiņu blīvums, g/cm³.

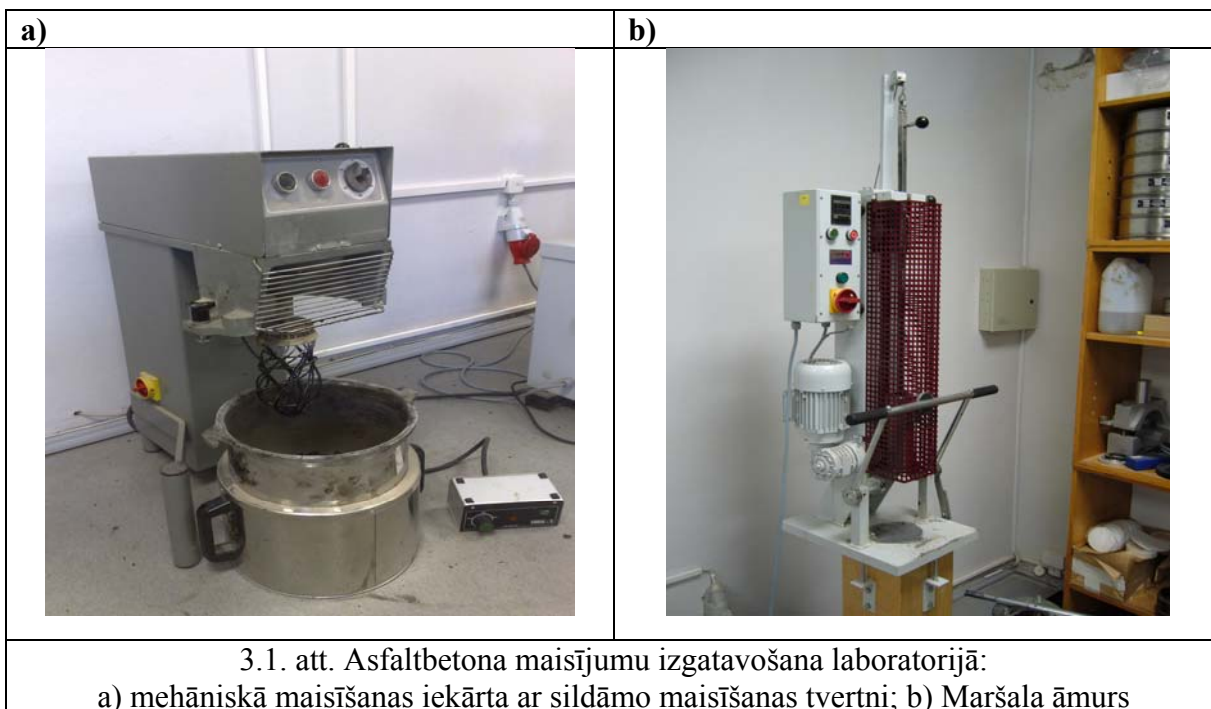
Tā kā kopējais minerālmateriāla maisījums sastāv no vairākām dažāda blīvuma frakcijām – rupjajām un smalkajām pildvielām un aizpildītāja, kopējo minerālmateriāla blīvumu aprēķina pēc formulas:

$$\rho_{\min} = \frac{100}{\left(\frac{P_1 + P_2 + P_3}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}\right)}, \quad (3.2)$$

kur P_1, P_2, P_3 – minerālmateriālu frakciju daudzums kopējā minerālmateriālu maisījumā, %;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – minerālmateriālu frakciju blīvums, g/cm³.

Asfaltbetona maisījumu izgatavošanai izmantota mehāniskā maisīšanas iekārta ar sildāmo maisīšanas tvertni (sk. 3.1.a att.). Pirms maisīšanas minerālmateriāls ir izžāvēts un kopā ar bitumena saistvielu uzsildīts līdz 170 °C (izņemot aizpildītāju). Modificētā bitumena saistviela ModBit 80B pirms maisīšanas uzsildīta līdz 190 °C. Pēc maisīšanas paraugi tika ievietoti cilindriskās, iepriekš uzsildītās tērauda formās un atdzesēti līdz blīvēšanas temperatūrai – 140 °C AC maisījumiem, 145 °C SMA maisījumiem un 155 °C SMA 16 maisījumam ar modificēto bitumenu. Paraugu sablīvēšanai izmantota Maršala āmura iekārta (sk. 3.1.b att.). Sablīvēšana veikta ar triecienslodzi – 50 sitieniem no katras puses, kas saskaņā ar tehnisko noteikumu prasībām atbilst satiksmes intensitātei $AADT_{pievestā} > 3500$.



Asfaltbetona sastāviem tika veikta fizikālo īpašību – sablīvējuma analīze, ko raksturo trīs tilpuma parametri – porainība (V), minerālā karkasa porainība (VMA) un ar bitumenu

aizpildīto poru saturs (VFB). Analīzes mērķis bija noteikt optimālo saistvielas daudzumu, kurš apmierinātu tehniskajos noteikumos reglamentētās robežas (sk. 3.6. tab.).

3.6. tabula

Tehnisko noteikumu prasības AC un SMA maisījumiem pie $AADT_{pievestā} > 3500$

Rādītājs	Standarts	Prasība		Rezultāts							Novērtējums
		AC	SMA	AC11 Lim	AC11 D	AC11 Ref	AC16 Lim	AC8 Lim	SMA11 D	SMA 16 Mod Bit	
Paliekošā porainība, %	LVS EN 12697-8	1,5–3,5	2,0–3,5	3,3	3,2	3,4	3,5	2,8	3,4	4,7	Atbilst
Mīnerālā karkasa porainība, %		≥ 15	≥ 17	16,7	15,4	16,4	15,7	17,3	17,5	18,3	Atbilst
Ar bitumenu aizpildītas poras, %		≤ 86	≤ 90	80,4	79,3	79,1	77,6	83,8	80,6	74,8	Atbilst
Maršala stabilitāte, kN	LVS EN 12697-34	≥ 10	≥ 5	8,7	10,1	13,0	10,0	7,9	6,8	7,7	AC 11/Lim un AC 8/Lim neatbilst
Maršala plūstamība, mm		2–4	2-4	1,9	2,0	3,1	2,7	2,8	3,4	2,8	Atbilst
Maršala triecienu skaits	LVS EN 12697-30	2 × 50		2 × 50							Atbilst
Paraugu izgatavošanas temperatūra		135 ± 5 °C		140 °C				145 °C		Atbilst	

Porainība ir gaisa tilpums starp pildvielas daļiņām, pārklātām ar bitumena saistvielu. Porainību nosaka saskaņā ar formulu:

$$V_a = 100 \times \frac{\rho_{\max} - \rho_{\text{tilp}}}{\rho_{\max}}, \quad (3.3)$$

kur V_a – Maršala paraugu porainība, tilpuma %;

ρ_{tilp} – asfaltbetona Maršala paraugu tilpumblīvums (ar porām), g/cm³;

ρ_{\max} – asfaltbetona maisījuma maksimālais blīvums (bez porām), g/cm³.

Mīnerālā karkasa porainība sastāv no gaispildītām porām un neabsorbētas bitumena saistvielas. To nosaka saskaņā ar formulu:

$$VMA = 100 - \frac{\rho_{\text{tilp}} \times P_s}{\rho_{\min}}, \quad (3.4)$$

kur VMA – mīnerālā karkasa porainība, tilpuma %;

P_s – minerālmateriāla daudzums asfaltbetona maisījumā, masas %.

Ar bitumenu aizpildīto poru saturs raksturo minerālā karkasa aizpildījuma pakāpi ar porām un ir atkarīgs no porainības, jo, samazinoties paliekošajai porainībai, palielinās ar bitumenu aizpildīto poru saturs. To nosaka saskaņā ar formulu:

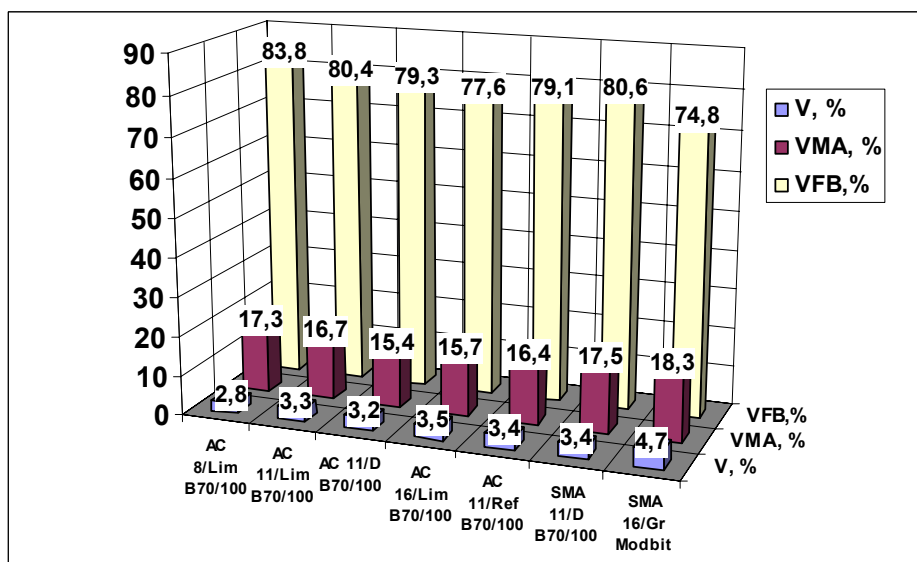
$$VFB = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA}, \quad (3.5)$$

kur VFB – ar bitumena aizpildīto poru saturs, tilpuma %;

VMA – minerālā karkasa porainība, tilpuma %;

V_a – Maršala paraugu porainība, tilpuma %.

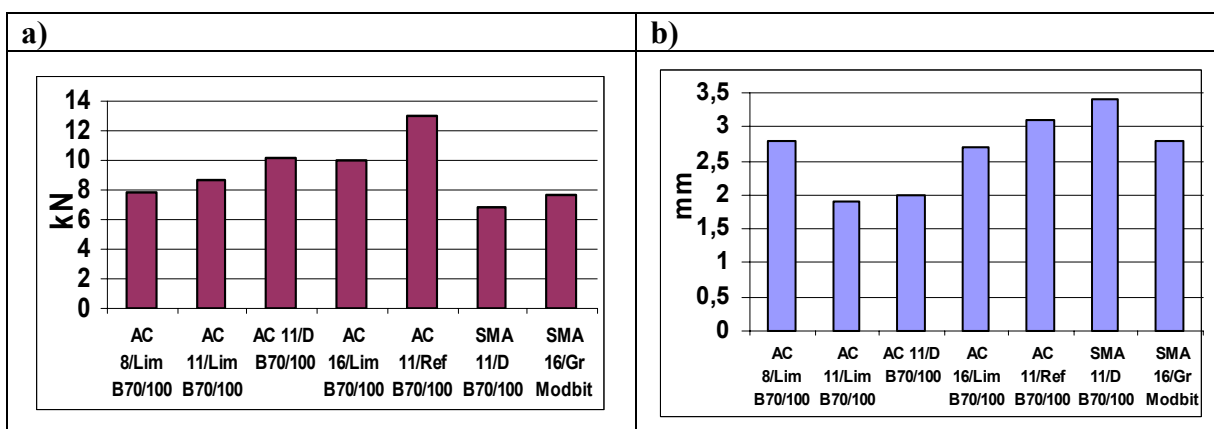
Analizējot uzprojektēto paraugu īpašības, tika konstatēts, ka tilpuma parametri testa paraugiem AC apmierina tehnisko noteikumu prasības. Ir svarīgi atzīmēt, ka testa paraugs SMA 16/Mod pie optimāla saistvielas satura uzrāda 4,7% lielu porainību, kas pārsniedz tehniskajos noteikumos reglamentēto augšējo robežu – 3,5% (sk. 3.2. att.).



3.2 att. Asfaltbetona sastāvu fizikālās īpašības

3.3. attēlā apkopotas testa paraugu mehāniskās īpašības: paraugu spiedes stiprība zem statiskā slogojuma 60 °C temperatūrā (Maršala stabilitāte) un deformācija sabrukšanas brīdī (Maršala plūstamība) pie paraugu sablīvējumiem ar optimālu bitumena saistvielas saturu (sk. 3.5. tab.). Salīdzinot iegūtos rezultātus, konstatēts, ka paraugam AC 11/Ref salīdzinājumā ar

pārējiem paraugiem ir ievērojami lielāka Maršala stabilitāte – 13 kN. Jāatzīmē, ka visu testa paraugu mehāniskās īpašības atbilst „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām.



3.3. att. Asfaltbetona sastāvu mehāniskās īpašības: Maršala stabilitāte (a) un Maršala plūstamība (b)

3.4. Testēšanas iekārtas un metodika

Paliekošo deformāciju izpētei pasaulē ir izstrādātas daudzas metodes. Vairākas no tām ir izstrādātas *SHRP (Strategic Highway Research Program)* pētījumu programmas ietvaros un adaptētas gan ASV, gan Eiropā. Eksploatācijas īpašību testēšanas metodes var iedalīt šādās trīs grupās: pamattesti, empīriskie testi un reālos apstākļus imitējošie testi [101].

1. Fundamentālie testi jeb pamattesti

- 1) Aksiālās spiedes tests – cilindrisko asfaltbetona paraugu pārbaude uz šļūdi, ciklisko spiedi un stiprību zem vienaksiālā spiediena (nav sānspiediena);
- 2) Triaksiālais spiedes tests – cilindrisko asfaltbetona paraugu pārbaude uz šļūdi, ciklisko spiedi un stiprību zem triaksiālā spiediena (papildus ar vakuumiekārtu ir nodrošināts sānspiediens).

2. Empīriskie testi

- 1) Maršala tests.
- 2) Hvīma tests.

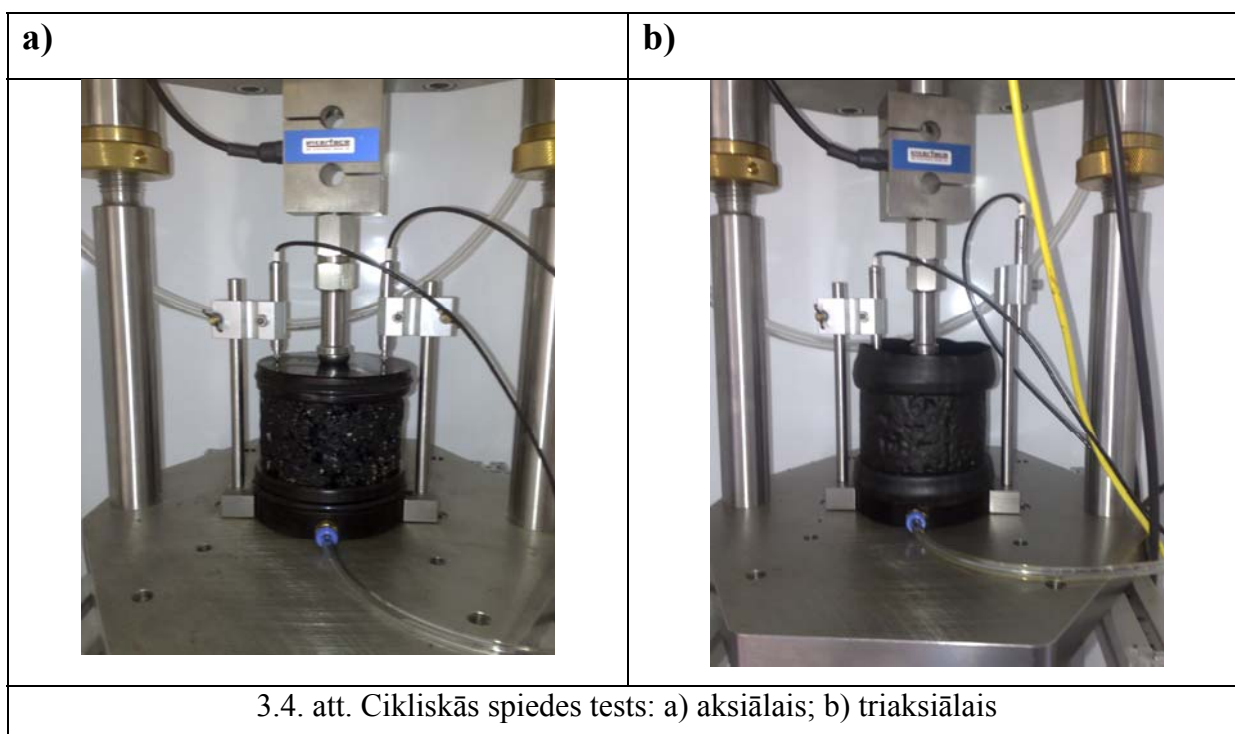
3. Reālos apstākļus imitējošie testi

- 1) Riteņu sliežu veidošanās tests (*Wheel Tracking Test*).

- 2) Asfalta seguma analizators – asfalta plātne vai cilindriskie asfaltbetona paraugi (alumīnija ritenis).
- 3) Hamburgas *Wheel Tracking Test* – asfalta plātnes vai cilindrisko asfaltbetona paraugu testēšanai ūdenī.

3.4.1. Aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests

Paliekošās deformācijas asfaltbetona segumā attīstās, pakāpeniski palielinoties pielikto transporta slodžu skaitam. Aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests dod iespēju noteikt asfaltbetona paraugu paliekošās deformācijas pie cikliskā slogojuma, pieliekot paraugam vairākus tūkstošus slogojuma ciklu. Triaksiālā slogojuma gadījumā paraugam tiek pielikta horizontālā sānslodze. Tā ierobežo parauga sānu deformāciju, kas salīdzinājumā ar aksiālo slogojumu ir daudz tuvāka reāliem apstākļiem. Tā kā testēšanas sistēma ir izvietota speciālā termokamerā, testēšanu iespējams veikt dažādās temperatūrās, tādā veidā izvērtējot temperatūras ietekmi uz paliekošo deformāciju veidošanos. 3.4. attēlā ir parādīta aksiālā un triaksiālā slogošanas sistēma. Testēšanas iekārtai ir maināms slodzes lielums, slogošanas un atslogošanas laiks, ciklu skaits, slogošanas veids (haversinusoidālā, bloka). Vertikālo deformāciju nosaka ar *LVDT (Linear Variable Differential Transducer)* pārvietojuma indikatoru. Šī metode ir standartizēta saskaņā ar standartu LVS EN 12697-25 [102].



3.4.2. Aksiālais un triaksiālais šļūdes tests

Asfaltbetonam spriegoti-deformētā stāvoklī piemīt sarežģīts īpašību komplekss: elastība, plastiskums un šļūde (sk. 2.3.3. nodaļu). Kopējo deformāciju ε_t var sadalīt laikā nemainīgā komponentē un laikā mainīgā komponentē. 3.6. vienādojums apraksta kopējās deformācijas četras komponentes (sk. viskozi-elastīgi- plastisko teoriju).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp}, \quad (3.6)$$

kur ε_t – kopējā deformācija, mm;

ε_e – elastīga atgriezeniskā, no laika neatkarīgā deformācija, mm;

ε_p – plastiskā neatgriezeniskā, no laika neatkarīgā deformācija, mm;

ε_{ev} – viskozā atgriezeniskā, no laika atkarīgā deformācija, mm;

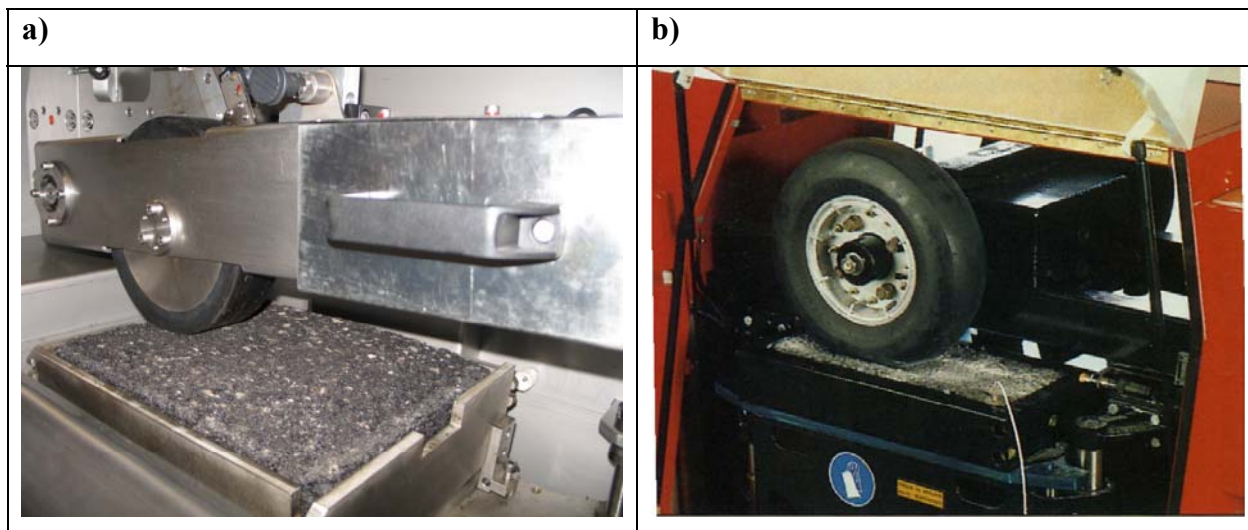
ε_{ep} – viskozā neatgriezeniskā, no laika atkarīgā deformācija, mm.

