



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

KELIŲ KATEDRA

Judita Gražulytė

**STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ  
BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI MODELIS**

**THE MODEL OF FROST RESISTANT BITUMEN USING IN ASPHALT  
MIXTURES RESISTANT TO STATIC LOADS**

Baigiamasis magistro darbas

Civilinės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H20002

Kelių specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS  
KELIŲ KATEDRA

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)  
Virgaudas Puodžiukas  
(Vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Data)

Judita Gražulytė

**STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ  
BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI MODELIS**

**THE MODEL OF FROST RESISTANT BITUMEN USING IN ASPHALT  
MIXTURES RESISTANT TO STATIC LOADS**

Baigiamasis magistro darbas

Civilinės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H20002

Kelių specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

**Vadovas**

doc. dr. Audrius Vaitkus  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

**Konsultantas**

\_\_\_\_\_  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

**Lietuvių kalbos konsultantas** lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(Parašas)

\_\_\_\_\_  
(Data)

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS  
KELIŲ KATEDRA

Statybos inžinerija studijų kryptis  
Civilinė inžinerija studijų programa, valstybinis kodas 621H20002  
Keliai specializacija

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO  
UŽDUOTIS**

.....Nr. ....  
Vilnius

Studentui (ei) *Juditai Gražulytei*

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: *Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis*

patvirtinta 201 3 m. lapkričio 21 d. dekanų potvarkiu Nr. 416 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201 5 m. gegužės 25 d.

**BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:**

*Išskirti statinių apkrovų poveikio zonas.*

*Apibūdinti statinių apkrovų poveikį asfalto dangos konstrukcijai.*

*Pateikti asfalto dangos funkcionavimo ypatumus.*

*Išanalizuoti užsienio šalyse taikomus metodus bitumo atsparumui šalčiui įvertinti.*

*Sukurti teorinį statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį.*

*Atlikti bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinį tyrimą.*

*Patikslinti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį.*

*Pateikti rekomendacijas bitumo parinkimui atsparumo šalčiui aspektu.*

*Atlikti ekonominio efekto skaičiavimą.*

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas .....  
(Paraša )

*doc. dr. Audrius Vaitkus* .....  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
Aplinkos inžinerijos fakultetas  
Kelių katedra

ISBN  
Egz. sk. ....  
Data .....-.....-..... ISSN

Antrosios pakopos studijų **Civilinės inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis**

Autorius **Judita Gražulytė**

Vadovas **doc. dr. Audrius Vaitkus**

**Kalba:** lietuvių

### **Anotacija**

Kelių tiesyboje vyrauja tendencija statinių apkrovų poveikio zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai taikyti kietesnius bitumus. Tačiau esant žemai temperatūrai tokie bitumai tampa per daug standūs ir lemia temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangose. Šis reiškinys itin dažnai stebimas Lietuvoje dėl vyraujančių šaltų žiemų. Užsienio šalių patirtis rodo, kad temperatūrinių plyšių susidarymas apribojamas bitumo parinkimo metu įvertinant jo atsparumą šalčiui. Todėl šiame baigiamajame magistro darbe siekiama sukurti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį. Šiam tikslui pasiekti darbe analizuojami užsienio šalyse taikomi metodai, įvertinantys bitumo atsparumą šalčiui, pateikiami reikalavimai asfalto mišinių ir jų komponentų charakteristikoms atsižvelgiant į atsparumą plastinėms deformacijoms ir temperatūriniams plyšiams. Remiantis atlikta analize darbe sukuriamas teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis, kuris patikslinamas atlikus bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinį tyrimą. Taip pat darbe pateikiamos rekomendacijos bitumo parinkimo algoritmui atsparumo šalčiui aspektu ir apskaičiuojamas statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo ekonominis efektas. Darbo apimtis – 95 puslapiai teksto be priedų, 40 paveikslų, 12 lentelių ir 1 priedas.

**Prasminiai žodžiai:** atsparumas šalčiui, bitumas, lenkiamo strypelio reometras, lenkimo standis, lenkimo standžio kitimo rodiklis, modelis, statinės apkrovos, temperatūriniai plyšiai.

Vilnius Gediminas Technical University  
Faculty of Environmental Engineering  
Department of Roads

ISBN \_\_\_\_\_ ISSN \_\_\_\_\_  
Copies No. ....  
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Civil Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title **The Model of Frost Resistant Bitumen Using in Asphalt Mixtures Resistant to Static Loads**

Author **Judita Gražulytė**

Academic supervisor **Assoc Prof Dr Audrius Vaitkus**

**Thesis**  
**language:** Lithuanian

### Annotation

In manufacture of asphalt mixtures resistant to static loads is the tendency to use harder bitumen. However, at low temperature it becomes too stiff and results in thermal cracking. It is noted that in Lithuania is severe winter, so this kind of phenomenon is often observed. The practice of foreign countries shows that the selection of bitumen evaluating its resistance to frost restricts thermal cracking. Consequently, the aim of this master thesis is to create the model of frost resistant bitumen using in asphalt mixtures resistant to static loads. In order to implement this aim, there is analyzed methods, which are used in foreign countries to evaluate bitumen sensitivity to frost, and requirements for asphalt mixture and its component considering to resistance to plastic deformation and thermal cracking. There is introduced the theoretical model of frost resistant bitumen using in asphalt mixtures resistant to static loads which is corrected after experimental research. In this master thesis are recommendations for algorithm of bitumen selection evaluating its resistance to frost. Besides, there is calculated the economic effect of use of the model of frost resistant bitumen using in asphalt mixtures resistant to static loads. This master thesis includes 95 pages, 40 figures, 12 tables and 1 appendix.

**Keywords:** bending beam rheometer, bitumen, flexural creep stiffness, model, m-value, resistance to frost, static load, thermal cracking

**(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)**

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

Judita Gražulytė, 20093025

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Civilinė inžinerija, KmF-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)  
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis“ patvirtintas 2013 m. lapkričio 21 d. dekanų potvarkiu Nr. 416ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė. Mano darbo vadovas doc. dr. Audrius Vaitkus.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Judita Gražulytė

(Vardas ir pavardė)

# Turinys

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ŽYMENYS IR SUTRUMPINIMAI.....                                                                                                                             | 8  |
| TERMINAI .....                                                                                                                                            | 9  |
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....                                                                                                                                   | 11 |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS.....                                                                                                                                     | 13 |
| ĮVADAS .....                                                                                                                                              | 14 |
| 1. STATINIŲ APKROVŲ POVEIKIS ASFALTO DANGOS KONSTRUKCIJAI .....                                                                                           | 15 |
| 1.1. Statinių apkrovų poveikio zonos - statinių rūšys .....                                                                                               | 15 |
| 1.2. Statinės apkrovos ir asfalto dangos konstrukcijos samprata .....                                                                                     | 23 |
| 1.3. Asfalto dangos funkcionavimo ypatumai.....                                                                                                           | 26 |
| 1.4. Darbo tikslas ir uždaviniai.....                                                                                                                     | 30 |
| 2. TEORINIS STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI MODELIS .....                                                           | 31 |
| 2.1. Užsienio šalyse taikomi metodai, įvertinantys bitumo atsparumą šalčiui.....                                                                          | 31 |
| 2.2. Reikalavimai asfalto mišinių ir jų komponentų charakteristikoms atsižvelgiant į atsparumą plastinėms deformacijoms ir temperatūriniais plyšiams..... | 43 |
| 2.3. Teorinis bitumo atsparumo šalčiui modelis.....                                                                                                       | 49 |
| 2.4. Antrojo skyriaus išvados .....                                                                                                                       | 52 |
| 3. BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI EKSPERIMENTINIS TYRIMAS .....                                                                                                 | 53 |
| 3.1. Tyrimo objektas ir metodika .....                                                                                                                    | 53 |
| 3.2. Tyrimui naudota įranga ir jos specifi­ka.....                                                                                                        | 55 |
| 3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai ir vertinimas.....                                                                                                 | 58 |
| 3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....                                                                                                                      | 66 |
| 4. STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ BITUMO PARINKIMO REKOMENDACIJOS ĮVERTINANT ATSPARUMĄ ŠALČIUI.....                                         | 67 |
| 4.1. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis .....                                                                  | 67 |
| 4.2. Rekomendacijos bitumo parinkimo algoritmui .....                                                                                                     | 69 |
| 4.3. Ekonominio efekto skaičiavimai .....                                                                                                                 | 73 |
| 4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados .....                                                                                                                    | 82 |
| BENDROSIOS IŠVADOS.....                                                                                                                                   | 84 |
| AUTORIAUS PUBLIKACIJOS .....                                                                                                                              | 86 |
| LITERATŪRA .....                                                                                                                                          | 87 |
| PRIEDAI .....                                                                                                                                             | 96 |
| A priedas. Kritinės temperatūros nustatymas.....                                                                                                          | 97 |

## ŽYMENYS IR SUTRUMPINIMAI

|                            |                                                                                       |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>AASHTO</i>              | – Amerikos kelių ir transporto asociacija                                             |
| <i>ABCD</i>                | – bitumo plyšio formavimosi prietaisas                                                |
| <i>AC</i>                  | – asfaltbetonis                                                                       |
| <i>BBR</i>                 | – lenkiamo strypelio reometras                                                        |
| <i>DENT</i>                | – abiejose pusėse (apačioje ir viršuje) įpjauto kūno lenkimas                         |
| <i>DTT</i>                 | – tiesioginio tempimo bandymas                                                        |
| <i>G(7200)</i>             | – šlyties įtempimų relaksacijos modulis praėjus 7200 s nuo bandinio šliejimo pradžios |
| <i>G<sub>f</sub></i>       | – irimo energija, J                                                                   |
| <i>G<sub>IC</sub></i>      | – tiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitis, N/m                             |
| <i>J<sub>IC</sub></i>      | – netiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitis, N/m                           |
| <i>J<sub>VC</sub></i>      | – pseudo-deformavimosi energijos atidavimo greitis, N/m                               |
| <i>K<sub>1C</sub></i>      | – irimo tūsumas, Pa·m <sup>0,5</sup>                                                  |
| <i>KOSIS</i>               | – kelių oro sąlygų informacinės sistema                                               |
| <i>KPPP</i>                | – kelių priežiūros ir plėtros programa                                                |
| <i>m(60)</i>               | – lenkimo standžio kitimo rodiklis praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios       |
| <i>m<sub>r</sub>(7200)</i> | – tariamasis relaksacijos greitis praėjus 7200 s nuo bandinio šliejimo pradžios       |
| <i>PAV</i>                 | – pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį indą                           |
| <i>PG</i>                  | – bitumo eksploatacinių charakteristik reikalavimai                                   |
| <i>PMB</i>                 | – polimerias modifikuotas bitumas                                                     |
| <i>RTFOT</i>               | – atsparumo kietėjimui metodas, kuris imituoja trumpalaikį bitumo senėjimo procesą    |
| <i>S(60)</i>               | – lenkimo standis praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios, MPa                   |
| <i>SENB</i>                | – vienoje pusėje (apačioje) įpjauto kūno lenkimas                                     |
| <i>SHRP</i>                | – Strateginė kelių tyrimo programa                                                    |
| <i>SMA</i>                 | – skaldos ir mastikos asfaltas                                                        |
| <i>T</i>                   | – bandymo temperatūra, °C                                                             |
| <i>T<sub>cr</sub></i>      | – kritinė temperatūra, °C                                                             |

## TERMINAI

**Bitumas** (angl. *bitumen* arba amer. *asphalt*) – klampi arba pusiau kieta, nelaki, rišlioji, nelaidi vandeniui organinė medžiaga, gaunama perdirbant natūralią naftą arba išgaunant natūraliuoju būdu.

**Dinaminė klampa** (angl. *dynamic viscosity*) – santykis tarp šlyties įtempių ir skysčio tekėjimo greičio gradiento.

**Trumpalaikis senėjimas** (angl. *short-term aging*) – tai bitumo senėjimas maišymo ir asfalto klojimo metu.

**Ilgalaikis senėjimas** (angl. *long-term aging*) – tai bitumo senėjimas per visą kelio eksploatacinį laikotarpį.

**Kritinė temperatūra** (angl. *critical temperature*) – tai temperatūra, kuriai esant pasiekiamos ribinės bitumo jautrumą šalčiui apibrėžiančios sąlygos.

**Liekamosios deformacijos** (angl. *permanent deformation*) – dangos struktūros pažeida – įspauda, susidariusi dėl išorinių apkrovos ir klimatinių veiksnių poveikio kelio naudojimo metu.