Šļūdes testu veic, pieliekot cilindriskiem asfaltbetona paraugiem statisko slodzi un nosakot rezultējošo paliekošo deformāciju. Tipiskā šļūdes līkne ir parādītā 2.22. attēlā. Veicot šļūdes testu, iespējams noteikt momentāno elastīgi atgriezenisko, no laika neatkarīgo plastisko un no laika atkarīgo viskozi-elastīgo un viskozi-plastisko deformāciju. Šļūdes testu var veikt vai nu ar vienu sloģošanas-atsloģošanas ciklu, vai ar vairākiem cikliem. Tomēr aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests salīdzinājumā ar šļūdes testu precīzāk raksturo asfaltbetona paraugu deformatīvās īpašības zem transporta slodzes [103].

3.4.3. Riteņu sliežu (rišu) veidošanās testa (*Wheel Tracking test*) iekārtas

Riteņu sliežu veidošanās tests ir Eiropā izplatītākā un saskaņā ar LVS EN 12697-22 standartizētā testēšanas metode rišu noturības noteikšanai laboratorijas apstākļos [104]. Asfaltbetona deformatīvo noturību nosaka prizmveida asfaltbetona paraugiem, izgatavotiem saskaņā ar standartu LVS EN 12697-33, pakļaujot tos 700 N lielai kustīgā riteņa cikliskai slodzei ar ātrumu 26,5 cikli minūtē (sk. 3.5.a att.) [105]. Testējamā parauga izmēri ir 305×305 mm, biezums – 40–100 mm. Testēšanu veic 40–60 °C temperatūrā. Riteņa iespiešanās dziļumu nosaka ar *LVDT* pārvietojuma indikatoru. Rezultātā tiek iegūts grafiks: ciklu skaits – paliekošā deformācija. Analizējot iegūtos rezultātus, aprēķinām deformācijas ātrumu W_{air} un nosakām to atbilstību tehnisko noteikumu prasībām. Metode seguma kvalitātes pārbaudēm Latvijā tiks ieviesta no 2010. gada.

Lielā jeb franču riteņu sliežu veidošanas iekārta (sk. 3.5.b att.) izgudrota Francijā un veiksmīgi tiek izmantota jau vairāk nekā 20 gadus. Metode ir standartizēta saskaņā ar standartu LVS EN 12697-22. Pārbaudi veic asfaltbetona seguma ceļiem, projektētiem 13 t un lielākai ass slodzei. Testējamā parauga izmēri ir 500×180 mm, biezums – līdz 100 mm. Paraugs ir pakļauts 5000 N lielai kustīgā riteņa slodzei ar ātrumu 1 Hz. Riteņa un parauga kontaktpiediens testēšanas laikā ir 600 kPa, kas ir ļoti tuvs kravas transporta kontaktpiedienam uz ceļa vai ielas. Testēšanu veic 40–60 °C temperatūrā.

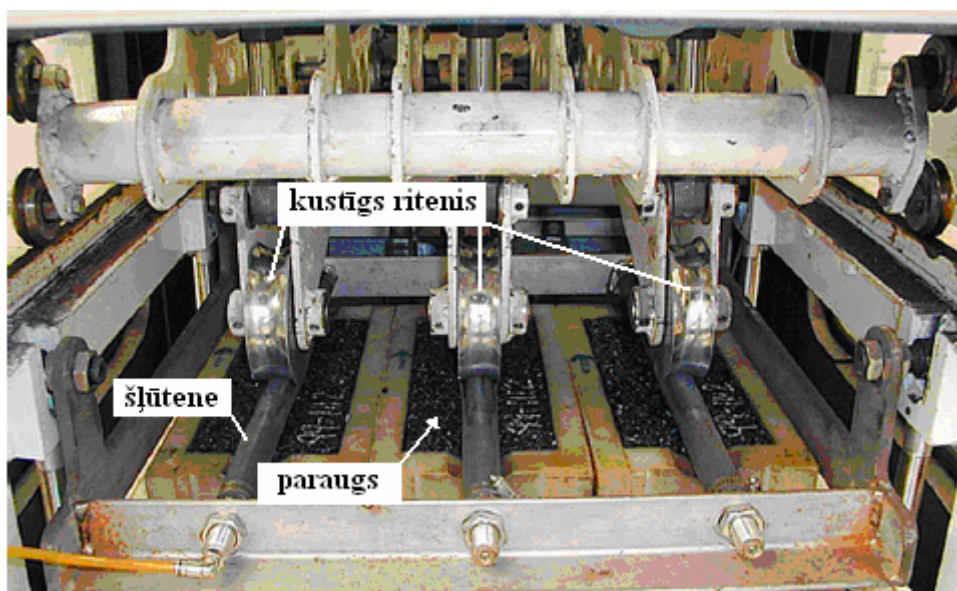


3.5. att. *Wheel Tracking* testēšanas iekārtas: a – mazā iekārta; b – lielā iekārta

ASV asfaltbetona seguma deformatīvās noturības izpēti zem kustīgā riteņa slodzes veic ar Džordžijas noslogotā riteņa testēšanas iekārtu (*Georgia loaded wheel tester*) *GLWT*. Tā izgudrota pagājušā gadsimta 80. gadu vidū pētījumu programmas *Evaluation of Rutting Characteristics of Asphalt Mixes Using Load Wheel Tester* ietvaros starp ASV Džordžijas Transporta departamentu un Džordžijas Tehnoloģisko institūtu [106]. Testēšana ar *GLWT* iekārtu tiek veikta asfaltbetona plātnēm vai 150 mm cilindriskiem paraugiem, izgatavotiem ar Maršala metodi vai ar rotējošo blīvētāju. Parauga virsmai pieliekta pneimošļūtene ar horizontālu, taisnu posmu ar 690 kPa iekšējo spiedienu, kuru slogo ar 445 N lielu kustīgā alumīnija riteņa slodzi (sk. 3.6. att.) . Slodzi *GLWT* iekārta nodod nevis tieši paraugam, kā riteņu sliežu veidošanas testā, bet caur šo pneimošļūteni. Testu veic gan laboratorijā izgatavotiem, gan no asfaltbetona ceļa segas izurbtiem paraugiem.

Asfaltbetona seguma analizators (*Asphalt pavement analyzer*) *APA* ir *GLWT* iekārtas modifikācija. To pirmo reizi izgatavoja 1996. gadā ASV Ceļa seguma tehnoloģijas korporācija (*Pavement Technology Inc.*) ar mērķi novērtēt karstā asfaltbetona maisījuma rišu

veidošanos, nogurumu un izturību pret ūdens iedarbību. Testēšanu veic saskaņā ar standarta *AASHTO TP 63* prasībām [107]. Testēšanas ilgums ir 8000 sloģošanas cikli 40–60 °C temperatūrā.



3.6. att. Asfaltbetona seguma analizators

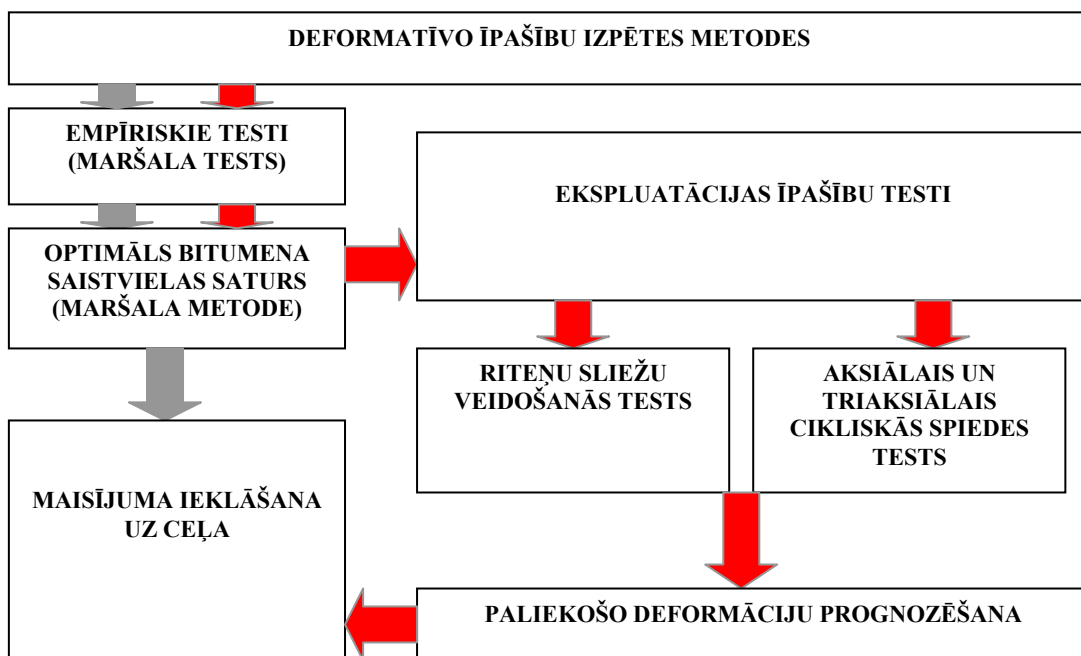
Hamburgas riteņu sliežu veidošanas iekārta ir Helmuta Vinda (*Helmut Wind*) izgudrojums [108]. To izmanto īpaši noslogotu Vācijas ceļu noturības izpētei pret rišu veidošanos un nogurumu. Testēšanu veic ūdenī, 25–70 °C temperatūrā. Testa parauga izmēri ir 260×320 mm, biezums – 40 mm. Paraugs tiek noslogots ar 705 N lielu kustīgā riteņa slodzi ar ātrumu 50 cikli minūtē (sk. 3.7. att.). Testēšanas ilgums ir 20 000 cikli. Testēšanu veic saskaņā ar standarta *AASHTO T 234* prasībām [109].



3.7. att. *Hamburg Wheel-Tracking* iekārta

3.4.4. Testēšanas metožu izvēle

Asfaltbetona paraugu deformatīvo īpašību pētīšanas metodes izvēlētas tā, lai sasniegtu promocijas darbā izvirzīto mērķi un uzdevumus – noteikt un salīdzināt izgatavoto asfaltbetona sastāvu deformatīvās īpašības ar metodēm, kuras nodrošina paraugu izgatavošanu, testēšanas vidi un slogošanu maksimāli tuvināti reālajiem ceļa ekspluatācijas apstākļiem (ekspluatācijas īpašību testēšanas metodes; sk. 3.8. att.). Analizējot iegūtos rezultātus, var noteikt empīrisko paliekošo deformāciju prognozēšanas funkciju vienādojumu konstantes un veikt rišu attīstības dinamikas prognozēšanu. Rezultātā tiks sasniegts promocijas darbā definētais mērķis.



3.8. att. Darbā lietoto paliekošo deformāciju izpētes metodika:

=> neizvērtējot ekspluatācijas īpašības; => izvērtējot ekspluatācijas īpašības

Iepriekšējā nodaļā aprakstītas vairākas metodes un iekārtas asfaltbetona deformatīvo īpašību noteikšanai. Paliekošo deformāciju prognozēšanas pētījumam izvēlēts piemērots tehniskais aprīkojums, kurš laboratorijā nodrošinās reālajam ceļa vai ielas posmam tuvinātus apstākļus – asfaltbetona paraugu izgatavošanu, temperatūru un spriegoti deformēto stāvokli. 3.7. tabulā apkopotas testēšanas metodes un materiāla īpašības, kuru vērtības ir svarīgas un tiks noteiktas promocijas darbā, lai veiktu rišu attīstības dinamikas izpēti.

Paliekošo deformāciju testēšanas metožu salīdzinājums

Testa metode	Materiāla īpašības						
	Elastības modulis	Bīdes modulis	Puasona koeficients	Šļūdes modulis	Stiprība	Šļūde	Paliekošā deformācija
Triaksiālais cikliskās spiedes tests ³⁾	R*	R	R	R	R	R	R
Aksiālais cikliskās spiedes tests ³⁾	R	R	R	–	R	R	R
Maršāla tests ¹⁾	–	–	–	–	R	–	–
Rišu tests ²⁾	–	–	–	–	–	–	R

*) R – tests nosaka materiāla īpašības, kuru vērtības ir svarīgas rišu attīstības dinamikas izpētei.

¹⁾ Kopš 1994. gada metodi plaši izmanto asfaltbetona maisījumu projektēšanai un kvalitātes pārbaudēm Latvijā.

²⁾ 2007. gadā ieviests Latvijā un no 2009. gada lietots asfaltbetona maisījuma kvalitātes pārbaudēm.

³⁾ Metode 2008. gadā ieviesta Latvijā RTU Ceļu būvmateriālu laboratorijā asfaltbetona maisījumu paliekošo deformāciju pētījumiem.

– īpašības, kuras tika noteiktas promocijas darbā.

3.5. Apkopojums un secinājumi par 3. nodaļu

1. Testa paraugi tika izgatavoti no tradicionālās B70/100 un netradicionālās (modificētās) bitumena saistvielas Modbit 80B. Eksperimentāli tika noteiktas bitumena saistvielu galvenās fizikālās, ķīmiskās un mehāniskās īpašības. Bitumena saistvielu īpašības atbilst Latvijas ielu un ceļu būves tehniskajiem noteikumiem – „Ceļu specifikācijas 2010” (līdz 2010. gadam – „Autoceļu specifikācijas 2005”) prasībām. Bitumena saistvielai B70/100 eksperimentāli noteikto pamatīpašību rezultāti: mīkstēšanas temperatūra – 47,7 °C, penetrācija – 71·0,1 mm, Frasa trausluma temperatūra –21,2 °C. Modificētajai saistvielai Modbit 80B salīdzinājumā ar B70/100 ir lielāka mīkstēšanas temperatūra – 68 °C, bet zemāka penetrācija – 59·0,1 mm – un augstāka (–16 °C) Frasa trausluma temperatūra – –16 °C.
2. Asfaltbetona testa paraugu izgatavošanai lietotas Latvijas apstākļiem tradicionālās pildvielas – dolomīts, granīts, diabazs un kvarca drupinātā un nedrupinātā smilts. Tērauda ražošanas blakusprodukts – martena tēraudkausēšana sārņi (MTS) izvēlēti kā netradicionālā pildviela etalonparaugu izgatavošanai. Izvērtēta pildvielas atbilstība tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām. Noteikts, ka dolomīta pildvielas īpašības – drupināmības izturība, nodilumizturība pret radzotām riepām un

aizpildītāja saturs ($< 0,063$ mm) – neatbilst tehnisko specifikāciju prasībām, ja ir liela satiksmes intensitāte – $AADT > 3500$. MTS pildvielai salīdzinājumā ar tradicionālajām pildvielām saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem ir ievērojami labāka drupināmības izturība ($LA = 10$, forma – $FI = 3$) un aizpildītāja saturs ($\approx 0\%$). MTS pildvielas labo adhēziju ar bitumena saistvielu raksturo augsts smago un sārmzemju metālu saturs ($> 50\%$ CaO un MgO).

3. Laboratorijas apstākļos tika izgatavoti septiņi asfaltbetona maisījumu sastāvi: pieci ar tradicionālajām un divi etalonsastāvi ar netradicionālajām izejvielām – blīvais maisījums AC 11 ar MTS pildvielu un nemodificēto bitumenu B70/100 un šķembu mastikas asfaltbetona maisījums SMA 16 ar granīta pildvielu un SBS modificēto bitumena saistvielu ModBit 80B. Paraugu fizikālās īpašības (tilpuma parametri V_a , VMA un VFB) atbilst tehnisko specifikāciju prasībām, ja satiksmes intensitāte $AADT > 3500$, tomēr paraugiem AC 11 un AC 8 ar dolomīta pildvielu Maršala stabilitāte ir 8,7 kN un 7,9 kN, kas neatbilst tehnisko specifikāciju prasībām – ≥ 10 kN.

4. PALIEKOŠO DEFORMĀCIJU CĒLOŅI UN NOVĒRTĒŠANAS METODIKA

Kā jau minēts 2. nodaļā, asfaltbetona seguma paliekošo deformāciju veidošanās ātrums ir atkarīgs no iekšējo un ārējo faktoru ietekmes. Iekšējie faktori ir izejmateriālu – bitumena saistvielas, pildvielas un asfaltbetona maisījuma īpašības. Iekšējo faktoru ietekmes efekts uz paliekošo deformāciju veidošanos ir aprakstīts 2.4. nodaļā „Asfaltbetona sastāvi un izejmateriālu īpašības”. Ārējie faktori – gaisa temperatūra un transporta slodze (tās lielums un intensitāte) – ietekmē asfaltbetona seguma īpašības ekspluatācijas laikā.

4.1. Asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūra

Asfaltbetona saistviela (bitumens) ir viskozi-elastīgi-plastisks materiāls, kura īpašības krasi mainās atkarībā no temperatūras (sk. 2.4.1. nodaļu). Bitumena īpašību maiņa temperatūras ietekmē ir seguma stinguma maiņas un paliekošo deformāciju veidošanās pamatcēlonis. Ir svarīgi atzīmēt, ka asfaltbetona seguma temperatūra ir viens no galvenajiem rišu veidošanās dinamikas izpētes parametriem. Lai laboratorijas apstākļos veiktu rišu veidošanās dinamikas pētījumus, jānodrošina testēšanas vide, tuvināta reāliem apstākļiem. Saskaņā ar veiktajiem pētījumiem, temperatūrai palielinoties no 20 °C līdz 60 °C, rišu dziļums palielinās no 250 līdz 350 reizēm [27]. Tāpēc laboratoriskajos pētījumos testēšanas temperatūru izvēlas ļoti augstu, piemēram, 60 °C asfaltbetona seguma virskārtai un 50 °C pamatkārtai, nodrošinot vislabvēlīgākos apstākļus paliekošo deformāciju veidošanās procesam [110]. Lindens (*Linden*) un Van der Heide (*Van der Heide*) savos pētījumos ziņo par risēm, kas izveidojušās vairākās vietās uz Eiropas ielām un ceļiem laika periodā no 1975. līdz 1976. gadam, kuru veidošanās cēlonis ir augstā vasaras temperatūra – asfaltbetona seguma virsmas temperatūra tad pārsniedza 50 °C [111].

Ir piedāvātas vairākas asfaltbetona seguma virsmas temperatūras aprēķina metodikas. ASV izplatītākā ir *Strategic Highway Research Program (SHRP)* piedāvātais modelis, kurš izveidots projektēšanas metodes *Superpave* ietvaros [112]. *Superpave* metode rekomendē šādu seguma virsmas temperatūras aprēķina vienādojumu:

$$T_v^s = T_{air}^{max} - 0,00618 \cdot latitude^2 + 0,2289 \cdot latitude + 24,4, \quad (4.1)$$

kur T_{air}^{max} – dienas maksimālā gaisa temperatūra, °C;

latitude – platuma grādi (Rīgai – 57°).

Sojuzdornii (SoyuzDornii) pētījumos asfaltbetona seguma virsmas temperatūras aprēķinam piedāvāta šāda empīriskā formula [113]:

$$T_v = -0,0306 \cdot T_{max}^2 + 3,8071 \cdot T_{max} - 39, \quad (4.2)$$

kur T_v – asfaltbetona seguma virsmas temperatūra, °C;

T_{max} – maksimālā gaisa temperatūra izvēlētajā reģionā, °C.

Asfaltbetona seguma paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas pētījumos ir svarīgi izvēlētajam reģionam noteikt perioda ilgumu ar kritisko asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūru. No Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūras iegūtajiem maksimālās gaisa temperatūras datiem par 2001.–2008. gadu, izmantojot vienādojumu 4.2, tika aprēķināta asfaltbetona seguma virsmas temperatūra [114]. 4.1. un 4.2. tabulā apkopoti rezultāti par dienu un stundu skaitu gadā ar augstu asfaltbetona segas ekspluatācijas temperatūru. Tā noteikta, balstoties uz asfaltbetona stinguma moduļu un deformatīvo īpašību zem cikliskā slogojuma dažādās temperatūrās izpētes rezultātiem. (sk. 4.3. nodaļu „Asfaltbetona paraugu deformatīvo īpašību maiņa atkarībā no temperatūras”). Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem paliekošās deformācijas asfaltbetona segumā Latvijā var veidoties laika periodā no aprīļa līdz septembrim no pulksten 7.00 līdz 21.00 (sk. 4.1. att.).

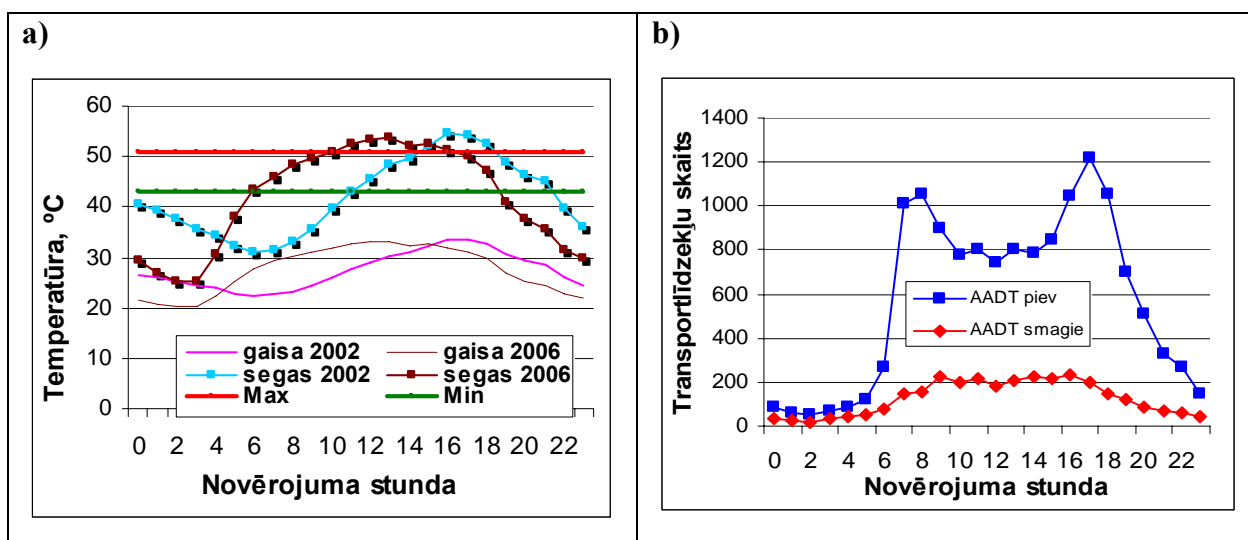
4.1. tabula

Dienu skaits gadā ar augstu asfaltbetona seguma temperatūru – virs 40 °C

Mēnesis	Novērošanas gads															
	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008	
	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C
Aprīlis	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Maijs	4	–	9	–	5	1	4	–	5	2	1	–	6	1	–	–
Jūnijs	5	1	10	1	4	1	4	–	7	2	11	5	10	–	–	–
Jūlijs	20	9	19	9	23	14	11	–	23	6	23	8	4	–	–	–
Augusts	8	3	31	11	11	4	16	5	12	2	14	–	11	6	–	–
Septembris	–	–	6	–	2	–	–	–	4	1	1	–	–	–	–	–
Kopā	37	13	75	21	45	20	35	5	51	13	50	13	31	7	–	–

Stundu skaits gadā ar augstu asfaltbetona seguma temperatūru – virs 40 °C

Mēnesis	Novērošanas gads														
	2001	2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008	
	Nav datu	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C	>40 °C	>45 °C
Aprīlis	Nav datu	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Maijs	Nav datu	60	3	28	4	27	–	42	–	4	–	44	5	–	
Jūnijs	Nav datu	67	7	32	4	18	–	41	4	33	21	65	–	–	
Jūlijs	Nav datu	198	70	251	102	57	–	196	28	285	68	32	–	–	
Augusts	Nav datu	265	43	64	22	142	15	87	–	101	–	152	10	–	
Septembris	Nav datu	36	3	3	–	1	–	24	–	3	–	–	–	–	
Kopā	Nav datu	626	126	378	132	245	15	390	32	426	89	293	15	–	



4.1. att. Ārējo faktoru maiņas dinamika:
a) asfaltbetona seguma temperatūra; b) satiksmes intensitāte

4.2. Transporta slodze

Automobiļu ass slodze, asu skaits un kustības ātrums ir otrs svarīgākais paliekošo deformāciju veidošanos ietekmējošais ārējais faktors. Ārējo faktoru – transporta slodzes un seguma temperatūras noteikta sakritība izraisa paātrinātu paliekošo deformāciju veidošanos asfaltbetona segumā. Palielinoties riepas kotaktspiedienam no 0,6 MPa līdz 0,9 MPa, rišu veidošanās parametrs α (sk. 2.45 vienād.) palielinās trīs reizes, kas nozīmē, ka ievērojami samazinās asfaltbetona seguma deformatīvā noturība [29]. Viens no galvenajiem ceļa seguma projektēšanas uzdevumiem ir izprojektēt noturīgu pret smagā transporta slodzi ceļa segas

konstrukciju. Asfaltbetona seguma projektēšanas procesā nepieciešams rūpīgs transporta slodzes izvērtējums, t. i., jānosaka transporta ass slodzes lielums, konfigurācija un sloģošanas ciklu skaits.

4.5. tabula

Maksimāli pieļautās ass slodzes [115–116]

Valsts	Maksimālā pieļautā ass slodze, tonnas		
	Viena ass	Dubultā ass	Trīs asis
Latvija	11,5	18,0	24,0
Lietuva	11,5	19,0	24,0
Igaunija	11,5	19,0	24,0
Polija	10,0	16,0	24,0
Austrija	11,5	18,0	23,0
Beļģija	13,0	20,0	27,0
Somija	11,5	20,0	24,0
Spānija	13,0	21,0	24,0
Šveice	11,5	18,0	28,0
Vācija	11,5	18,0	23,0
Francija	13,0	21,0	24,0
Ukraina	10,0	16,0	22,0
Krievija	10,0	18,0	–

4.5. tabulā dotas ceļu transportlīdzekļu pieļautās ass slodzes Latvijā un citās Eiropas valstīs. Ceļa segums ir pakļauts dažāda lieluma transporta slodzēm ar dažādu tipu asu konfigurāciju (sk. 4.2. att.). Jāpiezīmē, ka lielākā daļa pastāvošo ceļa segu projektētas un uzbūvētas bij. PSRS laikā, t. i., atbilstoši 10 t ass slodzei.

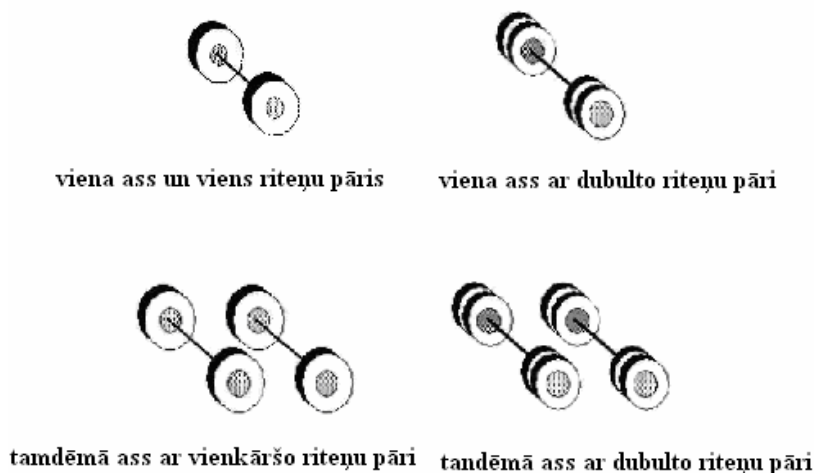
Lai aprēķinātu ceļa seguma nestspēju zem kustībā esoša transportlīdzekļa, ir izstrādāta ekvivalentās vienas ass slodzes – *Equivalent Single Axle Load (ESAL)* koncepcija [117]. *AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials)* ceļa seguma testēšanas rezultāti parāda, kā seguma bojājumu atkarībā no ass slodzes var izteikt ar *ESAL* lielumu [118]. *ESAL* lielums dažādās valstīs ir atšķirīgs, piemēram, ASV tas ir 8,2

tonnas virs dubulto riteņu pāra, bet Francijā, Spānijā un Beļģijā tas ir vienāds ar 13 tonnām. Latvijā *ESAL* vērtība ir 11,5 tonnas (sk. 4.5. tab.). Tā kā ceļa segums ir pakļauts dažāda lieluma transporta slodzēm ar dažādu asu tipu konfigurāciju, jebkura lieluma ass slodžu ietekmes efekta (ekvivalenta 11,5 t smagai asij) novērtēšanai tika ieviests un aprēķināts, lietojot „ceturtās pakāpes likumu”, slodzes ekvivalences faktors (*EALF*).

$$EALF = \left(\frac{AL_i}{AL_j} \right)^4, \quad (4.3)$$

kur AL_i un AL_j ir ass slodze tonnās i-tajam un j-tajam transportlīdzeklim.

Vienas 11,5 tonnas smagas ass bojājuma efekts saskaņā ar 4.3 vienādojumu uz ceļa segumu ir 3,86 reizes lielāks nekā 8,2 tonnas smagai asij. Projektējot ceļa segas konstrukciju, vieglo transportlīdzekļu ass slodzi parasti neņem vērā, jo viena kravas automašīnas ass ir ekvivalenta 8000–10 000 vieglo automobiļu asīm [119]. Slodzes ekvivalences koeficienti dažādām ass slodzēm apkopoti 4.6. tabulā.



4.2. att. Kravas automašīnu asu tipu konfigurācijas

Satiksmes intensitāte ir svarīgākais satiksmes raksturlielums, kuru ņem vērā, projektējot ceļa segas konstrukciju. Vidējā diennakts satiksmes intensitāte *AADT* ceļa ekspluatācijas sākuma periodā ir ceļa segas konstrukcijas projektēšanai minimālie nepieciešamie satiksmes dati. Tomēr, lai ceļa seguma kalpošanas periodā (saskaņā ar projektu) veiktu paliekošo deformāciju attīstības dinamikas izpēti, nepieciešams šim periodam katrai smago transportlīdzekļu svara kategorijai aprēķināt asu slodžu ciklu skaitu.

Ass slodzes ekvivalences koeficienti (*EALF*)

Ass slodze, kN	Vienas ass	Dubultā ass	Trīs asis
4,45	0,00002	–	–
8,9	0,00018	–	–
17,8	0,00209	0,0003	–
26,7	0,01043	0,001	0,0003
35,6	0,0343	0,003	0,001
44,5	0,0877	0,007	0,002
53,4	0,189	0,014	0,003
62,3	0,360	0,027	0,006
71,2	0,623	0,047	0,011
80,0	1,00	0,077	0,017
89,0	1,51	0,121	0,027
100,0	2,18	0,1878	0,042
107,5	3,03	0,2685	0,0727
115,0	4,09	0,3600	0,1187
125,0	–	0,500	
130,0	–	0,660	
140,0	–	0,860	
150,0	–	1,090	
160,0	–	1,380	
170,0	–	1,700	

Šobrīd Latvijā plaši izmantotā satiksmes intensitātes mērvienība – gada vidējā diennakts satiksmes intensitāte (*AADT*) ir ļoti vispārīga un nedod iespēju precīzi izvērtēt ass slodzes. Satiksmes intensitātes mērvienība *AADT* jāpārreķina uz *ESAL* mērvienību saskaņā ar vienādojumu:

$$ESAL = f_i \cdot G \cdot AADT \cdot 365 \cdot N_i \cdot EALF_i, \quad (4.4)$$

kur *ESAL* – ekvivalentā vienas standarta ass slodze;

f_i – joslu skaita koeficients;

G – satiksmes intensitātes pieauguma koeficients;

$AADT$ – vidējā diennakts satiksmes intensitāte asfaltbetona seguma pirmajā ekspluatācijas gadā;

N_i – asu skaits i -tajam transportlīdzekļa tipam;

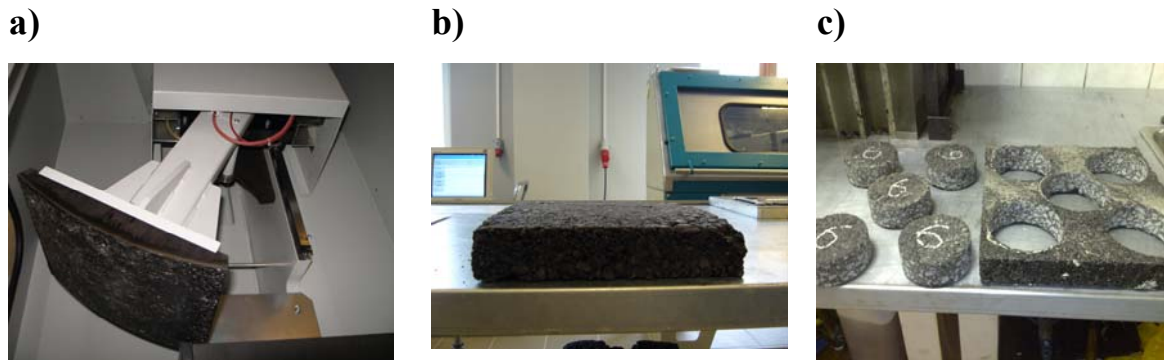
$EALF_i$ – slodzes ekvivalences faktors i -tajam transportlīdzekļa tipam.

Ekvivalentās standarta ass slodzes aprēķinam nepieciešamos datus – diennakts satiksmes intensitāti, asu slodzes un asu skaitu – iegūst no satiksmes uzskaites stacijām (SUS). Latvijā šādas stacijas ir divas – viena uz Rīgas apvedceļa A4 (Baltezers – Saulkalne), otra uz autoceļa A 9 (Rīga – Skulte – Liepāja).

4.3. Asfaltbetona paraugu deformatīvo īpašību maiņa atkarībā no temperatūras

Asfaltbetona seguma temperatūra mainās atkarībā no gaisa temperatūras, kas savukārt ir atkarīga no gadalaika, diennakts stundas un vietējo klimatisko apstākļu īpatnībām. Temperatūra krasi ietekmē asfaltbetona deformatīvās īpašības. Elastības modulis (E) ir materiāla deformatīvās īpašības raksturojošs pamatlielums, kas parāda, cik lielu slodzi spēj uzņemt materiāls, neizraisot neatgriezeniskās jeb paliekošās deformācijas. Lai novērtētu uzprojektēto asfaltbetona paraugu deformatīvās īpašības dažādās temperatūrās, tika veikta paraugu elastīgās un plastiskās deformācijas lieluma noteikšana temperatūras intervālā no +20 °C līdz +60 °C. Asfaltbetona sastāvi un to galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības ir apkopoti 3.5. tabulā.

Elastības moduļi ir noteikti no asfalta plātnēm izgrieztiem cilindriem. Asfalta plātnes tika izgatavotas ar veltņa blīvētāju saskaņā ar standarta LVS EN 12697-33 metodi. Parauga sablīvēšana ar veltņa blīvētāju laboratorijā ir ļoti līdzīga asfaltbetona maisījuma sablīvēšanai ar ceļa veltņi (sk. 4.3.a att.) No plātnēm izgriezto cilindrisko paraugu biezums ir 40 mm, kas atbilst ceļa seguma virskārtas biezumam uz reālā ceļa (sk. 4.3.b att.) [120].



4.3. att. Asfaltbetona paraugu izgatavošana: a) veltņa blīvētājs; b) asfaltbetona prizmveida 305×305×40 mm paraugs; c) no asfalta plātnēm izgriezti cilindriskie paraugi

Paraugu elastības moduļi noteikti ar ciklisko netiešās stiepes slogošanas metodi saskaņā ar standarta LVS EN 12697-26 prasībām un aprēķināti pēc formulas (sk. 4.4. att.) [121–122]:

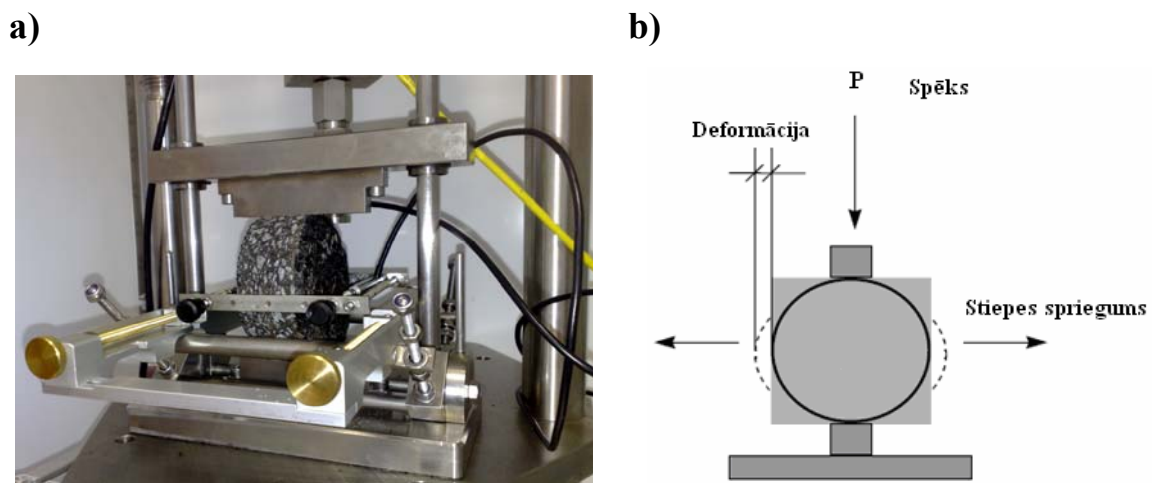
$$E = \frac{P \cdot (0,273 + \mu)}{\Delta \cdot t}, \quad (4.5)$$

kur P – spēks, N;

$\mu = 0,35$ – Puasona koeficients;

Δ – horizontālā deformācija, mm;

t – parauga biezums, mm.



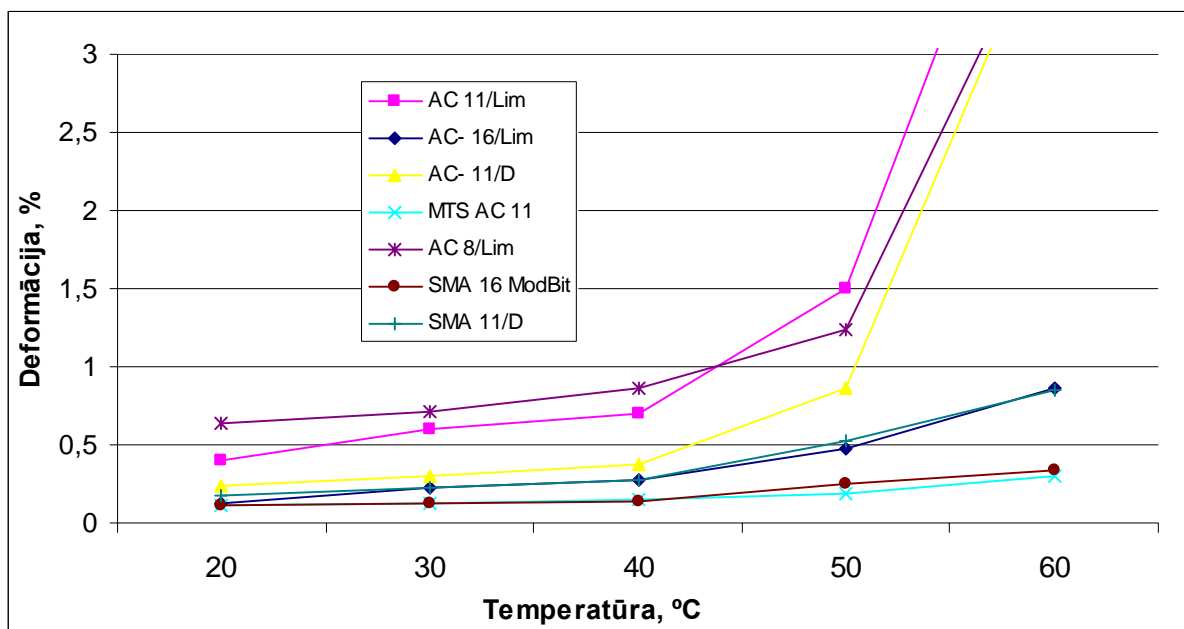
4.4. att. Elastības moduļa noteikšanas iekārta (a) un tās shēma (b)

Plastiskā deformācija noteikta ar cikliskās spiedes testēšanas iekārtu, pieliekot paraugam ar 0,5 Hz frekvenci 100 kPa lielu slodzi. Palielošā deformācija noteikta pēc 3600

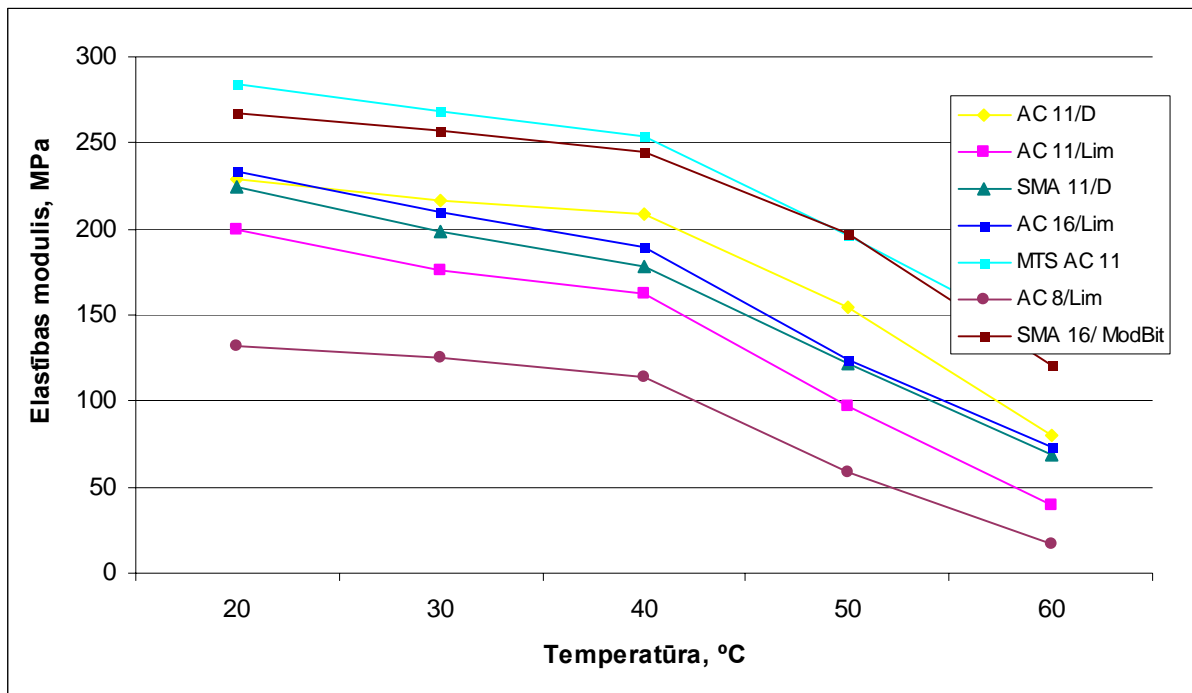
slopojuma cikliem. Rezultāti apkopoti 4.5. attēlā. Eksperimenti veikti asfaltbetona Maršala paraugiem. Maršala paraugu izgatavošana veikta ar triecienslodzi saskaņā ar standarta LVE EN 12697-30 metodi.