**Temperatūriniai plyšiai** (angl. *thermal crack*) – dangos struktūros pažeida – plyšys, susidariusi dėl žemų temperatūrų poveikio kelio naudojimo metu.

**Temperatūriniai įtempiai** (angl. *thermal stress*) – medžiagos įtempiai dėl temperatūros pokyčio.

**Irimo tūsumas** (angl. *fracture toughness*) – medžiagos rodiklis, kiekybiškai apibūdinantis medžiagos savybę priešintis plyšio plitimui arba trapiajam suirimui. Tai kritinis įtempių būvis plyšio viršūnėje.

**Irimo energija** (angl. *fracture energy*) – energijos kiekis, sunaudojamas medžiagos dalelėms vieną nuo kitos atplėšti.

**Tiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitis** (angl. *linear strain energy release rate*) – atiduodamos energijos kiekis kūno irimo metu per naujai susidariusį irimo ploto vienetą nagrinėjant tiesiškai tampriai deformuojamas medžiagas.

**Netiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitis** (angl. *non-linear strain energy release rate*) – atiduodamos energijos kiekis kūno irimo metu per naujai susidariusį irimo ploto vienetą nagrinėjant netiesiškai (tampriai–plastiškai) deformuojamas medžiagas.

**Pseudo-deformavimosi energijos atidavimo greitis** (angl. *pseudo-strain energy release rate*) – atiduodamos energijos kiekis kūno irimo metu per naujai susidariusį irimo ploto vienetą nagrinėjant tiesiškai klampiai–plastiškai deformuojamas medžiagas atsižvelgiant į deformavimosi laiką.

**Statinė apkrova** (angl. *static load*) – apkrova, kurios veikimo kryptis, dydis ir pridėties taško koordinatės yra pastovios ir ją sukeliantis šaltinis neįgyja pastebimų pagreičių.

**Asfalto mišinys** (angl. *asphalt mixture*) – bituminis mišinys, susidedantis iš mikroužpildo, smulkiosios bei stambiosios mineralinės medžiagos ir rišiklio – bitumo. Prireikus gali būti dedama priedų.

**Asfaltbetonis** (angl. *asphalt concrete*) – asfalto mišinys, kuris turi tolydžią mineralinių medžiagų mišinio granuliometrinę sudėtį.

**Skaldos ir mastikos asfaltas** (angl. *stone and mastic asphalt*) – asfalto mišinys, kuris turi netolydžią mineralinių medžiagų mišinio granuliometrinę sudėtį ir rišiklį stabilizuojančių priedų.

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 pav. Statinės apkrovas perduodantys apkrovos šaltiniai .....                                                                                                             | 16 |
| 1.2 pav. Liekamosios deformacijos statinių apkrovų poveikio zonose .....                                                                                                     | 21 |
| 1.3 pav. Temperatūrinis plyšys.....                                                                                                                                          | 21 |
| 1.4 pav. Kūnų deformavimasis, kai kūnas pasižymi: a) tampriomis savybėmis; b) klampiomis savybėmis; c) klampiomis-tampriomis savybėmis .....                                 | 26 |
| 1.5 pav. Dangos deformavimosi nuo ciklinės, statinės apkrovos poveikio schema.....                                                                                           | 26 |
| 2.1 pav. Fraso prietaiso principinė schema a) bandinys su plokšte prieš lenkimą; b) bandinys su plokšte lenkimo momentu .....                                                | 32 |
| 2.2 pav. Bandinio įtrūkimas.....                                                                                                                                             | 32 |
| 2.3 pav. Bandymo lenkiamu strypelio reometru principinė schema .....                                                                                                         | 33 |
| 2.4 pav. Tiesioginio tempimo bandymui paruošas specialios formos bandinys .....                                                                                              | 35 |
| 2.5 pav. Kritinės temperatūros nustatymas pagal bandinio irimo pradžios deformacijas .....                                                                                   | 35 |
| 2.6 pav. Kritinės temperatūros nustatymo pagal lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu gautus bandymų rezultatus principas .....                        | 36 |
| 2.7 pav. Kritinės temperatūros nustatymas pagal bandinio įlinkį veikiant didžiausiai apkrovai ..                                                                             | 37 |
| 2.8 pav. Lenkiamo strypelio reometru naudotini įpjauti bandiniai: a) bitumo ir metalinės sijelės nepakankamo sukibimo (adhezijos) pavyzdys; b) pasiūlyta bandinių forma..... | 38 |
| 2.9 pav. Tiesioginio tempimo bandymui naudojami įpjauti bandiniai a) bandinys formoje; b) bandinys tiesioginio tempimo prietaise .....                                       | 39 |
| 2.10 pav. Kritinės temperatūros nustatymas pagal deformacijos šuolį .....                                                                                                    | 40 |
| 2.11 pav. Kritinės temperatūros priklausomybė nuo polimerų kiekio .....                                                                                                      | 41 |
| 2.12 pav. Teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis .....                                                                       | 50 |
| 2.13 pav. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių atsparumas rato riedėjimui.....                                                                                       | 52 |
| 3.1 pav. Kritinės temperatūros nustatymo principas .....                                                                                                                     | 55 |
| 3.2 pav. Bitumo penetracijos esant 25 C temperatūrai nustatymas: a) penetrometras PNR 10; b) adatos padėtis bandymo pradžioje .....                                          | 56 |
| 3.3 pav. Minkštėjimo temperatūros nustatymas: a) minkštėjimo temperatūros nustatymo prietaisas RKA 2 b) bandinio ištįsimas iki apatinės rėmelio plokštelės .....             | 56 |
| 3.4 pav. Dinaminės klampos nustatymas: a) sukusis klampomatis Brookfield DV-III Ultra b) cilindrinis antgalis Nr. 21.....                                                    | 56 |
| 3.5 pav. Tampriosios atstatos nustatymas (Duktilometras).....                                                                                                                | 57 |