Deformatīvo īpašību izpēte zem statiskā slopojuma Maršala paraugiem veikta ar statiskās slogošanas iekārtu *Zwik Z-100*. Tā kā Maršala paraugu spiedes stiprības noteikšanas metode nav reglamentēta nevienā EN standartā, tad testēšanas veikšanai izmantoti Maršala testa standarta LVS EN 12697-34 metodes nosacījumi, kas attiecas uz paraugu sagatavošanu testēšanai – termostātēšanas laiks, testēšanas formas sagatavošana un starppārbaužu laiks [123].

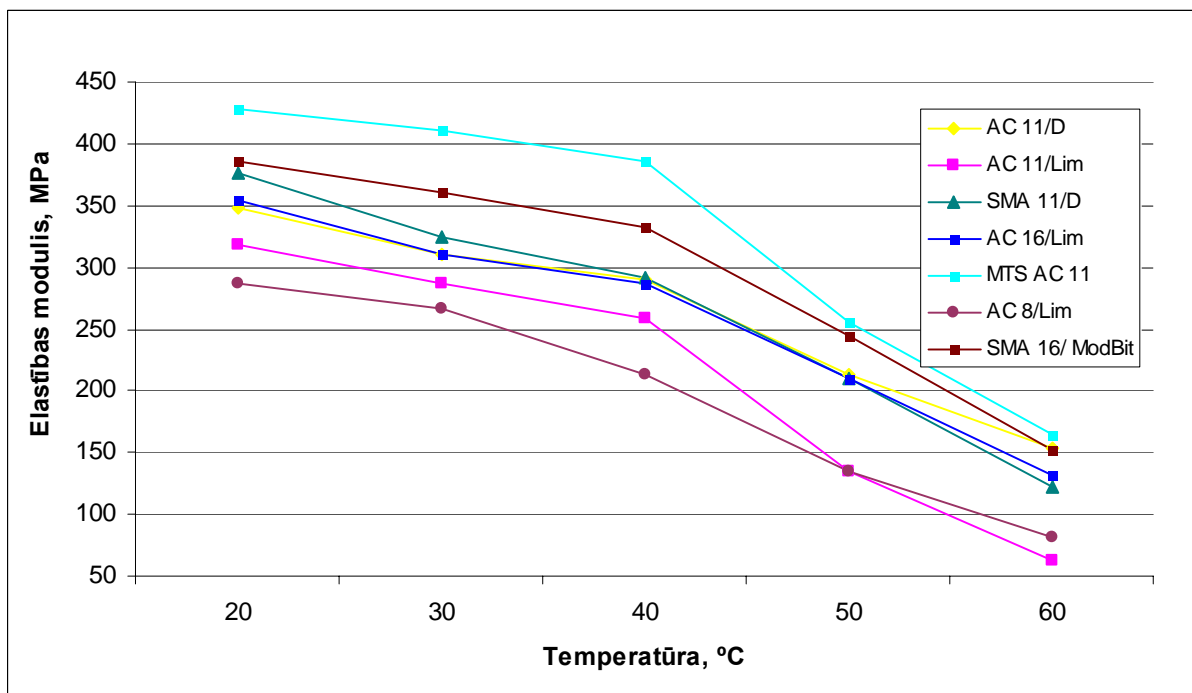
Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem +40 °C un lielākā temperatūrā vērojams straujš elastības moduļa vērtības samazinājums un plastisko deformāciju pieaugums (sk. 4.5.–4.6. att.). Savukārt iepriekšējā nodaļā, veicot gaisa temperatūras datu statistisko apstrādi, noteikts dienu skaits gadā, kad ceļa seguma temperatūra ir augstāka par +40 °C. Asfaltbetona paraugi SMA 16 ar polimērmodificēto bitumenu ModBit 80B un AC 11 ar martenkrāsns tēraudkausēšanas sārņiem (MTS) uzrāda lielāku stingumu salīdzinājumā ar tradicionālajiem maisījumiem. Starp tradicionālajiem nemodificētiem asfaltbetona maisījuma sastāviem labākās deformatīvās īpašības uzrāda AC 16 ar dolomīta un SMA 11 ar diabaza pildvielu.



4.5. att. Asfaltbetona paraugu deformācijas dažādās temperatūrās



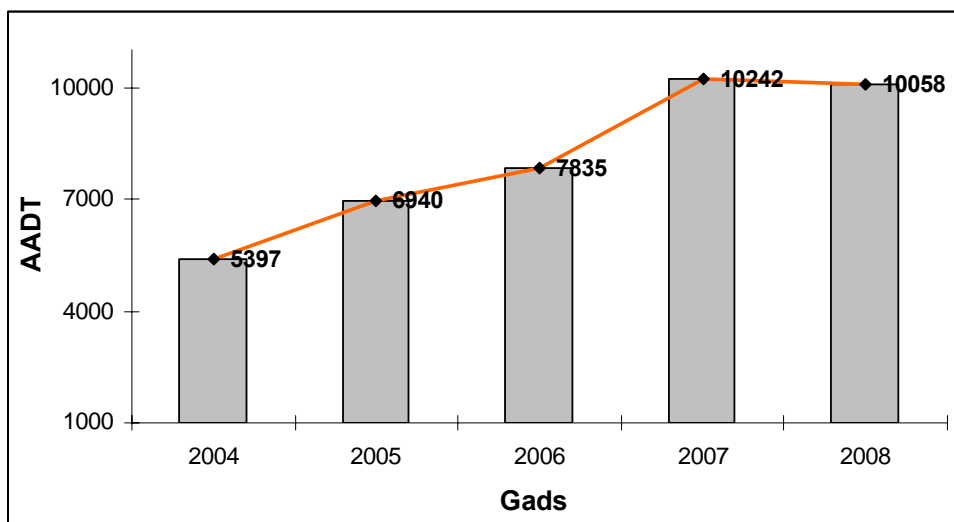
4.6. att. Elastības moduļa maiņas dinamika atkarībā no temperatūras pie slogošanas ātruma 3 mm/min



4.7. att. Elastības moduļa maiņas dinamika atkarībā no temperatūras pie slogošanas ātruma 50 mm/min

4.4. Ekvivalentā standarta ass slodze karstajā vasaras periodā Latvijā

4.2. nodaļā, balstoties uz asfaltbetona paraugu deformatīvo īpašību izpēti, tika analizēta temperatūra, pie kuras asfaltbetona segumam strauji pieaug plastiskās deformācijas lielums un samazinās elastības modulis. Saskaņā ar veikto gaisa temperatūras datu un seguma sasilšanas temperatūras analīzi (sk. 4.1.1. nodaļu) plastiskās deformācijas asfaltbetona segumā var veidoties laika periodā no aprīļa līdz septembrim no pulksten 7.00 līdz 21.00. Satiksmes intensitāte (*AADT*) šajā laika periodā ir maksimālā (sk. 4.1b. att.). Tomēr, lai prognozētu paliesto deformāciju veidošanos, nepieciešams detalizēts transporta slodzes un intensitātes izvērtējums. Promocijas darbā paliesto deformāciju prognozēšanai satiksmes intensitātes dati ņemti no satiksmes uzskaites stacijas (*SUS*), izvietotas uz noslogotākā ar kravas transportu Rīgas apvedceļa A4 (Baltezers – Saulkalne). Iegūtie *SUS* dati tiek izmantoti ekvivalentās standarta ass slodzes *ESAL* aprēķinam. Analizējot *SUS* datus, noteikta pēdējo gadu vidējā diennakts satiksmes intensitāte – *AADT*. Sakarā ar strauji augošo Latvijas ekonomiku laika posmā no 2004. līdz 2008. gadam, vērojams straujš satiksmes intensitātes pieaugums. 2008. gadā salīdzinājumā ar 2004. gadu uz Rīgas apvedceļa A4 satiksmes intensitāte divkārtšojusies (sk. 4.8. att.).



4.8. att. Divvirzienu satiksmes intensitāte uz Rīgas apvedceļa A4 (Baltezers – Saulkalne)

Jāatzīmē, ka mainīgo laika apstākļu un neprognozējamās ekonomiskās situācijas dēļ ārējie paliesto deformācijas izraisītie faktori var atšķirties no pēdējos gados novērotajiem. Tāpēc tika ieviesti daži pieņēmumi, balstīti uz pēdējo gadu novērojumiem:

- vidējais ikgadējais satiksmes pieaugums – 2%;

- asfaltbetona seguma kalpošanas laiks saskaņā ar projektu – 20 gadi;
- dienu skaits gadā ar augstu asfaltbetona segas kalpošanas temperatūru – 2%;
- rišu veidošanās notiek laika periodā no aprīļa līdz septembrim no pulksten 7.00 līdz 21.00, kad asfaltbetona seguma temperatūra var sasniegt kritisko ekspluatācijas temperatūru – +40 °C un lielāku;
- laika periodā no aprīļa līdz septembrim *ESAL* ir 55% no gada vērtības, un no pulksten 7.00 līdz 21.00 – 85% no diennakts vērtības.

Pieņemot ikgadējo satiksmes pieaugumu (2%) un projektēto seguma kalpošanas laiku (20 gadi), satiksmes pieauguma koeficients ir:

$$G = [(1 + r)^n - 1] / r = 24,30, \quad (4.6)$$

kur *G* – satiksmes pieauguma faktors;

$r = \frac{i}{100}$ – vidējais ikgadējais satiksmes pieauguma faktors;

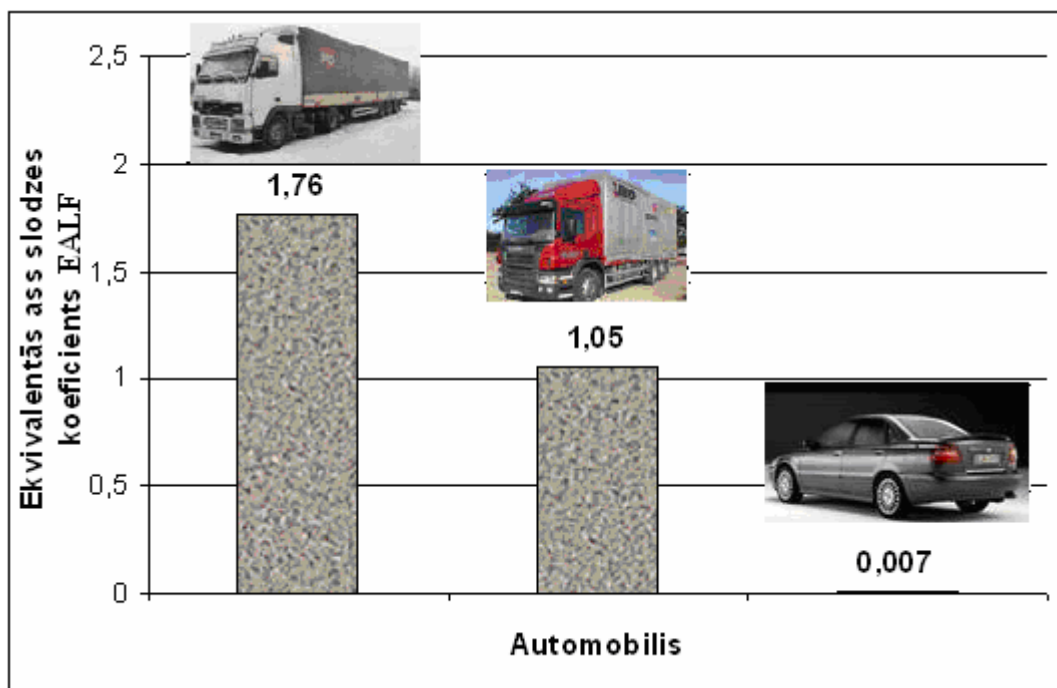
i – satiksmes pieaugums – 2%;

n – projektētais seguma kalpošanas laiks gados (saskaņā ar projektu).

Lai aprēķinātu *ESAL*, jānosaka ekvivalentās ass slodzes koeficients *EALS*. Šis lielums ir atkarīgs no automobiļu svara kategorijas un ceļa noslogojuma. *ESAL* aprēķinam transportlīdzekļi uz apvedceļa A4 ir sadalīti ar stundas intervālu atkarībā no automobiļa svara kategorijas un asu skaita. Automobiļu sadalījums ir apkopots 4.7. tabulā. Transportlīdzekļu sadalījuma dati parāda, ka uz apvedceļa A4 ir 74% divasu vieglās, 4% divasu smagās, 1% trīsas un sešasu smagās, 4% četrasu smagās un 16% piecasu kravas automašīnas. Aprēķināti Rīgas apvedceļam A4 raksturīgie transportlīdzekļu *EALF* lielumi, un to salīdzinājums ir parādīts 4.9. attēlā. No 4.9. attēla ir redzams, ka vieglā automobiļa ass ekvivalence 11,5 tonnas standarta ass slodzei ir 0,007, savukārt piecasu kravas transportam šis lielums ir 1,76. Tas apstiprina kravas transporta ievērojami lielāko ceļa segas bojājuma efektu salīdzinājumā ar vieglajiem automobiļiem.

Automobiļu procentuālais sadalījums uz Rīgas apvedceļa A4

Automobilis			Novērojuma stundas																							Vid., %	
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		23
Nedalīts, %	asis	riepas																									
	2	4	63	68	65	57	52	54	72	85	85	75	75	73	76	72	72	74	77	84	86	83	82	80	77	72	74
	2	6	2	2	4	1	11	8	7	3	2	4	6	6	5	4	6	5	5	4	2	3	3	3	2	2	4
	3, >3	6, >6	1	2	0	1	0	1	2	1	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2	1	1	1	0	0	1	1
Salikts, %	4		3	9	0	8	11	6	3	3	3	5	5	5	3	5	4	5	4	3	2	3	4	2	3	8	4
	5		30	30	25	26	25	30	16	7	8	13	12	14	12	13	14	12	10	8	8	10	11	13	18	15	16
	6, >6		0	0	6	6	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	2	2	2	1



4.9. att. Slodzes ekvivalences koeficienti (*EALF*) dažiem transportlīdzekļiem

Izmantojot iepriekš noteiktos parametrus – *AADT*, *EALF*, *G* un divvirzienu joslu skaita koeficientu $f_i = 0,5$ (sk. 4.8. tab.) – aprēķina *ESAL* katrai automobiļu svara kategorijai un summējot nosaka kopējo *ESAL* lielumu (sk. 4.9. tab.).

4.8. tabula

Satiksmes joslu skaita koeficients

Satiksmes joslu skaits (divos virzienos)	Joslu skaita koeficients f_i
2	0,50
4	0,45
6 un vairāk	0,40

4.9. tabula

Kopējais *ESAL* un to aprēķina parametri

Automobiļu asu skaits	Joslu skaita koeficients f_i	Pieaugums G	<i>AADT</i>	<i>EALF</i> , f	<i>ESAL</i> grupā, $\times 10^6$	Kopā <i>ESAL</i> $\times 10^6$
2 asis	0,5	24,3	10 000	0,007	0,2	16,7
3 asis				1,05	0,46	
4 asis				1,50	2,7	
5 asis				1,76	12,5	
6 asis				1,82	0,8	

Turpmākiem aprēķiniem $ESAL$ lielums jānosaka laika periodam, kad notiek rišu veidošanās – karstajos pavasara-vasaras periodos ar augstu asfaltbetona seguma temperatūru (sk. 4.1.1. un 4.2. nodaļu). Saskaņā ar iepriekš ieviestajiem pieņēmumiem tika izveidots $ESAL$ aprēķina vienādojums periodam ar augstu asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūru:

$$ESAL_0^{hp} = ESAL_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 = 6452 \quad (4.7)$$

un

$$ESAL_0 = \sum ESAL_i / G = 0,69 \times 10^6, \quad (4.8)$$

kur $ESAL_0^{hp}$ – ekvivalentā standarta ass slodze periodā ar augstu ceļa segas ekspluatācijas temperatūru;

$ESAL_0$ – ekvivalentā standarta ass slodze pirmajā asfaltbetona seguma ekspluatācijas gadā;

a_1, a_2 – parametri, kas vērtē gada periodu un dienu skaitu gadā ar augstu seguma ekspluatācijas temperatūru;

a_3 – parametrs, kas vērtē stundu skaitu diennaktī ar augstu ceļa segas ekspluatācijas temperatūru;

G – satiksmes intensitātes pieauguma faktors.

4.5. Apkopojums un secinājumi par 4. nodaļu

1. Testa paraugiem eksperimentāli tika atrasts elastīgo un plastisko deformāciju lielums pie dažādām temperatūrām (no +20 °C līdz +60 °C). Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem +40 °C un lielākā temperatūrā vērojams straujš elastības moduļa vērtības samazinājums un plastisko deformāciju pieaugums. Straujākais plastisko deformāciju pieaugums zem cikliskās slodzes ir tradicionālajiem asfaltbetona maisījumiem. Pieaugot testa paraugu temperatūrai no +30 °C līdz +40 °C, plastisko deformāciju lielums pieaug aptuveni par 20% (AC8/Lim – 21%, AC11/Lim – 16%, AC 11/D – 23%), savukārt, temperatūrai paaugstinoties no +40 °C līdz +50 °C, plastisko deformāciju lielums dubultojas (AC8/Lim – 98%, AC11/Lim – 114%, AC 11/D – 132%). Etalonsastāvu plastisko deformāciju pieaugums, temperatūrai paaugstinoties no +30 °C līdz +40 °C, ir līdzīgs kā tradicionālajiem maisījumiem: AC11/Ref – 15%, SMA15/Mod – 16%, bet, temperatūrai paaugstinoties no +40 °C līdz +50 °C, tas ir ievērojami mazāks (AC11/Ref – 27%, SMA16/Mod – 59%).

2. IZanalizēti gaisa temperatūras dati laika periodam 2001.–2009. gads, kas iegūti no Latvijas Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūras. Izmantojot *Sojuzdornii* piedāvāto metodiku, aprēķināta asfaltbetona seguma virsmas temperatūra. Analizējot seguma sasilšanas (temperatūras) datus un elastīgo un plastisko deformāciju maiņu atkarībā no temperatūras, noteikts dienu skaits gadā ar seguma ekspluatācijas temperatūru, lielāku par +40 °C. Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem paliekošās asfaltbetona seguma deformācijas uz Latvijas ceļiem var veidoties laika periodā no aprīļa līdz septembrim no pulksten 7.00 līdz 21.00, savukārt augsta seguma ekspluatācijas temperatūra var ilgt 75 un vairāk dienas.

3. Balstoties uz satiksmes intensitātes datiem, kas iegūti ar kravas transportu noslogotākajā apvedceļā A4 (Baltezers – Saulkalne), aprēķināta ekvivalentā standarta ass slodze *ESAL*, kas ir vienāda ar $16,7 \times 10^6$ slogošanas cikliem (20 gados ar 2% ikgadējo satiksmes pieaugumu), ekvivalentiem 11,5 tonnu standarta ass slodzei. Izveidots *ESAL* aprēķina vienādojums periodam ar augstu asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūru.

5. PALIEKOŠĀS DEFORMĀCIJAS UN TO PROGNOZĒŠANA

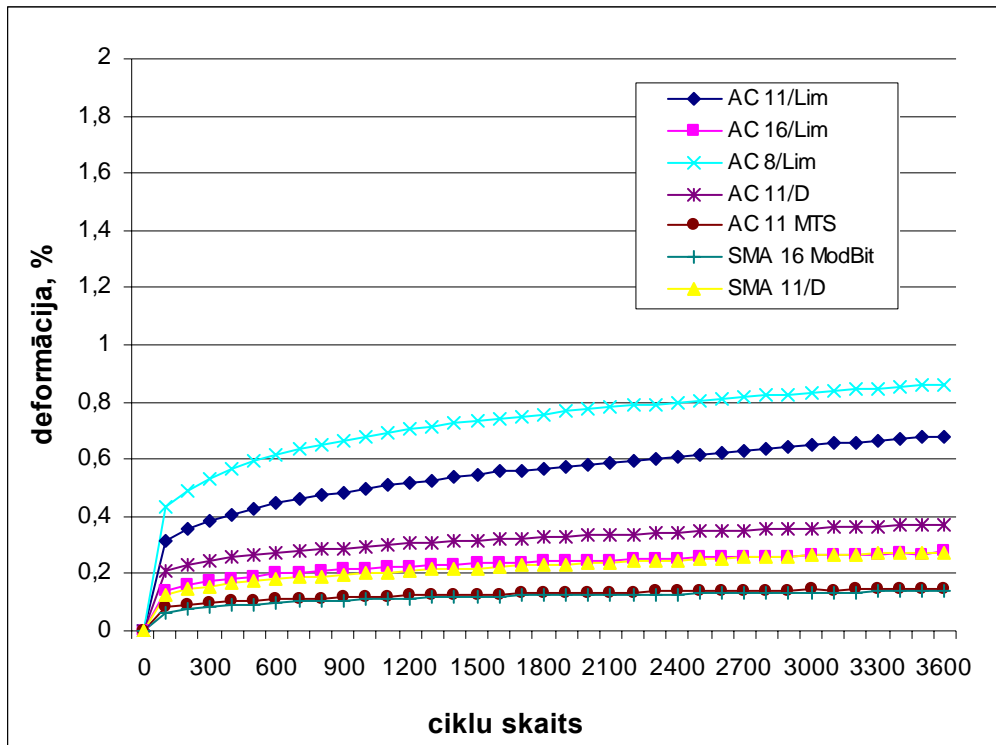
No 2007. gada RTU Ceļu būvmateriālu laboratorijā parādījās iespēja laboratorijas apstākļos nodrošināt paraugu slogošanas un testēšanas vidi, tuvinātu reālajiem apstākļiem uz ceļa, jo, piedaloties vairākās pētījumu programmās, tika piesaistīti līdzekļi moderno un pasaulē atzīto tehnoloģiju paliekošo deformāciju attīstības dinamikas izpētei un attiecīgo testēšanas iekārtu iegādei.

5.1 Aksiālais un triaksiālais cikliskās spiedes tests

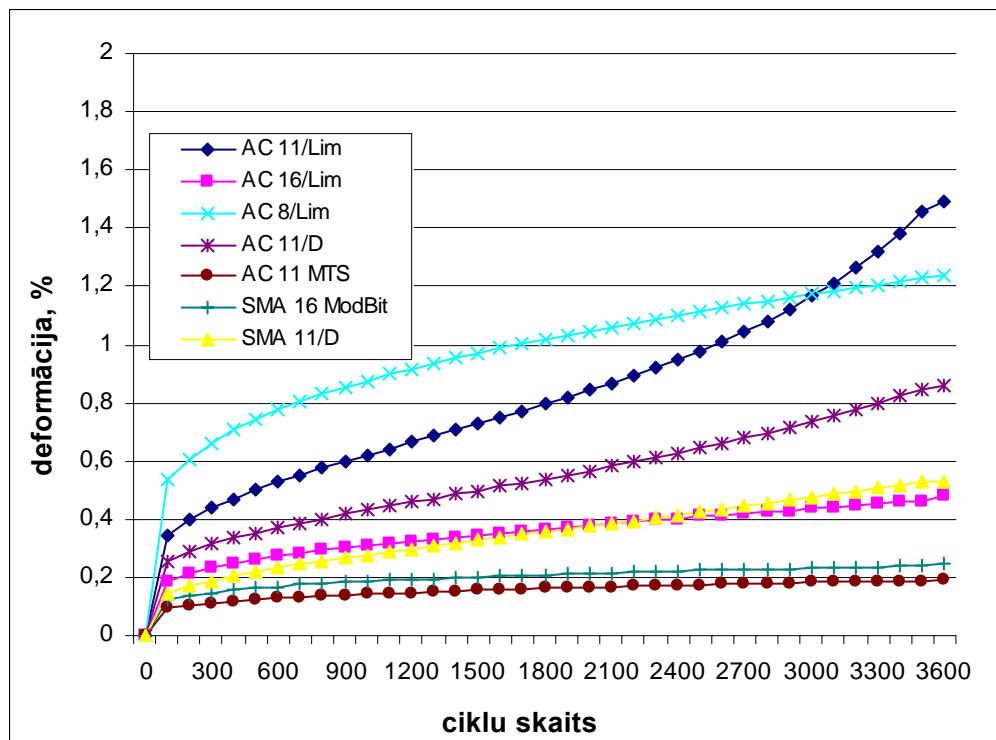
Iekārtas un paraugu slogošanas apraksts ir dots 3.4. nodaļā. Balstoties uz iepriekšējā nodaļā veikto pētījumu, sasniedzot +40 °C temperatūru, vērojams straujš asfaltbetona paraugu stinguma kritums. Eksperimentālo paraugu paliekošās deformācijas lielums zem cikliskā slogojuma noteikts pie dažādām temperatūrām: +40 °C, +50 °C un +60 °C. Paraugi slogoti ar 100 kPa lielu slodzi, viena cikla ilgums – 2 sekundes, frekvence – 0,5 Hz, t. i., 1 sekunde slogošana un 1 sekunde atslogošana. Paraugiem pielikti 3600 slogošanas cikli. Triaksiālajā slogojumā paraugiem ir pielikta 50 kPa horizontālo deformāciju ierobežojoša sānslodze. Veicot pie dažādām temperatūrām iegūto rezultātu salīdzināšanu, tika konstatēts, ka:

- pie +40 °C visiem paraugiem pēc ~ 500. slogošanas cikla ir izteiktas stabilizācijas zonas (deformācija ātrums ir konstants) bez sabrukuma (sk. 5.1. att.);
- pie +50 °C paraugam AC 11/ Lim pēc ~ 2500. cikla sākas sabrukums (sk. 5.2. att.);
- pie +60 °C paraugiem AC 11/ Lim, AC 11/D un AC 8/Lim vērojams sabrukums (sk. 5.3. att.).

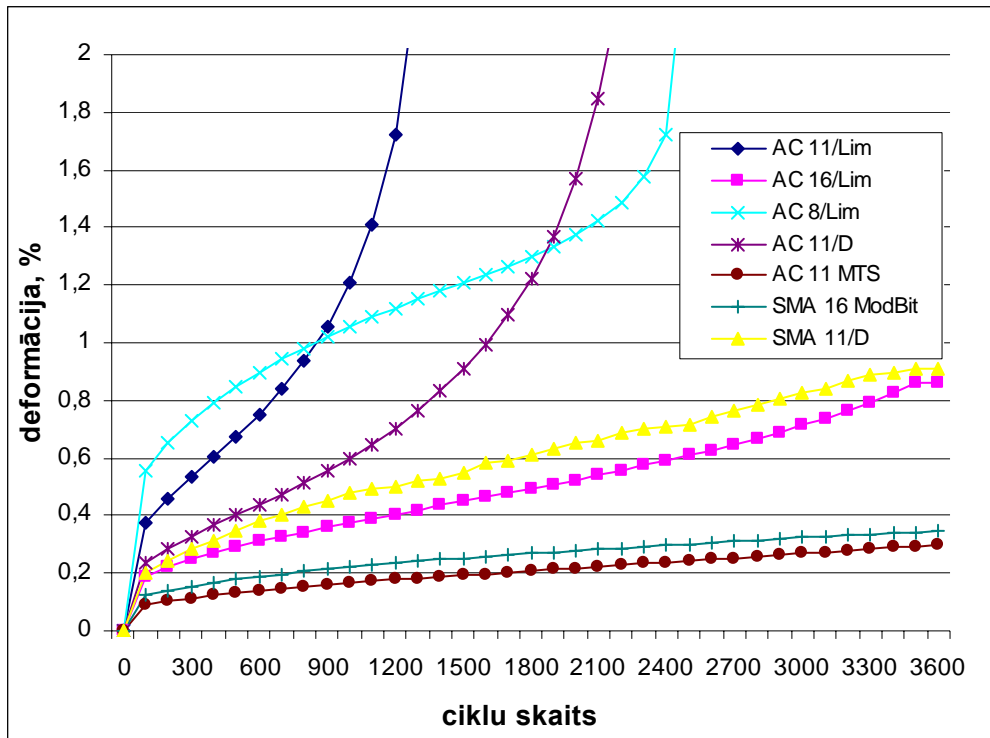
Analizējot triaksiālā testa rezultātus, nevienam paraugam sabrukuma zona nav novērota, tomēr paraugiem AC 11/Lim un AC 8/Lim kopējā deformācija pēc 3600 cikliem ir 1–1,2%, kas ir vairākkārt lielāka nekā pārējiem testa paraugiem: ar netradicionālo pildvielu AC 11/Ref un SMA 16/Mod – 0,1%; tradicionālajiem paraugiem SMA 11/D, AC 16/Lim un AC 11/D – 0,3% (sk. 5.4. att.). Pēc iegūtās „slogošanas ciklu skaits-deformācija” sakarības analīzes tika konstatēts, ka paraugiem AC 11/Lim un AC 8/Lim pie aksiālā un triaksiālā slogojuma ir lielākais deformāciju ātrums.



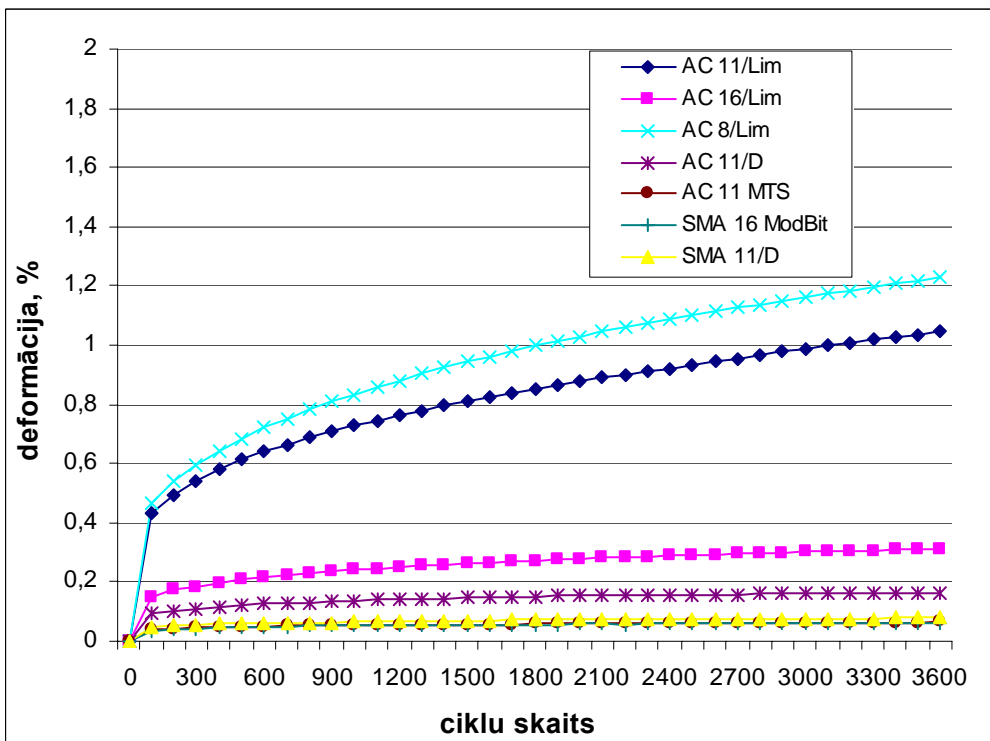
5.1. att. Aksiālais cikliskās spiedes tests: 40 °C, 100 kPa, 0,5 Hz



5.2. att. Aksiālais cikliskās spiedes tests: 50 °C, 100 kPa, 0,5 Hz



5.3. att. Aksiālais cikliskās spiedes tests: 60 °C, 100 kPa, 0,5 Hz



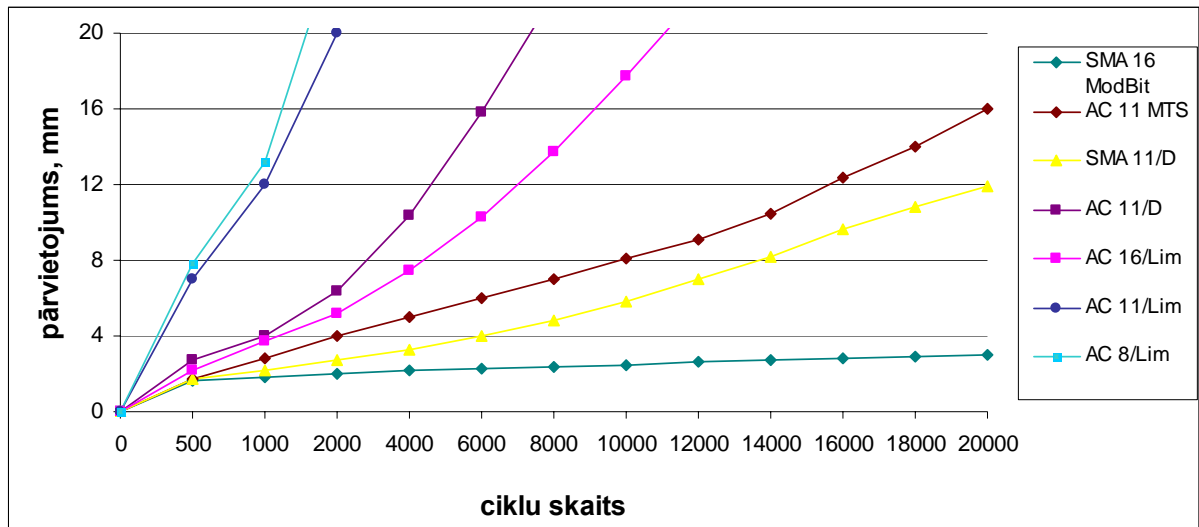
5.4. att. Triaksiālais cikliskās spiedes tests: 60 °C, 100/50 kPa, 0,5 Hz

5.2. Riteņu sliežu veidošanās tests (*Wheel Tracking test*)

Riteņu sliežu tests jau 10 gadus ir Eiropā izplatītākā pārbaude asfaltbetona maisījumu paliekošo deformāciju pētījumiem un kvalitātes pārbaudēm. Pārbaudes būtiska atšķirība no pārējiem testiem ir tāda, ka slodze parauga virsmai ir pielikta ar noslogotu kustīgu riteni, nodrošinot 370 kPa lielu parauga virsmas spiedienu. Pārbaudes ilgums ir 20 000 cikli ar slogošanas frekvenci 0,88 Hz (26,5 cikli minūtē). Detalizētāks iekārtas un paraugu slogošanas apraksts dots 3.4. nodaļā un standartā LVS EN 12697-22.

Izprojektētajiem tradicionālajiem un modificētajiem asfaltbetona sastāviem uz riteņu sliežu veidošanās testēšanas iekārtas eksperimentāli tika noteikta paliekošā deformācija. Iegūtie rezultāti ir attēloti grafiski – paliekošo deformāciju pieaugums atkarībā no ciklu skaita (sk. 5.5. att.). Rezultāti (sakarības „slogošanas ciklu skaits-deformācija”) uzrāda līdzīgas grafiskās tendences gan pie aksiālā, gan triaksiālā cikliskā slogojuma – vislielākās plastiskās deformācijas veidojas tradicionālajiem asfaltbetona sastāviem AC, bet zemāko deformāciju uzrāda SMA 16/Mod. Svarīgi atzīmēt, ka tradicionālais maisījums SMA 11/D uzrādīja otru labāko rezultātu.

Asfaltbetona maisījumi AC 8 un AC 11 ar dolomīta pildvielu, kā arī maisījums ar diabazu pildvielu AC 11 kā pie aksiālā, tā triaksiālā slogojuma uzrāda lielākas plastiskās deformācijas (sk. 5.1.–5.4. att.). Aksiālā un triaksiālā testa rezultāti maisījumiem SMA 16 ar Modbit 80B bitumenu un AC 11 ar MTS pildvielu ir ļoti līdzīgi, bet uz riteņu sliežu veidošanās testa tie nedaudz atšķiras, tomēr salīdzinājumā ar pārējiem maisījumiem uzrāda labāku deformatīvo noturību. Tas var būt saistīts ar plātnes parauga neviendabīgumu, atšķirīgu sablīvējumu (tilpumblīvumu) salīdzinājumā ar cilindrisko Maršala paraugu vai ar pieliktās slodzes raksturu (atšķirīga frekvence un lielums). Modificētais asfaltbetona sastāvs SMA 16/Mod, veicot testēšanu ar visām promocijas darbā lietotajām ekspluatācijas īpašību testēšanas metodēm, uzrāda mazāku plastisko deformāciju.



5.5. att. Riteņu sliežu veidošanās testa rezultāti

Analizējot eksperimentāli iegūtās sakarības „slogošanas ciklu skaits-deformācija”, ir noteikti deformācijas ātrumi (WTS_{air}) saskaņā ar vienādojumu:

$$WTS_{air} = \frac{\varepsilon_{10000}^p - \varepsilon_{5000}^p}{5}, \quad (5.1)$$

kur ε_{10000}^p , ε_{5000}^p – paliekošās deformācijas lielums pēc 10 000 un 5000 cikliem;

WTS_{air} –deformācijas ātrums, mm/cikli.

Vienādojums 5.1 ir spēkā pie nosacījuma, ka deformācijas ātrums posmā no 5000. cikla līdz 10 000. ciklam ir konstants. Četriem asfaltbetona maisījumiem (AC 8/Lim, AC 11/Lim, AC 11/D un AC 16/Lim) jau pirms 5000. cikla sasniegšanas sākas sabrukums. Šiem sastāviem deformācijas ātrums tika aprēķināts pēc vienādojuma:

$$WTS_{air} = \frac{\varepsilon_{n_1}^p - \varepsilon_{n_2}^p}{n_1 - n_2}, \quad (5.2)$$

kur $\varepsilon_{n_1}^p$, $\varepsilon_{n_2}^p$ – plastiskā deformācija attiecīgi pēc slodzes n_1 un n_2 ;

n_1 , n_2 – ciklisko slodžu skaits attiecīgi šļūdes līknes stabilizācijas sākuma un beigu posmā (sk. 2.20. att.).

5.1. tabulā apkopoti pētāmo asfaltbetona maisījumu sastāvu WTS_{air} rādītāji. Jāatzīmē, ka kopš 2010. gada šie deformācijas ātrumi ir reglamentēti „Ceļu specifikācijas 2010” prasībās. Maksimālā WTS_{air} kategorija saskaņā ar standartu LVS EN 13108-1 ir viens [124]. Salīdzinot aprēķinātos deformācijas ātrumus, konstatēts, ka tikai trīs testa paraugiem (AC 11/Ref, SMA 16/ModBit un SMA 11/D) $WTS_{air} < 1$. Svarīgi atzīmēt, ka SMA-16/ModBit sastāvs, kam $WTS_{air} = 0,06$, saskaņā ar jaunajām prasībām ir piemērots iekļāšanai uz ielām un ceļiem, intensīvi slogotiem ar satiksmi, t. i., kur satiksmes intensitāte $AADT > 3500$.