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6 pav. Lenkimo standžio ir lenkimo standžio kitimo rodiklio nustatymas a) lenkiamo strypelio reometras CANNON; b) sijelės lenkimas .....                                              | 57 |
| 3.7 pav. Penetracijos, esant 25 ° C temperatūrai, bandymo rezultatai .....                                                                                                              | 58 |
| 3.8 pav. Minkštėjimo temperatūros bandymo rezultatai .....                                                                                                                              | 59 |
| 3.9 pav. Dinaminės klampos bandymo rezultatai.....                                                                                                                                      | 60 |
| 3.10 pav. Tampriosios atstatos bandymo rezultatai.....                                                                                                                                  | 60 |
| 3.11 pav. Lenkimo standžio, praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios, kitimas priklausomai nuo bandymo temperatūros .....                                                           | 61 |
| 3.12 pav. Lenkimo standžio kitimo rodiklio, praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios, kitimas priklausomai nuo bandymo temperatūros .....                                           | 61 |
| 3.13 pav. Penetracijos rodiklio rezultatai .....                                                                                                                                        | 62 |
| 3.14 pav. Kritinė temperatūra nustatyta pagal lenkimo standžio $S(60)$ ir lenkimo standžio kitimo rodiklio $m(60)$ ribines sąlygas.....                                                 | 63 |
| 3.15 pav. Kritinė temperatūra, tenkinanti lenkimo standžio $S(60) \leq 300$ MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklio $m(60) \geq 0,3$ sąlygas .....                                      | 64 |
| 4.1 pav. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis .....                                                                                            | 68 |
| 4.2 pav. Tirtųjų bitumų išsidėstymas patikslintos kritinės temperatūros ir minkštėjimo temperatūros atžvilgiu .....                                                                     | 70 |
| 4.3 pav. Bitumo atsparumo šalčiui žemėlapis .....                                                                                                                                       | 72 |
| 4.4 pav. Logistikos terminale taikytina dangos konstrukcija: a) neįvertinant bitumo atsparumo šalčiui; b) įvertinant bitumo atsparumą šalčiui.....                                      | 74 |
| 4.5 pav. Plyšių užtaisymo grafikas .....                                                                                                                                                | 76 |
| 4.6 pav. Magistraliniuose keliuose taikytina SV dangos konstrukcijos klasės dangos konstrukcija: a) neįvertinant bitumo atsparumo šalčiui; b) įvertinant bitumo atsparumą šalčiui ..... | 77 |
| 4.7 pav. Plyšių užtaisymo grafikas .....                                                                                                                                                | 79 |

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 lentelė. Statinių apkrovų specifiškumas priklausomai nuo apkrovos šaltinio tipo.....                                                                                               | 19 |
| 1.2 lentelė. Asfalto dangos konstrukcijoje pastebimos pažaidos.....                                                                                                                    | 20 |
| 1.3 lentelė. Nestandžiosios ir standžiosios dangos konstrukcijos palyginimas.....                                                                                                      | 25 |
| 1.4 lentelė. Temperatūrinių plyšių užtaisymui taikytino metodo pasirinkimas.....                                                                                                       | 29 |
| 2.1 lentelė. Bitumo charakteristikoms nustatyti taikomi standartai.....                                                                                                                | 51 |
| 3.1 lentelė. Tirtųjų bitumų patikslinta kritinė temperatūra ir nustatyta žemiausia PG<br>temperatūra .....                                                                             | 65 |
| 3.2 lentelė. Atsparumo šalčiui aspektu išreitinguotieji bitumai .....                                                                                                                  | 65 |
| 4.1 lentelė. Tirtųjų bitumų tinkamumas asfalto mišinio gamybai priklausomai nuo žemiausios<br>dangos temperatūros .....                                                                | 71 |
| 4.2 lentelė. 5000 m <sup>2</sup> ploto logistikos terminalo kaštai temperatūrinių plyšių užtaisymui.....                                                                               | 76 |
| 4.3 lentelė. Magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių kelio temperatūrinių<br>plyšių, susidarančių 1-ame kilometre, užtaisymo kaštai 20-ies metų laikotarpyje..... | 80 |
| 4.4 lentelė. 20-ies metų laikotarpyje rekonstruojamuose magistraliniuose keliuose susidariusių<br>temperatūrinių plyšių užtaisymo grafiko matrica .....                                | 81 |
| 4.5 lentelė. Rekonstruotinių magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių kelių<br>temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai 20-ies metų laikotarpyje .....               | 82 |

## IVADAS

Specifinių susisiekimo komunikacijų statinių – aerodromų peronų, orlaivių stovėjimo aikštelių, jūrų uostų krantinių ir terminalų, logistikos terminalų, įvairių krovinių sandėliavimo aikštelių/terminalų, automobilių stovėjimo aikštelių – zonose vyrauja statinės apkrovos, sąlygojančios spartesnę asfalto dangos degradaciją, dažniausiai pasireškančią plastinių deformacijų susidarymu. Todėl šiose zonose taikytini specialūs statinėms apkrovoms atsparūs asfalto mišiniai, kurių gamybai įprastai naudojami kietesni bitumai. Pabrėžtina, kad Lietuvoje žiemos laikotarpiu asfalto dangos konstrukcijos paviršiaus temperatūra siekia mažiau kaip  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esant tokiai žemai temperatūrai pastarieji bitumai tampa per daug standūs (trapūs) ir lemia temperatūrinių plyšių susidarymą asfalto dangoje.

Užsienio šalių patirtis rodo, kad temperatūrinių plyšių susidarymas asfalto dangose apribojamas asfalto mišinio gamybai taikytino bitumo parinkimo metu įvertinant bitumo atsparumą šalčiui. Lietuvoje apie bitumo atsparumą šalčiui sprendžiama nustatant jo trapumo temperatūrą pagal Frasą. Deja, pastaroji nepakankamai tiksliai reprezentuoja faktinę bitumo elgseną kelyje esant žemai temperatūrai. Todėl šio darbo tikslas yra sudaryti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį, t. y. pateikti metodiką, kuria remiantis asfalto mišinio gamybai parinktas bitumas užtikrintų asfalto dangos atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui.

Darbo tikslui pasiekti yra suformuluoti septyni darbo uždaviniai. Eksperimentinis tyrimas apima 11-a skirtingos rūšies bitumų: 5 – kelių bitumai (20/30, 35/50, 50/70, 100/150), 4 – polimerais modifikuoti bitumai (PMB 10/40–65, PMB 25/55–60, PMB 45/80–55, PMB 45/80–65) ir 2 – gausiai polimerais modifikuoti bitumai (PMB 25/55–80 HiMA ir PMB 45/80–80 HiMA). Darbe taikyti fizikinių tyrimų metodai (fizikinių charakteristikų nustatymui) mechaninių tyrimų metodai (mechaninių charakteristikų nustatymui). Taip pat buvo naudojami teoriniai ir eksperimentiniai laboratoriniai tyrimų metodai bei ekonominio skaičiavimo metodika. Prieš atliekant eksperimentinį bitumo atsparumo šalčiui tyrimą išanalizuota užsienio šalių patirtis vertinant bitumo atsparumą šalčiui ir sukurtas teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis. Atlikus bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinį tyrimą patikslintas statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis, pateiktos rekomendacijos bitumo parinkimo algoritmui ir apskaičiuotas modelio taikymo ekonominis efektas.