5.1. tabula

Asfaltbetona maisījumu deformācijas ātrumi

Maisījuma tips	Maksimālā saskaņā ar LVS EN 13108-1 WTS_{air} kategorija (mm/1000 slogošanas cikli)	Faktiskā WTS_{air} kategorija (mm/1000 slogošanas cikli)	„Ceļu specifikācijas 2010” prasības			
			AADT < 500	AADT 501–1500	AADT 1501–3500	AADT >3500
AC 11/Lim	1,00	5,79	1,0	0,8	0,5	0,3
AC 11/D		3,11				
AC 11/Ref		0,46				
AC 16/Lim		1,5				
AC 8/Lim		6,87				
SMA 11/D		0,49				
SMA 16/ModBit		0,06				

5.3. Rišu veidošanās dinamikas prognozēšana

Promocijas darbā pētāmo asfaltbetona paraugu rišu veidošanās dinamikas izpētei izvēlēts pakāpes funkcijas paliekošo deformāciju prognozēšanas modelis. Paliekošo deformāciju veidošanās dinamiku atkarībā no transporta slogošanas ciklu skaita aprēķina pēc formulas:

$$\varepsilon_p = a \cdot N^b, \quad (5.3)$$

kur ε_p – paliekošā deformācija;

a, b – materiāla konstantes;

N – slogošanas ciklu skaits.

Parametrs a raksturo paliekošo deformāciju pieaugumu pie $N=1$, savukārt parametrs b – deformācijas pieauguma ātrumu. Plastisko deformāciju (ε_{pn}) uzkrāšanos atkarībā no transporta slogošanas ciklu skaita var izteikt ar vienādojumiem:

$$\varepsilon_{pn} = \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N}(aN^b), \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{pn} = ab \cdot N^{b-1}. \quad (5.5)$$

Asfaltbetona segumā zem cikliskā slogojuma veidojās elastīgās un plastiskās deformācijas. Elastīgās deformācijas (ε_r) var pieņemt kā neatkarīgas (nemainīgas) no cikliskās slogošanas saskaņā ar vienādojumu:

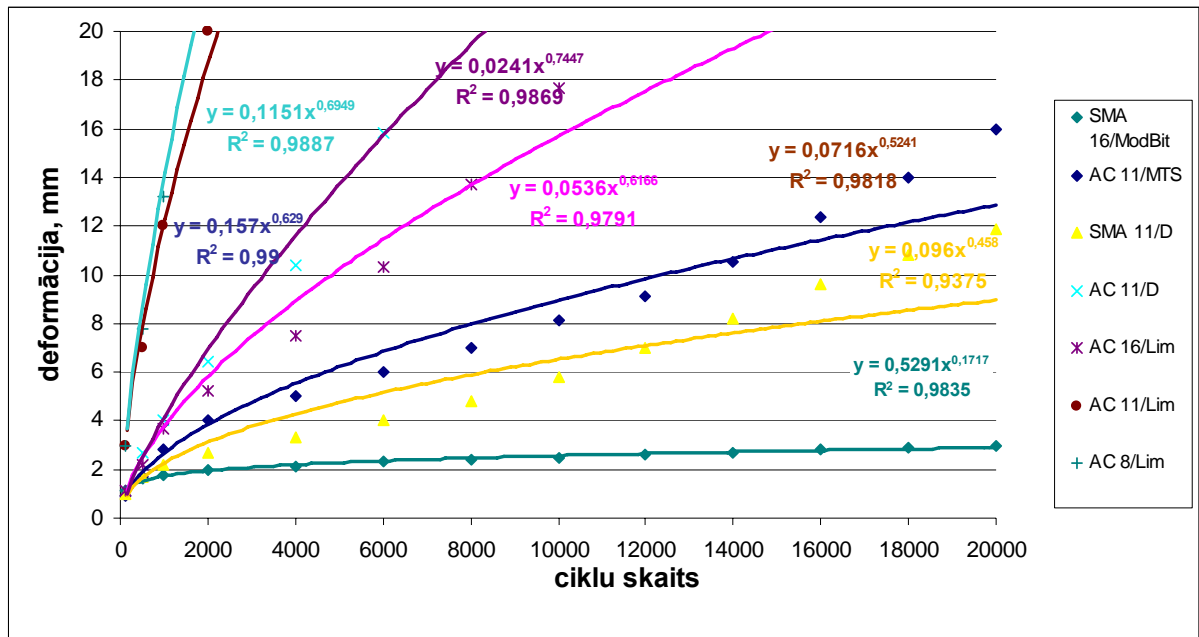
$$\frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \left(\frac{ab}{\varepsilon_r}\right)N^{b-1}. \quad (5.6)$$

Apzīmējot ar $\mu = \frac{ab}{\varepsilon_r}$ un $\alpha = b-1$, iegūstam viskozi-elastīgas sistēmas (VESYS)

modeļa vienādojumu:

$$\frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \mu \cdot N^{-\alpha}. \quad (5.7)$$

Vienādojuma 5.7 parametrs μ raksturo plastisko un elastīgo deformāciju attiecību, savukārt parametrs α – paliekošo deformāciju pieauguma ātrumu. Eksperimentālajiem AC un SMA asfaltbetona maisījuma sastāviem tika veikta riteņu sliežu testā iegūto deformācijas līkņu – paliekošo deformāciju pieauguma atkarībā no ciklu skaita analīze. Pakāpes funkcijas parametri μ un α tika noteikti, izmantojot lineārās korelācijas metodiku (sk. 5.6. att.).



5.6. att. Asfaltbetona paraugu materiāla konstanšu α un μ noteikšana

No grafiskajām sakarībām un, ņemot vērā iepriekš noteiktos asfaltbetona paraugu stinguma moduļus, tika noteikti paliekošo deformāciju parametri μ un α . 5.2. tabulā apkopotas eksperimentālo asfaltbetona maisījumu sastāvu elastīgo un plastisko deformāciju, stinguma moduļu un materiāla parametru μ un α vērtības.

5.2. tabula

Asfaltbetona deformāciju parametri μ un α

Materiāla parametrs	Asfaltbetona maisījuma sastāvi						
	AC 11/Lim	AC 8/Lim	AC 11/D	AC 11/Ref	AC 16/Lim	SMA11/D	SMA 11/D_Mod
E , MPa	17,5	16,4	32,2	115,3	55,8	68,6	164
ε_p , mm	20 ^{**}	13,1 [*]	14,0 ^{**}	11,2	16,5 ^{***}	7,61	3,0
ε_r , [10 ⁻²] mm	58,4	43,2	31,9	13,2	32,1	23,5	6,13
μ	0,16	0,17	0,08	0,47	0,17	0,35	8,95
α	0,629	0,695	0,745	0,524	0,617	0,458	0,172
Parauga biezums, mm	40						

^{*}) $\varepsilon_p = 20$ mm pie 1700 cikliem.

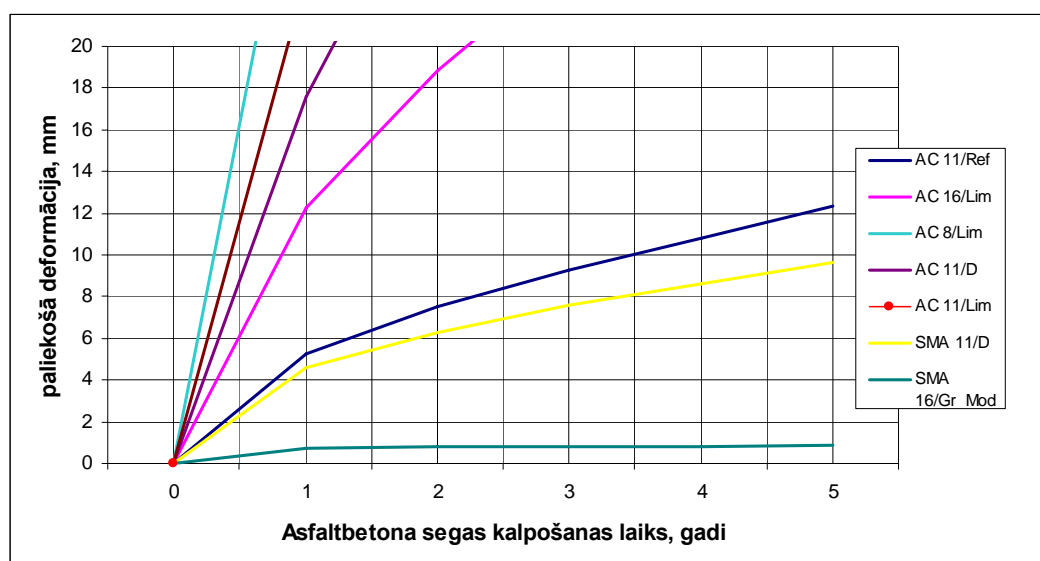
^{**}) ε_p pie 5000 cikliem.

^{***}) ε_p pie 10 000 cikliem.

Paraugu eksperimentālās pārbaudes laboratorijā tika veiktas, nodrošinot maksimālu tuvinājumu reālajiem ceļa sloģojuma apstākļiem. Lai varētu veikt paliekošo deformāciju prognozēšanu, tika ieviesti daži pieņēmumi:

- rišu veidošanās uz ceļa vai ielas notiek pēc tās pašas „slogošanas ciklu skaits-deformācija” sakarības, kāda ir iegūta, veicot rišu laboratorisko izpēti;
- rišu veidošanās notiek tikai asfaltbetona virskārtas slānī un nav saistīta ar apakšējo kārtu zemo deformatīvo noturību, t. i., rises nav iespieduma jeb strukturālās;
- bituminētajā slānī nav temperatūras gradienta, temperatūra visā materiālā ir konstanta;
- transporta slodze *ESAL* vienībās ir 16,7 milj. divdesmit gados (sk. 4.4. nodaļu);
- rišu veidošanās notiek + 40 °C un augstākās temperatūrās (sk. 4.3. nodaļu).

Ņemot vērā iepriekš noteiktos asfaltbetona paraugu stinguma modulūkus, risu dziļuma un ātruma rezultātus, paliekošās deformācijas parametrus un ārējos paliekošās deformācijas veidojošos faktorus – vietējos klimatiskos apstākļus un transporta slodzi, izteiktu *ESAL* mērvienībās laika periodam ar augstu ceļa segas ekspluatācijas temperatūru, tika noteikta teorētiskā rišu attīstības dinamika Rīgas apvedceļam A4 (sk. 5.7. att.). Salīdzinot iegūtos rezultātus septiņiem darbā izprojektētajiem asfaltbetona sastāviem, noskaidrots, ka tradicionālajiem blīvā asfaltbetona AC sastāviem deformācijas dziļums ≥ 13 mm, kas kļūst bīstams un var izraisīt akvaplanēšanu, ja braukšanas ātrums ir lielāks par 80 km/h, tiks sasniegts jau pirmajā seguma ekspluatācijas gadā. Svarīgi atzīmēt, ka starp trim labākajiem paraugiem ir viens tradicionālais sastāvs SMA 11/D ar diabaza pildvielu. Tas liecina, ka nemodificētais bitumens arī ir piemērots SMA sastāvu izgatavošanai, ja pirms tam tiek veikta rūpīga granulometriskā sastāva aplēse.



5.7. att. Paliekošo deformāciju veidošanās dinamika uz Rīgas apvedceļa A4

5.4. Apkopojums un secinājumi par 5. nodaļu

1. Izmantojot ekspluatācijas īpašību standartu LVS EN 12697-25 un LVS EN 12697-22 testēšanas metodes – cikliskās spiedes testu un *Wheel Tracking* testu, eksperimentāli noteikti testa paraugu deformācijas lielumi +40 °C, +50 °C un +60 °C temperatūrā. Cikliskās spiedes testa rezultāti +40 °C temperatūrā uzrāda testa paraugu deformācijas ātruma stabilizāciju bez sabrukuma, tomēr kopējā deformācija pēc 3600 cikliem etalonsastāviem ir ievērojami mazāka nekā tradicionālajiem maisījumiem (AC11/Ref un SMA 16/Mod $\approx 0,14\%$, AC 8/Lim = 0,86%, AC 11/Lim = 0,69%, AC 11/D = 0,38%, SMA 11/D un AC 16/Lim $\approx 0,28\%$). +50 °C temperatūrā testa paraugam AC 11/Lim pēc ~ 2500 . cikla vērojama sabrukuma zona un ievērojami palielinās tradicionālo maisījumu deformācijas (AC11/Ref un SMA 16/Mod $\approx 0,20\%$, AC 8/Lim = 1,25%, AC 11/Lim = 1,50%, AC 11/D = 0,85%, SMA 11/D un AC 16/Lim $\approx 0,55\%$). +60 °C temperatūrā izteikta sabrukuma zona eksperimenta sākumā pie ~ 700 . cikla parādās paraugiem AC 11/D ar diabazu, AC 11/Lim un AC 8/Lim – ar dolomīta pildvielu. Šie paraugi līdz ~ 3600 . ciklam sabrūk. Deformatīvi noturīgāko tradicionālo maisījumu AC 16/Lim un SMA 11/D kopējā deformācija sasniedz 0,9%, savukārt etalonsastāviem AC11/Ref un SMA 16/Mod deformācija ir 0,35%.
2. Analizējot riteņu sliežu testa eksperimenta rezultātus (*Wheel Tracking test*), konstatēts, ka tikai vienam tradicionālajam asfaltbetona maisījumam SMA 11/D deformācijas ātrums $WTS_{air} < 1$ (standarta LVS EN 13043 maksimālā WTS_{air} kategorija ir 1). SMA-16/Mod maisījums, kam $WTS_{air} = 0,06$, saskaņā ar „Ceļu specifikācijas 2010” prasībām piemērots iekļāšanai uz intensīvi ar satiksmi slogotām ielām un ceļiem, t. i., ja satiksmes intensitāte $AADT > 3500$. Etalonsastāvam ar MTS pildvielu ir noteikts deformācijas ātrums $WTS_{air} = 0,56$, kas saskaņā ar tehnisko specifikāciju prasībām apmierina zemas un vidējās intensitātes ceļus, kam $AADT = 1500-3500$.
3. Analizējot *Wheel Tracking* testa rezultātus un ņemot vērā noteiktos paraugu stinguma moduļu un *ESAL* lielumus periodam ar augstu asfaltbetona seguma ekspluatācijas temperatūru, veikta paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas prognozēšana. Modelējot rišu veidošanās dinamiku, konstatēts, ka tradicionālajiem asfaltbetona

maisījumiem AC rišu dziļums ≥ 13 mm, kas ir bīstams, ja braukšanas ātrums ir lielāks par 80 km/h, tiks sasniegts jau pirmajā asfaltbetona ceļa segas ekspluatācijas gadā. Etalonsastāvam SMA 16/Mod saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem piemīt labāka deformatīvā noturība. Etalonsastāvs AC ar MTS pildvielu un tradicionālais SMA 11 maisījums ar diabaza pildvielu uzrāda līdzīgus deformācijas lielumus. Pirmajā ekspluatācijas gadā šiem maisījumiem tiks sasniegts 5 mm liels rišu dziļums.

6. KVALITĀTES NODROŠINĀŠANAS SISTĒMAS KONCEPCIJA

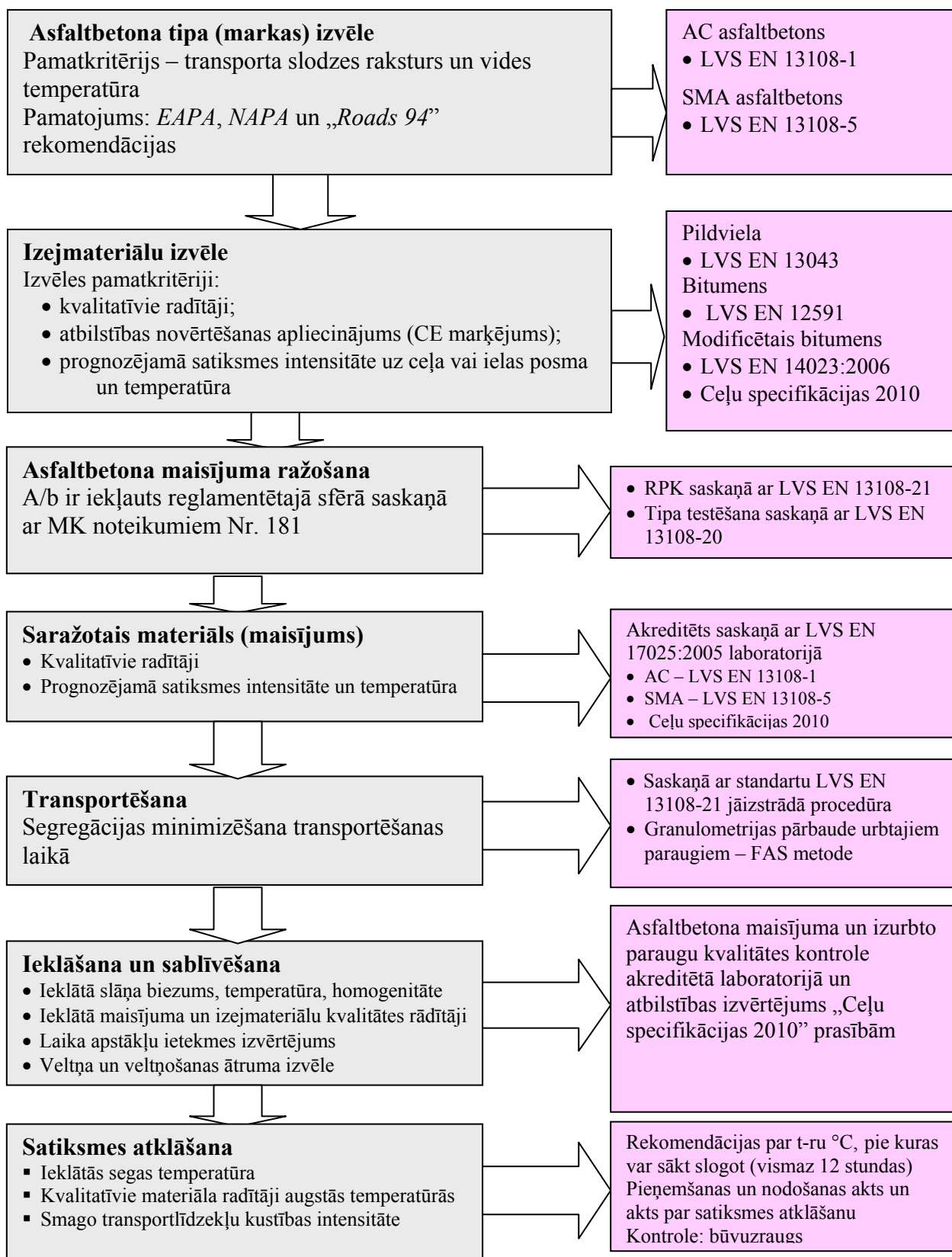
No kvalitātes nodrošināšanas aspekta, balstoties uz sistēmpieeju, izanalizēta pastāvošā asfaltbetona segas projektēšanas metodika, izejmateriālu izvēles, asfaltbetona maisījumu sagatavošanas metodika un būvniecības process. Analīzes mērķis – atklāt vājās vietas šajā procesā, lai kopumā to varētu uzlabot, jo, neskatoties uz skaidri saprotamo mehāniku, rekomendētajām specifikācijām un visumā kvalitātes prasībām atbilstošajiem asfaltbetona segas veidošanas etapiem, atsevišķos atjaunotajos ceļa posmos pēc neilga kalpošanas laika parādās rīses. (Daļēji atbilde uz šo jautājumu sniegta RTU 2006. g. veiktajā pētījumā „ABS segumu deformāciju (rišu) analīze Rīgas ielās”). Šim mērķim tika izstrādāta asfaltbetona segas kvalitātes nodrošināšanas sistēma, kas ir visa procesa kvalitātes nodrošināšanas algoritms un dod iespēju izsekot katru tā procedūru un noteikt vājās vietas un trūkumus (sk. 6.1. att.). Izstrādātā shēma ir vispārīga, un katrs tās bloks var tikt izvērsts un precizēts.

Līdz šim ceļa segas kvalitātes novērtējums, lai izvēlētos kādu no tās atjaunošanas darbiem, tiek veikts vizuāli pēc 6.1. tabulas apraksta. Vērtējot intensīvi slogoto un galveno maģistrālo ielu un sabiedriskā transporta pieturvietu segumus saskaņā ar 6.1. tabulā doto sistēmu, jāsecina, ka lielai daļai šo segumu kvalitāte ir slikta – galvenokārt garenvirziena (kustības virzienā vērsto) un šķērsvirziena (perpendikulāro) rīšu dēļ. Iepriekšējos gados ceļu un pieturvietu seguma deformatīvo īpašību uzlabošanai realizētie pilotprojekti nav devuši gaidītos rezultātus, jo nebija veikta rūpīga eksperimenta plānošana un eksperimentālā posma monitorings.

6.1. tabula

Ceļa segas kvalitātes novērtējums

Kvalitātes vērtējums	Apraksts	Veicamie atjaunošanas darbi
Labā	Līdzena, bez plaisām, rīšiem u. c. redzamām deformācijām, pietiekams dilumslānis	Atjaunošana nav nepieciešama
Apmierinoša	Nepietiekams dilumslānis, nelielas plaisas, rīses. Virskārta kopumā liecina par to, ka segas apakšējie konstruktīvie slāņi nav sabrukuši	Segas virskārta (seguma, dilumslāņa) atjaunošana
Slikta	Rīses, kas traucē un apdraud satiksmi. Plaisas un bedres virskārtā liecina par segas apakšējo konstruktīvo slāņu daļēju sabrukumu	Visas segas rekonstrukcija



14. att. Asfaltbetona segas kvalitātes nodrošinājuma sistēmas koncepcija:

– procesi un procedūras; – kvalitātes nodrošināšanas pasākumi

Analizējot izstrādātos kvalitātes nodrošinājuma sistēmas posmus (sk. 6.1. att.) un promocijas darbā iegūtos rezultātus, noskaidrots, ka:

1. Latvijas apstākļiem tradicionālie AC sastāvi pie lielām transporta slodzēm uzrāda ievērojamas plastiskās deformācijas. Tomēr, saskaņā ar pasaules vadošo asfaltbetona ražotāju asociāciju *EAPA*, *NAPA* un *AASHTO* rekomendācijām, kā arī *Road 94*, kas ir Zviedru ceļu būves tehniskie noteikumi, un *AASHTO (American Associations of State Highway and Transportation Officials)* prasībām, AC un SMA maisījumi ir piemēroti ar smago satiksmi noslogotu ielu un ceļu posmu izbūvei [10, 88, 89, 118]. Asfaltbetona dilumkārtu tipu piemērotība atkarībā no satiksmes intensitātes dota 6.2. un 6.3. tabulās.

6.2. tabula

Dilumkārtu tipu piemērotība atkarībā no satiksmes intensitātes saskaņā ar *Road 94* prasībām [10]

Dilumkārtas tips	<i>AADT</i> ₁ reducētais (tūkstoši)									
	0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25
AC										
SMA										

6.3. tabula

Dilumkārtu tipu piemērotība atkarībā no satiksmes intensitātes saskaņā ar *AASHTO* prasībām [118]

Dilumkārtas tips	<i>ESAL</i> (tūkstoši)							
	100	200	300	500	1000	5000	10 000	>10 000
AC								
SMA								

2. Asfaltbetona izejmateriālus klasificē un testēšanas metodes izvēlas saskaņā ar Eiropas normatīvu prasībām (pildvielām – LVS EN 13043 [82], ceļu bitumenam – LVS EN 12591 [69], PMB bitumeniem – LVS EN 14023 [125]), bet klasificēto izejmateriālu atbilstību nosaka, ņemot vērā vietējās „Ceļu specifikācijas 2010” prasības.

3. Kopš 1994. gada asfaltbetona sastāvu projektēšanu Latvijā veic saskaņā ar Maršala metodi. Ir zinātniski pierādīts, ka bitumena daudzuma optimizācija pēc Maršala metodes dod līdzīgus rezultātus kā jaunākā *SUPERPAVE* metode un klasiskā Hvīma metode [95].
4. Saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 181 asfaltbetons, bitumena saistvielas un minerālmateriāli ir iekļauti reglamentētā sfērā, kas pakļauta valdības noteiktajai obligātajai produktu, procesu un pakalpojumu atbilstības novērtēšanai [126]. Atbilstības apliecinājuma veids tiek noteikts tehniskajos noteikumos (nacionālajos standartos). Šobrīd, saskaņā ar harmonizētajiem Eiropas standartiem, tiek izmantotas sešas atbilstības novērtējuma sistēmas: 1, 1+, 2, 2+, 3 un 4, kuras nosaka, cik lielā mērā atbilstības novērtēšanas procesā jāiesaistās trešajai pusei, kā arī ražotāja un trešās puses (sertifikācijas institūcijas, neatkarīgas laboratorijas) pienākumus (sk. 6.4. tabulu.).

6.4. tabula

Atbilstības novērtēšanas sistēmas un uzdevumi

Sistēmu numerācija	1+	1	2+	2	3	4
Ražotāja pienākumi						
Tipa sākotnējā testēšana (produkta testēšana pirms tā piedāvāšanas tirgū)			x	x		x
Ražošanas procesa kontrole	x	x	x	x	x	x
Paraugu periodiska testēšana	x	x	x			
Paziņotās institūcijas pienākumi						
Tipa sākotnējā testēšana	x	x			x	
Ražošanas procesa kontroles sistēmas sertifikācija	x	x	x	x		
Ražošanas procesa kontroles nepārtraukta uzraudzība	x	x	x			
Paraugu audita testēšana	x					

Asfaltbetona maisījums pieder pie sistēmas numerācijas 2+. Šajā sistēmā jāveic asfaltbetona tipa testēšana (produkta testēšana pirms tā piedāvāšanas tirgū), jāizstrādā ražošanas procesa kontroles sistēma un jāveic materiāla periodiska testēšana. Savukārt akreditētajai sertifikācijas institūcijai jāsertificē un regulāri jāuzrauga ražošanas procesa kontroles sistēma. Latvijā šobrīd darbojas trīs akreditētās būvmateriālu sertificēšanas institūcijas: AS Inspecta Latvia, Latvijas Zinātņu akadēmijas (LZA) Sertifikācijas centrs un SIA "Bureau Veritas Latvia" Sertifikācijas institūts "JADZIS" [127]. Līdz 2009. gadam šo institūciju akreditācijas sfērās nebija iekļauti bituminētie maisījumi, un to darbība

balstījās uz cementbetona, konstrukciju un to izejmateriālu sertifikāciju, kas visdrīzāk bija saistīts ar tā laika perioda lielajiem būvdarbu apjomiem civilo un rūpniecības ēku celtniecībā. Tā rezultātā asfaltbetona maisījumu atbilstības novērtēšanu Latvijā varēja veikt tikai ārzemju akreditētās sertifikācijas iestādes. Tomēr ir svarīgi atzīmēt, ka tipa testēšanas standartā LVS EN 13108-20 [128] ir iekļautas vairākas ekspluatācijas īpašību testēšanas metodes – riteņu sliežu veidošanās tests (*WTT*), nogurumizturības, stinguma un cikliskās spiedes tests, savukārt tehnisko noteikumu prasībās „Ceļu specifikācijas 2010” *WTT* metode ir iekļauta tikai kopš 2010. gada. Tā rezultātā Latvijā saražotie asfaltbetona sastāvi, kam bija vājas deformatīvās īpašības, apmierināja vietējo tehnisko noteikumu prasības. Svarīgākās mehāniskās īpašības, kuras jāņem vērā, projektējot ceļa segas konstrukciju, kā, piemēram, stingums un nogurums, vietējo tehnisko noteikumu prasībās joprojām nav reglamentētas.

5. Asfaltbetona maisījuma kvalitātes kontrole tiek veikta saskaņā ar standarta LVS EN ISO/IEC 17025:2005 metodi neatkarīgā akreditētā laboratorijā (trešā puse) [129]. Asfaltbetona sastāvus pēc kvalitātes rādītājiem klasificē saskaņā ar standartu LVS EN 13108-1 (asfaltbetoniem AC) un LVS 13108-5 (asfaltbetoniem SMA) metodēm [124, 130]. Kvalitātes kontrolei, nosakot asfaltbetona maisījumu un izurbto paraugu galvenās fizikālās un mehāniskās īpašības, lieto šādas standartu (LVS EN) metodes un prasības:

- bitumena saistvielas saturs [131];
- asfaltbetona maisījuma granulometriskais sastāvs [132];
- Maršala paraugu izgatavošana ar Maršala āmuru [93];
- Maršala paraugu tilpuma parametri (porainība, ar bitumenu aizpildīto poru daudzums un minerālā karkasa porainība) [133];
- Maršala stabilitāte un plūstamība [123];
- ūdensjutība [134–135];
- riteņu sliežu tests (kopš 2010. gada).

No 2010. gada asfaltbetona maisījumu kvalitātes kontrolei Latvijā papildus tiks veikta rišu veidošanās ātruma (*WTS_{air}*) noteikšana ar riteņu sliežu veidošanās testu saskaņā ar standarta LVS EN 12697-22 metodi [104]. No 2010. gada ceļu būves tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasībās reglamentēts arī *WTS_{air}* lielums atkarībā no satiksmes intensitātes.

6. Analizējot saražotā materiāla transportēšanas un ieklāšanas procesu ietekmi uz ceļa seguma kvalitāti, konstatēts, ka tie nav reglamentēti, tomēr standarts LVS EN 13108-21 rekomendē izstrādāt maisījuma transportēšanas procedūru, lai minimizētu segregāciju. Svarīgi atzīmēt, ka ieklāšanas kvalitāte ir atkarīga no:
- ieklātā asfaltbetona slāņa īpašībām (temperatūras, slāņa biezuma, homogenitātes);
 - asfaltbetona un izejmateriālu īpašībām (asfaltbetona tipa, pildvielu formas un tekstūras, granulometrijas un bitumena viskozitātes);
 - laika apstākļiem (gaisa un pamatnes temperatūras, vēja ātruma);
 - veltņa tipa (statiskais, pneimatiskais vai vibrācijas veltņis) un veltņošanas ātruma.
7. Ieklāšana tiek veikta ar asfaltbetona ieklājējiem, kuru uzdevums ir ieklāt atbilstošā platuma un biezuma asfaltbetona maisījumu. Būtiska problēma, kas parādās transportēšanas laikā, ir segregācija. Tā lielā mērā ir atkarīga no materiāla īpašībām (rupjo frakciju daudzuma) un attāluma līdz būvobjektam. Segregācija nav normēta, tomēr tā krasi ietekmē materiāla deformatīvās un stiprības īpašības. Standarts LVS EN 13108-21 rekomendē izstrādāt maisījuma transportēšanas procedūru [136].
8. Sablīvēšana ir otrais (pēc segregācijas) svarīgākais asfaltbetona seguma ekspluatācijas īpašības ietekmējošais faktors. Atbilstoši darba uzdevumam (projektam) izprojektētais asfaltbetona maisījums zaudē savas ekspluatācijas īpašības (samazinās nogurumizturība un stiprība, palielinās paliekošās deformācijas un plaisu veidošanās zemā temperatūrā), ja segums nav sablīvēts līdz projekta blīvumam. Četri galvenie faktori, kas raksturo veltņa spēju sablīvēt asfaltbetona maisījumu, ir šādi:
1. ieklātā asfaltbetona slāņa īpašības (temperatūra, slāņa biezums, homogenitāte);
 2. asfaltbetona un izejmateriālu īpašības (asfaltbetona tips, pildvielu forma un tekstūra, granulometrija un bitumena viskozitāte);
 3. laika apstākļi (gaisa un pamatnes temperatūra, vēja ātrums);
 4. veltņa tips (statiskais, pneimatiskais vai vibrācijas veltņis) un veltņošanas ātrums.

Ieklātā maisījuma kvalitātes kontrole tiek veikta, nosakot izurbto paraugu īpašības (no 2010. gada – paliekošo deformāciju). Svarīgi atzīmēt, ka iegūtie rezultāti neattiecas uz visu ceļa vai ielas posmu, bet tikai uz konkrētajām paraugu ņemšanas vietām. Tomēr šobrīd pasaulē ir izstrādātas vairākas progresīvas nesagraujošās metodes sablīvējuma noteikšanai visai ceļa seguma klātnei, kas vēl nav guvušas plašu lietojumu Latvijā.

9. Viens no rišu veidošanās cēloņiem ir nepieciešamība pēc iespējas ātrāk atklāt satiksmi rekonstruētajā ceļa posmā. Satiksmes atklāšana nav pieļaujama līdz brīdim, kamēr segums nav atdzisis un bitumens nav pietiekoši sacietējis un strukturējies. Minimālais rekomendētais laiks pirms satiksmes atklāšanas ir 12 stundas [70]. Atdzišanas ātrums ir atkarīgs no izejmateriālu īpašībām, slāņa biezuma, gaisa temperatūras un vēja ātruma. Jāatzīmē, ka darbā paraugu testēšana tika veikta pēc 24–48 stundām pēc paraugu sablīvēšanas (EN standartu prasības).

Minētais liecina, ka, neskatoties uz SMA un AC asfaltbetona maisījumu vairākām pozitīvām īpašībām, to praktiskā izmantošanas pieredze uz Latvijas ielām un ceļiem ir maza. Šo asfaltbetona maisījumu lietojums Latvijas ceļos un ielās liecina, ka rezultāts nav apmierinošs – parādās nepieļaujamas rises. Promocijas darbā, analizējot izstrādātās kvalitātes nodrošinājuma sistēmas posmus – asfaltbetona tipa izvēli, prasības izejmateriāliem, projektēšanai un saražotā materiāla kvalitātes kontroli – piedāvātas vairākas **rekomendācijas**, kuru izpilde varētu minimizēt rišu veidošanos uz jaunbūvētajām Latvijas ielām un ceļiem:

- tehnisko noteikumu „Ceļu specifikācijas 2010” prasību pilnveidošana – jauno ekspluatācijas īpašību testēšanas metožu aprobēšana un ieviešana asfaltbetona maisījumu un izurbto paraugu kvalitātes kontrolei;
- CE marķējuma piešķiršana, kas apliecinās, ka asfaltbetons atbilst ES direktīvām, t. i., ir izstrādāta un sertificēta ražošanas procesa kontrole un materiāliem periodiski tiek noteiktas galvenās ekspluatācijas īpašības zemās un augstās temperatūrās saskaņā ar asfaltbetona tipa testēšanas standartu LVS EN 13108-20;
- *AASTO* un *NAPA* rekomendāciju ievērošana attiecībā uz SMA un AC maisījumu ražošanu un ieklāšanu, t. i., lietojot kvalitatīvas pildvielas un modificēto bitumenu, stingri ievērojot materiāla padeves secību, temperatūru un maisīšanas ilgumu ražošanas laikā, maisījuma temperatūru ieklāšanas sākumā un beigās, kā arī rūpīgi sekojot veltņošanai (veltņa tips, temperatūra, veltņošanas ātrums utt.);
- asfaltbetona maisījuma transportēšanas un katra asfaltbetona maisījuma tipa ieklāšanas procedūras izstrāde;
- progresīvo sablīvējuma noteikšanas metožu ieviešana visa ceļa seguma klātnes kvalitātes kontrolei;
- informatīvo datu vākšana (ceļa seguma konstrukcijas biezums, atsevišķu slāņu biezums, asfaltbetona tipi u. c.);
- transportlīdzekļu svara kontroles sistēmas izstrāde un ieviešana.

GALVENIE SECINĀJUMI

1. Neskatoties uz vietējās tehniskās dokumentācijas – „Autoceļu specifikācijas 2005” reglamentētajām prasībām asfaltbetonam un to izejmateriāliem, pēdējos gados iekļātajos asfaltbetona segumos smagi noslogotajās Latvijas ielās un ceļos īsā laikā veidojas rīses, kas ir bīstamas satiksmei.
2. Izmantojot martena tēraudkausēšana sārņu (MTS) pildvielu un modificēto bitumenu, izstrādāti SMA un AC asfaltbetona maisījumu etalonsastāvi.
3. Ar ekspluatācijas īpašību testēšanas metodēm eksperimentāli noteikti plastiskās deformācijas lielumi netradicionālajiem (etalonsastāviem) un tradicionālajiem asfaltbetona maisījumiem. Analizējot iegūtos rezultātus, konstatēts, ka pie vienādiem testēšanas apstākļiem zem cikliskā aksiālā un triaksiālā slogojuma tradicionālajiem asfaltbetona maisījumiem salīdzinājumā ar etalonsastāviem ir 3–10 reizes lielāka plastiskā deformācija. Etalonsastāviem pie aksiāla slogojuma pēc 3600 cikliem nav konstatēta sabrukuma zona, savukārt triaksiālajā slogojumā +60 °C temperatūrā paliekošā deformācija etalonsastāviem ir 0,1%, kas ir trīs reizes mazāka par SMA 11/D un AC 16/Lim (0,3%) un vairāk nekā desmit reizes mazāka par AC 11/Lim, AC 11/D un AC 8/Lim maisījumu paliekošajām deformācijām (1,2%).
4. Analizējot ar riteņu sliežu metodi iegūtos paliekošo deformāciju ātrumus WTS_{air} (mm/1000 cikli), konstatēts, ka trim asfaltbetona maisījumiem – AC 11/Ref, SMA 11/D un SMA 16/ModBit šļūdes ātrums ir mazāks par vienu ($WTS_{air} = 1$ ir standarta LVS EN 13108-1 maksimālā kategorija), tomēr tikai SMA-16/ModBit maisījums, kam WTS_{air} ir 0,06, saskaņā ar „Ceļu specifikāciju 2010” prasībām ir piemērots iekļāšanai uz ielām un ceļiem, intensīvi slogotiem ar satiksmi, t. i., kur satiksmes intensitāte $AADT > 3500$. Etalonmaisījumam AC 11/Ref WTS_{air} ir 0,56, tradicionālajam SMA11/D WTS_{air} ir 0,49, savukārt pārējiem tradicionālajiem AC maisījumiem šļūdes ātrums WTS_{air} ir no 1,5 līdz 6,86.
5. Izstrādāta Latvijas apstākļiem raksturīgai transporta slodzei un klimatiskajiem apstākļiem ekvivalentās vienas ass slodzes ($ESAL$) aprēķinu metodika. Secināts, ka paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas pētījumiem Latvijā satiksmes uzskaitē lietotā mērvienība – vidējā diennakts satiksmes intensitāte ($AADT$) ir ļoti vispārīga un paliekošo deformāciju veidošanās dinamikas pētījumiem nav piemērota, tomēr tā nepieciešama $ESAL$ lieluma aprēķinam.

6. Izmantojot Latvijā pieejamos datus, iegūtus no satiksmes uzskaites stacijas uz Rīgas apvedceļa A4, un gaisa temperatūras datus par laika periodu 2001.–2008. g., darbā ir aprēķināts ekvivalentās vienas ass slodze lielums laika periodam ar augstu ceļa segas ekspluatācijas temperatūru. Tā kā nākotnē satiksmes intensitātes dati var atšķirties no pēdējo gadu novērojumiem, *ESAL* lielums laika periodam ar augstu asfaltbetona seguma kalpošanas temperatūru ir aprēķināts, balstoties uz vairākiem šādiem pieņēmumiem: ikgadējais satiksmes intensitātes pieaugums ir 2%, asfaltbetona segas kalpošanas laiks ir 20 gadi, dienu skaits gadā ar augstu asfaltbetona seguma kalpošanas temperatūru ir 2%. Pieņēmumi ir balstīti uz pēdējo gadu novērojumiem un vairāku eksperimentu rezultātiem.
7. Piedāvāta metodika, kas dod iespēju, ņemot vērā satiksmes slodzi, izteiktu *ESAL* vienībās un vietējos klimatiskos apstākļus, veikt paliekošo deformāciju prognozēšanu laboratorijas apstākļos. Veicot Latvijas apstākļiem tradicionālo maisījumu un etalonmaisījumu paliekošo deformāciju prognozēšanu, konstatēts, ka tradicionālajiem AC asfaltbetona maisījuma sastāviem rišu dziļums ≥ 13 mm, kas ir bīstams, ja braukšanas ātrums ir lielāks par 80 km/h, tiks sasniegts jau pirmajā asfaltbetona ceļa segas ekspluatācijas gadā.
8. Izstrādāta asfaltbetona seguma kvalitātes nodrošinājuma sistēma un, izanalizējot dažus tās posmus, saistītus ar asfaltbetona maisījuma tipa izvēli, ražošanu, projektēšanu un kvalitātes kontroli, dotas rekomendācijas rišu veidošanās parādības minimizēšanai uz Latvijas ielām un ceļiem.

LITERATŪRA

1. Dzenis M. Vīksne A. Bitumenu un pildvielu adhēzija un asfaltbetona degradācijas cēloņi. Atskaite Rīgas pilsētas Domes Satiksmes departamentam, 2002. gads.
2. Леонович И.И., Шумчик К.Ф. Дорожно-строительные материалы. - Минск: Высшая школа, 1983. - 399с.
3. Ceļu satiksmes drošības direkcija (CSDD): Statistika / Internets.-<http://www.csdd.lv/>
4. Ceļu Satiksme Drošības Direkcija (CSDD) Transportlīdzekļu statistikas kopsavilkums Latvijā no 1995. līdz 2004. gadam. 2005.gads Rīga. 3.lpp.
5. Federal Highway Administration. Highway Pavement Distress Identification Manual of Highway Conditions and Quality of Highway Construction Survey. – Washington DC. Department of Transport 1979.
6. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials// Proceedings of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Vol. I.- London, 1972.-161-174pp.
7. Lister N.W., Addis R.R. Field Observations of Rutting and Practical Considerations. Presentaton of the Annual Transportation Research Board Meeting.-Washington, D.C. 1976.
8. Autoceļu specifikācijas 2005. Apstiprinātas LR Satiksmes ministrijā Autosatiksmes departamentā Tehniskajā komisijā ar 2005. gada 14. jūlija rīkojumu Nr.13.1-10/1. 137 lpp
9. Finnish Pavement Technology Advisory Council (PANK). Finnish Asphalt Specification - Helsinki: Finnish Pavement Technology Advisory Council, 1995.
10. Ceļš 94. Vispārējie ceļu būves tehniskie noteikumi. 6. daļa. Bituminētās segu konstrukciju kārtas. Zviedru Nacionālā ceļu administrācija. Tehniskais departaments. Autoceļu būves un grunts sekcija. Tulkojums Latviešu valodā 1999. gads
11. ГОСТ 9128-84. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.1997- 41с.
12. Valsts Stratēģiskais ietvardokuments 2007.–2013.gada periodam. LR Finanšu ministrija. - 2007. – 38lpp.
13. Сюньи Г. К. Дорожные асфальтовый бетон.- Киев: Госстройиздат, УССР, 1962.- 235с.