# **1. STATINIŲ APKROVŲ POVEIKIS ASFALTO DANGOS KONSTRUKCIJAI**

Pastarąjį dešimtmetį bendras gyventojų skaičius Žemėje kasmet padidėja apie 1,2 % (The World... 2013). Toks nuolatinis gyventojų skaičiaus didėjimas lemia intensyvią urbanizaciją, t. y. skatina žaliavų, maisto, įvairių pramonės gaminių ir kitų krovinių bei keleivių vežimų didėjimą. Remiantis Lietuvos statistikos departamento pateikiamais duomenimis 2013 metais bendras krovinių vežimas visų rūšių transportu Lietuvoje išaugo apie 16 % palyginti su 2009 metais, kuomet bendras krovinių vežimas visų rūšių transportu dešimties metų laikotarpyje siekė mažiausią vertę (105845,6 tūkst. t.). Analizuojant krovinių vežimo apimtys kitimo tendencijas skirtingais transportavimo būdais nustatyta, kad vežimo apimtys kelių transportu padidėjo 17 %, geležinkelių transportu – 18 %, o oro transportu sumažėjo net 96 %. Tačiau pabrėžtina, kad Lietuvos Klaipėdos uoste ir Būtingės terminale perkrautų krovinių apimtis per pastaruosius dešimt metų išaugo net 59 %. Be to vis labiau populiarėja multimodalinis ir intermodalinis krovinių gabenimas. Todėl vis svarbesnis tampa krovinių perkrovimas, transportavimas nuo vieno transporto priemonės tipo prie kito, tų krovinių sandėliavimas ir t. t.

Pastarųjų procesų metu, ypač sandėliuojant, dangos konstrukcija veikiama statinėmis apkrovomis, kurias perduoda sandėliuojami kroviniai ir/arba transportavimo ir krovos darbus atliekanti įranga. Dėl apkrovos specifiškumo tokių apkrovos šaltinių dangai sukeltas poveikis ir dangos konstrukcijos degradacijos procesas ženkliai skiriasi nuo automobilių keliuose vyraujančio apkrovų poveikio ir dangos konstrukcijos degradacijos pobūdžio. Todėl siekiant kuo ekonomiškiau ir efektyviau patenkinti augančius visuomenės poreikius būtina imtis papildomų priemonių, užtikrinančių pageidaujamą dangos konstrukcijos eksploataciją statinių apkrovų poveikio zonose.

## **1.1. Statinių apkrovų poveikio zonos – statinių rūšys**

Statinės apkrovos vyrauja tam tikruose, specifiniuose susisiekimo komunikacijų statiniuose. Atsižvelgiant į statines apkrovas perduodančius apkrovos šaltinius (1.1 pav.) išskirtinos penkios pagrindinės statinių apkrovų poveikio zonos:

- aerodromų peronai ir orlaivių stovėjimo aikštelės;
- jūrų uostų krantinės ir terminalai;
- logistikos terminalai;
- įvairių krovinių sandėliavimo aikštelės/terminalai;
- automobilių stovėjimo aikštelės.

Aerodromų peronuose atliekamas keleivių įlaipinamas/išlaipinimas, pašto ir krovinių krovimas/iškrovimas, orlaivių pripildymas degalais, techninės priežiūros apžiūra ir kiti darbai. Net esant nepakrautam orlaiviui, jo bendroji masė yra apie 2-7 kartus didesnė nei maksimaliai pakrauto sunkvežimio bendroji masė (dažniausiai leidžiama maksimali sunkvežimio bendroji masė 40 t). Orlaivių padangomis perduodamas slėgis priklauso nuo orlaivio modelio (ypač nuo važiuoklės konfigūracijos ir ratų išdėstymo schemos) bei krovinių masės. Įprastai orlaivio padangos ir dangos sąlyčio plote fiksuojamas slėgis nuo 0,3 MPa iki 1,7 MPa.

Jūrų uostų krantinėse ir terminaluose atliekami didelio masto įvairūs krovos ir sandėliavimo darbai. Priklausomai nuo atliekamų krovos darbų rūšies ir krovinių tipo uostuose įrengiamos specializuotos krantinės ir terminalai. Pavyzdžiui, generaliniams kroviniams (įvairiems supakuotiems kroviniams, transporto priemonėms, metalo gaminiams, medžių rąstams) krauti ir sandėliuoti įrengiami generalinių krovinių terminalai, konteineriams – konteinerių terminalai, biriems kroviniams (geležies rūdai, grūdams, druskai ir kitoms nesupakuotoms birioms prekėms) – biriųjų krovinių terminalai, naftos produktams – naftos terminalai ir t. t. Kiekviename terminale, priklausomai nuo krovinių rūšies ir supakavimo būdo, atliekamiems krovos ir transportavimo darbams naudojama specializuota įranga, t. y. portaliniai kranai, mobilieji kranai, tiltiniai perkrautuvai, vilkikai su prikabinamomis priekabomis, automobiliniai krautuvai, krautuvai su šakėmis, biriųjų ir skystųjų krovinių pakrovimo mašinos ir kt. (Skerys, Christauskas 2010).



**1.1 pav.** Statines apkrovas perduodantys apkrovos šaltiniai

Konteinerių terminaluose dangos konstrukcijai perduodamos ženkliai didesnės apkrovos nei automobilių keliuose, nes konteineriai sandėliuojami statant juos vieną ant kito. Tačiau toks sandėliavimo sprendinys sutaupo konteineriais užimamą jūros uosto teritorijos plotą. Pabrėžtina, kad konteinerių apkrovos perduodamos tik per atramas („kojas“), kurios įrengiamos kiekviename konteinerio krašte taip, kad konteineris šiek tiek (dažniausiai 12,5 mm) „pasikeltų“ nuo atraminės plokštumos. Šios atramos yra 118 mm aukščio, 162 mm pločio ir 178 mm ilgio (Knapton 2007). Konteinerio atramoms „įsmigus“ daugiau kaip 12 mm į dangos paviršių apkrova perduodama visu konteinerio pado plotu (Balay ir kt. 2014). Įrengus konteinerio atramas, jos sąlyginai atskiria konteinerius ir jie nesiliečia visu dugno/viršaus plotu vienas prie kito. Dėl to žymiai palengvėja krovos darbai, kas lemia mažesnes laiko sąnaudas.