14. Королёв И. В. Дорожный теплый асфальтобетон. – Киев: Вища школа, 1975. – 155с.
15. Рыбьев И. А. Асфальтовые бетоны. – Москва: Высшая школа, 1969. – 399с.
16. Колбановская А.С, Михайлов В.В. Дорожные битумы. – Москва: Транспорт, 1973. – 258с.
17. Brown E. R., Prithvi S. Kandhal, Jungna Zhag. Performance Testing For Hot Mix Asphalt. National Centre for Asphalt Technology. NCAT Report 01-05. November 2001. 72.p
18. Mang H., G. Hofstetter. Festigkeitslehre. Springer – Verlag, Viena 2000.
19. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление жесткости полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1972г. – 500с.
20. Lekarp F. Permanent deformation behaviour of unbound granular materiāls. Licentiatent Thesis, Kungl Tekniska Hogskolan 1997.
21. Bahuguna S., Panoskaltis P. Vassilis, Papoulia D. Katerina. Identification and Modeling of Permanent Deformations of Asphalt Concrete// Journal of Engineering Mechanics Vol. 132, No. 3. - 2006 March 1.- p. 231-239.
22. Shaw P.S. Stress-Strain Relationship for Granular Materials under Repeated Loading. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham 1980.
23. Burmister. D.M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems// Journal of applied Physics.- 1945.-Volume 16, Issue 2. p. 89-94.
24. Rīgas ielu, transportbūvju un satiksmes vadības attīstības koncepcija 2008.-2018. gads. Pasūtītājs Rīgas Domes Satiksmes departaments.
25. Burmister D.M, Theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways// Proceedings of 23rd Annual Meeting Highway Research Board. Washington D.C., 1943 p 126-148.
26. Yoder E. J, Witczak M. W. Principles of Pavement Design, 2nd Edition. – New York: John Wiley and Sons, 1975.- 736p.
27. Hofstra A., Klomp A.J.G. Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions, Proceedings// Third international Conference on The Structural Design of Asphalt Pavement .- London. 1972. - Vol 1, p.613-621.
28. Haritonovs V., Naudžuns J.R., Smirnovs J. Ceļa segu risu veidošanās cēloņu noteikšana// Starptautiskās konferences „Būvniecība 2005” zinātniskie raksti.- Jelgava LLU 2005.- lpp. 52-58

29. Eisenmann J, Himler A. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt Pavement – Experiment and Theoretical Investigations// Proceedings of Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Vol. 1. - Ann Arbor, 1987, p. 392 – 403.
30. Boltzman. Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. Annalen der Physik un Chemie. 1876.
31. Rabbira Gabra. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures. Department of Road and Railway Engineering. - Norwegian University of Science and Technology NTNU Dissertation 2002. - 201p.
32. Blab Ronald, Gagliano Barbara, Kappl Karl Models for Permanent Deformation for Bituminous Bound Materials in Flexible Pavement // Proceedings of Final Reports from Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure SAMARIS Conference SMA-05-DE11 2004. Lausanne, Swiss 2006.
33. Erkens. S. Asphalt concrete response – Determination, Modeling and Prediction. Delft University.- Delft: Press Science 2002.-202p.
34. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials// Proceedings of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Vol. I.- London, 1972.-161-174pp.
35. Romain J.E. Rut Depth Prediction in Asphalt Pavements// Proceeding of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement Vol.1. London1972.- pp 205-210.
36. Sousa, J., Craus, J., and Monismith, C.L., Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, SHRP A/IR/91-104, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1991.- 120p.
37. Van de Loo P.J. Practical Approach to the Prediction of Rutting in Asphalt Pavements: The Shell Method// Transportation Research Record 616, Transportation Research Board.- Washington, D.C.1976. – pp.15.-21.
38. Findley W.N. Lai, J.S. Onaran, K. Creep and Relaxation of Non-Linear Viscoelastic Materials: with an Introduction to Linear Viscoelasticity.- North Holland Publishing Company.1976.-384.p
39. Гезенцевей Л.Б., Казарновская Э.А. Релаксация напряжений в асфальтобетоне. – Москва: Тр. Союздорнииб 1966г., вып. 7, с. 27-34.
40. Papazian H.S. The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphalt Concrete// Proceedings of the International Conference on

the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.-1962.-201.-211.p

41. Lapsa. V. Jaunākas būvmateriālu mehāniskās pārbaudes. – Rīga: Avots, 1981.- 163lpp.
42. Гастев В.А. Краткий курс сопротивления материалов. Главная редакция физико – математической литературы – Москва: НАУКА, 1977.-456с.
43. Tschoegl, N.W. The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior – An Introduction. Springer – Verlag.- Berlin: Heidelberg, 1989.-769pp.
44. Monismith C.L., Hicks R.G., Finn F.N., Sousa J.B., Harvey J., Weissman S., Deacon J., Coplantz J., Paulsen G. Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, The Strategic Highway Research Program: SHRP-A-415, 1994.- 437p.
45. Gardiner, L.J., Skok, E.L., Use of Viscoelastic Concepts to Evaluate Laboratory Test Results and Field Performance of Some Minnesota Asphalt Mixtures // Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA 1967.
46. Airey G. D., Behzad R., Collop A.C. Linear Rheological Behavior of Bituminous Paving Materials. J. Mat. in Civ. Engrg. Volume 16, Issue 3, 2004.- 212-220p
47. Sousa J.B., Weissman S.L. Modelling permanent deformation of Asphalt-Aggregate Mixes// Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, ,Vol.63 1994.
48. Sides, A. Uzan, J., Perl, M. A. Comprehensive Viscoelasto-Plastic Characterization of Sand-Asphalt Compressive and Tensile Cyclic Loading// Journal of Testing and Evaluation, Vol.13, No.1, 1985.
49. Perzyna, P. Fundamental Problems in Viscoplasticity, Advances in Applied Mechanics Vol. 9. 1966.- 243-377p.
50. Chang, K.G and Meegoda, J.N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt// Journal of Engineering Mechanics, Vol.123, No.5 1997.- 495-503 pp.
51. Attoh-Okine, N.O. Potential application of geometrical modelling to stress-strain behaviour of asphaltic concrete layers in flexible pavement// Proceedings of the Fifth International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway 1998.
52. Uddin, W., Pan, Z., Noppakunwai, P., Plaxico, C.A. and Hackett, R.M. Finite-element dynamic analysis of distressed asphalt pavements.// Eighth International Conference on Asphalt Pavements.- Seattle, Washington, 1997.

53. Rothenburg, L., Bogobowicz, A., Haas, R., Jung, F.W. and Kennepohi, G. Micromechanical modelling of asphalt concrete in connection with pavement rutting problems// Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, vol.1,. - Nottingham, England 1992.
54. Uge P., Van de Loo P.J. Permanent deformation in asphalt mixtures// Canadian Technical Asphalt Association 19:1974. – 307-341.pp.
55. Tseng K.H., Lytton, R. L. Prediction of Permanent Deformation in flexible Pavement Materials Implication of Aggregates in Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements, ASTM STP 1016. H. G. Schrauders and C. R. Marek, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.-pp. 154-172.
56. Lytton, R.L., Uzan, J., Fernando, E., Roque, R., Hiltunen, D., Stoffels, S. Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, Strategic Highway Research Program Report A-357, Washington, D.C.: National Research Council, 1993.-789pp.
57. Uzan, J. Resilient Characterization of Pavement Materials// International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.- Chichester, NY, 16(6), 1992.- pp.435-459.
58. Guo D.Z and Ren R.B. Visco-elastic mechanics in multi-layered pavement. Hear Bin Technology University Press, China 2001.
59. Kenis, W. and Wang, W. Calibrating Mechanistic Flexible Pavement Rutting Models from Full Scale Accelerated Tests// Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements.- Seattle, Washington, 1997.- pp.663-672.
60. Park, Seong-Wan. Prediction of Layer Rutting on Pavement Foundations Based on Stress Dependency// Journal of KGS Vol 21. Nr.7 Septemper 2005.-pp.345-357
61. Park, S. and Lytton R. Effect of Stress-Dependent Modulus and Poisson's Ratio on Structural Responses in Thin Asphalt Pavements// Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.130, No.3, 2004.- pp.387-394.
62. Nukunya Bensa, Roque Reynaldo, Tia Mang, Mehta A. Yusuf. Effect of Aggregate Structure on Rutting Potential og Dense Graded Asphalt Mixture// Tranportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 1789. 2002.
63. Segoz B. Topal A. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness// Building and Environment Volume 42, Issue 10. October 2007.

64. Sousa, J., Craus, J., and Monismith, C.L., Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, SHRP A/IR/91-104, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1991.- 120p.
65. Малкин А.Я., А.И. Исаев Релогия: концепции методы приложения. - Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 560с.
66. LVS EN 12596:1999 Bitumens un bitumena saistvielas. Dinamiskās viskozitātes noteikšana ar vakuuma kapilāru.
67. LVS EN 1426:1999. Bitumens un bitumena saistvielas. Adatas penetrācijas noteikšana.
68. LVS EN 1427:1999. Bitumens un bitumena saistvielas. Mīkstēšanas temperatūras noteikšana. Gredzens un lodes metode.
69. LVS EN 12591:2000 Ceļu bitumenu tehniskie noteikumi.
70. Варенько. В.А. Новые материалы в дорожном строительстве. Учебное пособие. – Минск: Технопринт, 2004. – 170с.
71. Sybilski D. Polimerosfalty drogowe jakšc funkcionalna metodika i kriteria oceny. – Warszawa: Instytut Badawczy Dróg i Mostów. 1996.-150p.
72. Kishchinsky S., Vyrozhemsky V., Kirichenko L. Working out national specifications for bitumens, modified by polimers// In Proceedings of IXI International Conference Durable and Safe road Pavements. Kielce 6.-7. May. 2003.- p.93.-100.
73. Гезенцева. Л.Б. Дорожный асфальтобетон. –Москва: Транспорт 1976 г. 336с.
74. Asphalt Institute. The Asphalt Handbook. Manual Series No.4 (MS-4), 1989 p. 12-27.
75. Vincent J. Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Course Materials. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Special Report 98-1; January 1998.- 29p.
76. Khalid Salim Alshamsi. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structure A Dissertation Submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In The Department of Civil and Environmental Engineering. May 2006.
77. Šahmenko G. Pētījums betona sastāvu projektēšanā un optimizācijā plastiskiem maisījumiem. Promocijas darbs doktora grāda iegūšanai. Rīgas Tehniskā universitāte 2004.gads. – 130lpp.
78. LVS EN 933-1:1997. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 1. daļa: Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana. Sijāšanas metode.

79. LVS EN 933-3:1997/A1:2003. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 3. daļa: Daļiņu formas noteikšana – Plākšņainības indekss.
80. LVS EN 933-4:2001. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 4. daļa: Minerālmateriālu daļiņu formas noteikšana – Formas indekss.
81. LVS EN 933-5:1997. Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 5. daļa: Drupinātu un laužto virsmu procenta noteikšana rupjo minerālo materiālu daļiņās.
82. LVS EN 13043 : 2002 Minerālmateriāli bituminētajiem maisījumiem un virsmas apstrādēm ceļiem, lidlaukiem un citiem satiksmes laukumiem.
83. Shahrour, M.A., Saloukeh, B.G. Effect of quality and quantity of locally produced filler (passing sieve no. 200) on asphalt mixtures in Dubai// Presented at the symposium Effect of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance - San Diego, CA, USA 10 Dec. 1991.- p. 187-208.
84. Anderson D.A., Tarris J.P., Brock J.D. Dust Collector Fines and Their Influence in Mixture Design// Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, Kansas City, Missouri, USA vol. 51, 1982.- p. 363-397.
85. Kavussi, A., Hicks, R.G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers// Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Vol.66.1997.- 211.-220p.
86. Francken, L.Vanlestraete A., Léonard D. and Pilate, D. New developments in the PRADO volumetric mix design// 6th Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, PTEBM 2003.- Zurich, Switzerland, 2003.- pp.1-5.
87. Asphalt Institute. SP-2 Superpave Mix Design 3.rd edition – Lexington, Kentucky USA. 2001.-128p.
88. European Asphalt Pavement Association (EAPA). Heavy Duty Surfaces: The Argument For SMA. Netherlands, Breuklen, 1998. – 40p.
89. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice. Quality Improvement Series 122. 2002. – 47p.
90. Lees G. Asphalt Mix Design for Optimum Structural and Tyre Interaction Purposes// Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor - July 13-17, 1987.
91. Diaconu E., Stefan L., Burlacu A. Bitumen type influence on asphalt mixtures with cellulose fibres performance. //CD proceedings In 3^d Eurasphalt & Eurobitume congress Vienna 2004 – Paper 020.

92. ASTM D1559-89 Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.
93. LVS EN 12697-30:2005 Bituminētie maisījumi. Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes. 30.daļa: Paraugu sagatavošana ar trieciena blīvētāju.
94. Baladi, Gilbert Y., Lyles Richard W., Harichandran Ronald S. Asphalt Mix Design: An Innovative Approach// The 67th Annual Meeting of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., January 11-14, 1988. – 26p.
95. Hveem. F. N. The Centrifuge Kerosene Equivalent as Used in Establishing the Oil Content for Dense Graded Bituminous Mixtures. A report prepared for the State of California, Department of Public Works, Division of Highways, 1946.- 8 p.
96. ASTM D1561 - 92(2005)e1 Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California Kneading Compactor
97. AASHTO T 246 Standard Method of Test for Resistance to Deformation and Cohesion of Bituminous Mixtures by Means of Hveem Apparatus
98. McGennis R.B., Anderson R.M, Kennedy T.W., Solaimanian M. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Report Nr. FHWA-SA-95-003, Prepared for the Federal Highway Administration, Asphalt Institute, Lexington, USA 1995.-160p.
99. Imre Pap, Milorad Smiljanic, Uros Tatic Evaluation of Asphalt Mix Design Methods Within the Framework of SPENS Project // Proceedings of Transport Research Arena (TRA) conference. Slovenija, Ljubljana 21-24 April 2008.
100. VAS Latvijas Valsts ceļi [Elektroniskais resurss], 2009 - Ceļu specifikācijas 2010 - <http://www.lvceli.lv/LV/?i=107&DirID=42>. Resurss aprakstīts 2009. gada 15.maijs
101. Christensen W.D. Bonaquist R. Use of strength tests for evaluating the rut resistance of asphalt concrete Asphalt Paving Technology, Association of Asphalt Paving Technologists// Proceedings of the Technical Sessions, Vol – 71, 2002, pp 692-711.
102. LVS EN 12697-25:2006 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 25.daļa: Cilindriskās spiedes tests.
103. Federal Highway Administration. Highway Pavement Distress Identification Manual of Highway Conditions and Quality of Highway Construction Survey. – Washington DC. Departament of Transport 1979.
104. LVS EN 12697–22:2005. Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 22.daļa: Riteņu sliežu veidošanās tests

105. LVS EN 12697 – 33 Bituminētie maisījumi Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes. 33. daļa: Parauga sagatavošana ar veltņa blīvētāju
106. Lai, J.S. Evaluation of Rutting Characteristics of Asphalt Mixes Using Load Wheel Tester. Project No. 8609, Georgia Department of Transportation, December 1986.-186p.
107. American Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO) AASHTO Designation: TP 63-03 Determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)-2003
108. Aschenbrener T. Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot Mix Asphalt// Transportation Research Board 1492. - Washington D.C: Transportation Research Record, 1995.-193.-201.p
109. American Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO) AASHTO T 324, Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) 2004.
110. Bonnot J. Asphalt Agregate Mixtures// Transportation Research Record 1096, Transportation Research Board.-Washington D.C, 1986.- pp. 42.-51.
111. Linden F., Van der Heide J. Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties// Proceedings of The Association of Asphalt Paving Technologists Vol.56. MN Lino Lakes. 1987.- pp. 408.-426.
112. Kennedy T.W., Huber G.A., Harringan E.T., Cominsky R.J., Hughes C.S., Von Quintis H., Moulthrop J.S., Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program. Report Nr SHRP-A-410, Strategic Highway Research Programme, Washington 1994.
113. Kiryukhin G.N. Asphalt Mixture Design on the Criteria of Shear and Crack Resistance of the pavement// Proceedings of the ISAP 2002 - 9th International. conference on asphalt pavements Copenhagen, Denmark,. August 17–22, 2002
114. Latvijas Vides, Ģeoloģijas un Meteoroloģijas aģentūra [Elektroniskais resurss], 2008 - <http://www.meteo.lv/public/30116.html> – Resurss aprakstīts 2008. gada 20.decembris
115. Bačova K. Influence of traffic load on asphalt pavement structure// Proceedings of IIV International Conference Durable and Safe Road Pavement.- Kielce, Poland, 8-9 May 2001.-187.-192.p.
116. Pachowski J., Kraszewski C. Analysis of rules of road pavement destructive loads evaluation under road traffic// Proceedings of IIV International Conference Durable and Safe Road Pavement. - Kielce, Poland, 8-9 May 2001.-307.-315.p

117. Technical Circular TC01-04 Pavement Structure Design Guidelines. Ministry of Transportation. Geotechnical.- British Columbia: Materials, & Pavement Engineering, February 2004.- 18.p
118. AASHTO Guide For The Design of Pavement Structures. -Washington, D.C: American Association of State Highway & Transportation Officials, 1993 .- 640p.
119. Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. - New Jersey: Prentice-Hall A. Simon & Schuster Company, 1993.- 805p.
120. Sivapatham P. and Beckedahl H. J. Influence of The Compaction Degree of Asphalt on Rutting and Stiffness// Road Congress. Atlanta 2006.
121. Beckedahl H.J, Sivapatham P.A. Comparative Design Of Asphalt Pavement With Innovative And Conventional Binders. Proceedings of First International Conference on Transport Infrastructure ICTI 2008, Beijing, China , 24.-26. April 2008. p.151-161.
122. LVS EN 12697-26:2006 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 26.daļa: Stingums
123. LVS EN 12697-34:2004 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 34.daļa: Maršala tests
124. LVS EN 13108-1:2006 Bituminētie maisījumi. Materiāla specifikācijas. 1. daļa: Asfaltbetons
125. LVS EN 14023:2006 Bitumens un bitumena saistvielas. Pamatnoteikumi ar polimēriem modificēto bitumenu specifikēšanai
126. MK noteikumi Nr.181 Būvizstrādājumu atbilstības novērtēšanas kārtība reglamentētajā sfērā ar grozījumiem - MK noteikumi Nr.142. no 17.02.2009.
127. Standartizācijas, akreditācijas un metroloģijas centrs SIA: Akreditētās produktu sertifikācijas institūcijas/ internets.- <http://www.latak.lv/>.
128. LVS EN 13108-20:2009 Bituminēti maisījumi. Materiāla specifikācijas. 20. daļa: tipa testēšana.
129. LVS EN ISO/IEC 17025:2005 Testēšanas un kalibrēšanas laboratoriju kompetences vispārīgās prasības
130. LVS EN 13108-5:2006 Bituminētie maisījumi. Materiāla specifikācijas. 5. daļa: Šķembu-mastikas asfalts
131. LVS EN 12697-1:2002 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 1.daļa: Šķīstošās saistvielas saturs
132. LVS EN 12697-2:2003 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 2.daļa: Granulometriskā sastāva noteikšana

133. LVS EN 12697-8:2003 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 8.daļa: Bituminēto maisījumu paraugu poru īpašību noteikšana
134. LVS EN 12697-12:2005 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 12.daļa: Bituminēto paraugu ūdensjutības noteikšana
135. LVS EN 12697-23:2004 Bituminētie maisījumi - Karstā asfalta maisījuma testēšanas metodes - 23.daļa: Bituminēto maisījumu paraugu netiešās stiepes stiprības noteikšana.
136. LVS EN 13108-21:2006 Bituminētie maisījumi. Materiāla specifikācijas. 21.daļa: Ražošanas procesa kontrole.