Praktikoje dažniausiai naudojami 6 m, 9 m ir 12 m ilgio konteineriai. Pagal standartą *ISO 668 „Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings“* 12 m ilgio pakrautas konteineris negali viršyti 30,48 t, o 6 m – 24,00 t. Tokio tipo nepakrauti konteineriai atitinkamai sveria apie 3,7 t ir 2,3 t. Stebima tendencija, kad apie 95% pakrautų konteinerių sveria mažiau kaip 23 t (Knapton 2007).

DIN/ISO standartuose nurodyti reikalavimai konteinerių statymui aukštais. Numatyta, kad konteinerių terminaluose ISO konteinerius turi būti galima sustatyti bent šešiais aukštais, t. y. konteineriai turi būti suprojektuoti taip, kad juos maksimaliai pakrovus būtų galima statyti mažiausiai šešiais aukštais. Kiekvienas konteineris privalo turėti Tarptautinės konvencijos dėl saugių konteinerių (*angl.* International Convention for Safe Containers (CSC)) lentelę, kurioje nurodomas maksimalus pavienio konteinerio ir jo atlaikomos konteinerių krūvos svoris. Dažniausiai pilnai pakrauti ISO konteineriai statomi šešiais aukštais, o tušti – aštuoniais. Praktikoje kartais taikomi modernūs konteineriai, kurie net pakrauti statomi aštuoniais ar devyniais aukštais (tam tikrais atvejais net dvylika aukštų). Tokiu atveju ant konteinerių tvirtinamos specialios lentelės, kuriose nurodoma bandymais patikrinta maksimali konteinerių bendroji masė, priklausomai nuo konteinerių aukštų skaičiaus (Container... 2013).

Logistikos terminaluose atliekami krovos darbai, kurie organizuojami taip, kad pakrauti/iškrauti sunkvežimiai nedelsiant atlaisvintų krovos vietą kitam (laukiančiam) sunkvežimiui. Pastarasis, pakeitęs ankstesniąją transporto priemonę, toliau veikia dangos konstrukciją ir ją deformuoja neleidamas „atsistatyti“. Sunkiųjų transporto priemonių, kurių bendroji masė vyrauja nuo 24 t iki 40 t, padangos slėgis į dangą kinta nuo 0,6 MPa iki 1,0 MPa.

Įvairių krovinių sandėliavimo aikštelėse kroviniai sandėliuojami naudojant plokščiuosius krovinių padėklus, kurie statomi vienas ant kito iki 4 aukštų, o atliekant transportavimą – iki 2 aukštų. Europoje plačiai eksploatuojami vadinamieji europadėklai (*angl.* EuroPallet), kurių plotis – 800 mm, ilgis – 1200 mm, aukštis – 144 mm, tačiau galimi ir kitokie šio tipo padėklų matmenų

variantai. Lietuvoje gaminamiems ir naudojamiems padėklų matmenims keliami reikalavimai nurodyti standarte *LST EN 13382 „Plokštieji krovinių padėklai. Pagrindiniai matmenys“*. Atsižvelgiant į krovinio matmenis, konfigūraciją, sandėliavimo sąlygas ir remiantis standarto *LST EN ISO 8611–3 „Krovinių padėklai. Plokštieji padėklai. 3 dalis. Didžiausios darbinės apkrovos“* reikalavimais, yra nustatyti tokie leistini europadėklų apkrovos dydžiai:

- 1000 kg nominali apkrova, kai krovinio svoris bet kaip paskirstytas ant padėklo plokštumos;
- 1500 kg apkrova, kai svoris ant plokštumos paskirstytas tolygiai;
- 2000 kg apkrova, kai kompaktiškas krovinsys tolygiai paskirstytas ant viso ploto plokštumos;
- kraunant padėklus rietuvėje vieną ant kito, papildoma maksimali statinė apkrova apatiniam padėklui gali būti iki 4000 kg, jeigu padėklas yra ant lygaus, horizontaliai nejudančio pagrindo ir apkrova tolygiai paskirstyta visai padėklo plokštumai.

Apkrovų poveikis krovinių sandėliavimo aikštelės dangai pasireiškia per padėklo ir dangos sąlyčio plotą, kurį sudaro ne visas padėklo plokštumos plotas, bet trys stačiakampės atramos (esant EUR 1 padėklo tipui padėklo atramą sudaro trys stačiakampiai, vienas nuo kito nutolę per 227,5 mm; kraštinių stačiakampių plotis – 100 mm, ilgis – 1200 mm, o vidurinio stačiakampio plotis – 145 mm ir ilgis – 1200 mm). Krovinių sandėliavimo aikštelių dangos taip pat veikiamos krovimo darbus atliekančių krautuvų apkrovomis.

Automobilių stovėjimo aikštelėse transporto priemonių judėjimo greitis – minimalus arba jos iš viso nejuda. Dėl griežtai apibrėžtų stovėjimo zonų dangos konstrukcijai perduodamos apkrovos tose pačiose vietose. Esant dideliame automobilių stovėjimo aikštelės užimtumui dangos konstrukcija praktiškai „neatsistato“. Apkrovos dangai perduodamos padangos ir dangos sąlyčio plotu, kuris priklauso nuo padangos tipo, slėgio padangoje, apkrovos dydžio ir kt. Lengvųjų automobilių padangos slėgis į dangą yra apie 0,2 MPa.

Apibendrinant galima pasakyti, kad visur kur nevyksta transporto priemonių dinaminis judėjimas arba jo poveikis yra sąlyginai nežymus, t. y. aerodromų peronuose, orlaivių stovėjimo aikštelėse, jūrų uostų krantinėse ir terminaluose, logistikos terminaluose, įvairių krovinių sandėliavimo aikštelėse/terminaluose, automobilių stovėjimo aikštelėse ir pan., dangos konstrukcija yra veikiamą statinėmis apkrovomis, kurių veikimo pobūdis naudojamai dangai yra sąlyginai vienodas, tačiau ženkliai skiriasi apkrovos charakteristikos (apkrovos dydis, apkrovos atramos ir dangos sąlyčio plotas, slėgis į dangą apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote ir pan.). 1.1 lentelėje pateikiami susisteminti duomenys apie statinių apkrovų specifiskumą priklausomai nuo apkrovos šaltinio tipo.

Statinių apkrovų poveikio zonose kaip ir automobilių keliuose vyrauja nestandžiosios (asfalto) dangos konstrukcijos. Jungtinėse Amerikos valstijose apie 85 % oro uostų riedėjimo takų ir automobilių stovėjimo aikštelių dangos konstrukcijos įrengtos panaudojant asfalto dangas (National... 2011). Dėl apkrovų ir/arba klimatinų veiksnių poveikio kintant dangos konstrukcijos charakteristikoms asfalto dangoje formuojasi pažaidos (1.2 lentelė). Statinių apkrovų poveikio zonose dėl ilgalaikio apkrovimo (net iki kelių parų) ir dangai tenkančio didelio slėgio (net iki 40 MPa) bei plačiam diapazone kintančios dangos temperatūros (nuo -30 °C iki +60 °C) svarbiausiomis pažaidomis laikomos liekamosios deformacijos (1.2 pav.) ir temperatūriniai plyšiai (1.3 pav.).

**1.1 lentelė.** Statinių apkrovų specifiškumas priklausomai nuo apkrovos šaltinio tipo (International... 1983; Knapton, Smith 1997; European... 2001; Knapton 2007; Moffatt... 2009)

| Apkrovos šaltinio tipas                                                           | Apkrovos atramos ir dangos sąlyčio plotas, mm <sup>2</sup> | Maksimalus objektų skaičius kraunant rietuvėje vieną ant kito | Slėgis apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote, MPa |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Lėktuvas                                                                          | a)                                                         | —                                                             | 0,3-1,7 <sup>b)</sup>                                         |
| Uostuose eksploatuojama įranga krovos ir transportavimo darbams atlikti           | a)                                                         | —                                                             | 0,7-1,7                                                       |
| Konteineris                                                                       | 26250 <sup>c)</sup>                                        | 6-8 (12) <sup>d)</sup>                                        | 2,6-12,5 <sup>e)</sup>                                        |
| Sunkiasvorė transporto priemonė                                                   | a)                                                         | —                                                             | 0,6-1,0                                                       |
| Priekaba, vežimėlis-platforma su mažais ratukais                                  | 8800                                                       | —                                                             | 35-40                                                         |
| Priekaba atkabinta nuo vilkiko ir atremta su atramomis                            | 33750                                                      | —                                                             | 2,0                                                           |
| Pramonės vietovėse eksploatuojama įranga krovos ir transportavimo darbams atlikti | a)                                                         | —                                                             | 0,5-1,0                                                       |
| Euro padėklas (EUR 1)                                                             | 120000 <sup>f)</sup>                                       | 2-4 <sup>g)</sup>                                             | 0,01-0,03 <sup>h)</sup>                                       |
| Lengvasis automobilis                                                             | a)                                                         | —                                                             | 0,20-0,25                                                     |

a) Apkrovos šaltinio atrama – ratas. Padangos ir dangos sąlyčio plotas priklauso nuo padangos charakteristikų.

b) Slėgis apkrovos šaltinio atramos (rato) ir dangos sąlyčio plote priklauso nuo lėktuvo tipo.

c) Faktinis konteinerio atramos ir dangos sąlyčio plotas yra 22000 mm<sup>2</sup>, tačiau skaičiavimuose neatsižvelgiama į konteinerio atramoje esančią tuštumą (priimama, kad atrama – vientisas stačiakampis, kurio matmenys 178 mm x 162 mm).

d) Pilnai pakrauti konteineriai įprastai kraunami rietuvėje vienas ant kito iki 6 aukštų, o tušti – iki 8 aukštų. Kai kuriais atvejais konteineriai kraunami rietuvėje vienas ant kito netgi iki 12 aukštų.

e) Kai dangos konstrukcija apkrauta 1 konteineriu, slėgis apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote yra 2,59 MPa, kai konteineriai sukrauti rietuvėje vienas ant kito 8 aukštais – 12,5 MPa.

f) Euro padėklas į dangą remiasi trejomis stačiakampio formos atramomis. 120000 mm<sup>2</sup> yra mažesniosios atramos plotas.

g) Transportuojami euro padėklai įprastai kraunami rietuvėje vienas ant kito iki 2 aukštų, o sandėliuojami – iki 4 aukštų.

h) Kai dangos konstrukcija apkrauta 1 euro padėklu, slėgis apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote priklauso nuo krovinio svorio yra nuo 0,01 MPa; kai euro padėklai yra sukrauti rietuvėje iki 4 aukštų slėgis apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote priklauso nuo krovinio svorio yra iki 0,03 MPa..

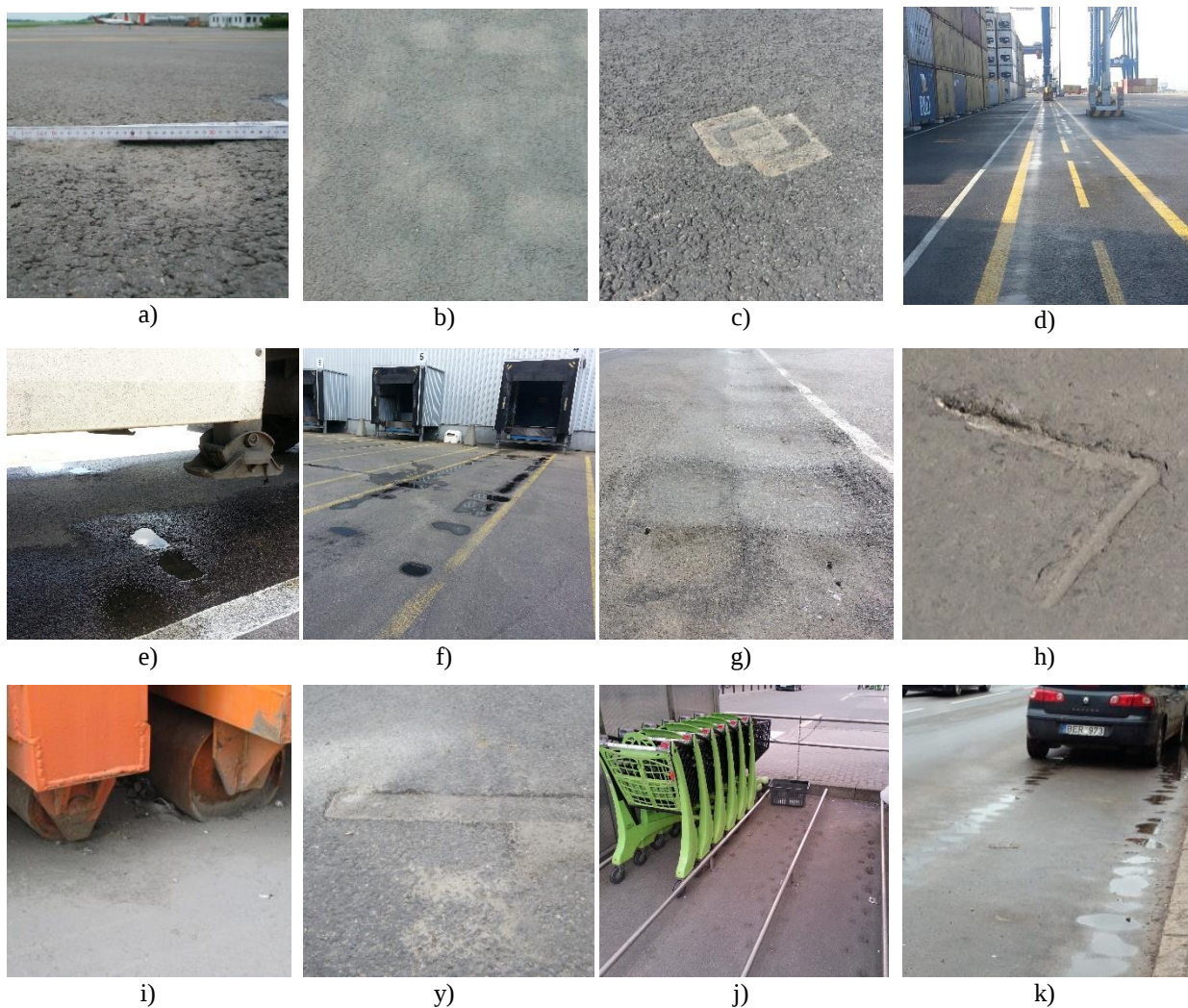
Bendru požūriu liekamosios deformacijos yra trijų tipų (Roberts *ir kt.* 1996; Huang 2004; Morosiuk, Riley 2004; National... 2004; Miljkovic, Radenberg, 2011):

- paviršinės provėžos (angl. *initial rutting*);
- struktūrinės provėžos (angl. *structural rutting*);
- plastinės (šlyties) provėžos (angl. *plastic (flow) rutting*).

Esant nepakankamai sutankintam asfalto mišiniui arba per dideliu oro tuštymų kiekiui, pastarasis susitankina veikiant transporto priemonių ar kitų susisiekimo komunikacijų apkrovoms. Vykstant asfalto mišinio tūrio pokyčiui dangos paviršiuje susiformuoja paviršinės provėžos. Asfalto mišinys tankėja tik apkrovos šaltinio atramos ir dangos sąlyčio plote. Šioje zonoje susiformuoja negilus asfalto dangos paviršiaus įdubimas (įspauda). Pabrėžtina, kad tokio tipo įspaudos kraštuose nesusidaro asfalto mišinio kauburių. Paviršinių provėžų formavimasis stebimas pirmaisiais dangos konstrukcijos eksploatacijos mėnesiais (metais). Vis dėlto šis reiškinys nėra pageidautinas. Paviršinių provėžų formavimosi išvengiama tinkamai parenkant asfalto mišinio oro tuštymų kiekį ir atliekant pakankamą (reikalaujamą) sutankinimą.

**1.2 lentelė.** Asfalto dangos konstrukcijoje pastebimos pažaidos (Smith *ir kt.* 1979; Wisconsin... 2002; Miller, Bellinger 2003; Morosiuk, Riley 2004; Huang 2004; Žiliūtė 2012)

| Pažaidos pobūdis                  | Pažaidos rūšis                                                                                                                                                                                                                                                                              | Veiksniai sąlygojantys pažaidos susidarymą |                  |         |         |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------|---------|---------|
|                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Dangos konstrukcijos laikinumo geba        | Medžiagų savybės | Apkrova | Aplinka |
| Plyšiai (angl. cracks)            | Struktūriniai (angl. structural) (išilginiai (angl. longitudinal), „krokodilo odos“ (žemėlapių pavidalo) (angl. alligator), nuovargio (angl. fatigue), keturkampio formos (angl. block), plauko pavidalo (angl. hair), susiformavę dėl šalčio iškylių (angl. cracking due to frost heaves)) | +                                          | +                | +       | +       |
|                                   | Atsikartojantys (angl. reflection cracks)                                                                                                                                                                                                                                                   | +                                          |                  | +       |         |
|                                   | Temperatūriniai (skersiniai, įstriži)                                                                                                                                                                                                                                                       |                                            | +                |         | +       |
|                                   | Pusmėnulio arba apskritimo pavidalo (angl. slippage cracks)                                                                                                                                                                                                                                 |                                            |                  | +       |         |
| (Su)irimas (angl. disintegration) | Iškorėjimas (ištrupėjimas) (angl. raveling)                                                                                                                                                                                                                                                 |                                            | +                | +       | +       |
|                                   | Lukštenimasis (angl. polishing)                                                                                                                                                                                                                                                             |                                            | +                |         | +       |
|                                   | Duobės (angl. potholes)                                                                                                                                                                                                                                                                     | +                                          | +                | +       | +       |
|                                   | Dangos paviršiaus nudilimas (angl. surface wear rutting)                                                                                                                                                                                                                                    |                                            |                  | +       | +       |
|                                   | Briaunų lūžiai (angl. edge breaks)                                                                                                                                                                                                                                                          |                                            | +                | +       | +       |
| Deformacija (angl. deformation)   | Paviršinės provėžos (angl. initial rutting)                                                                                                                                                                                                                                                 |                                            | +                | +       | +       |
|                                   | Struktūrinės provėžos (angl. structural rutting)                                                                                                                                                                                                                                            | +                                          | +                | +       | +       |
|                                   | Plastinės provėžos (angl. plastic (flow) rutting)                                                                                                                                                                                                                                           |                                            | +                | +       | +       |
|                                   | Šalčio iškylos (angl. frost heaves)                                                                                                                                                                                                                                                         |                                            | +                |         | +       |
|                                   | Iškylos ties plyšiais ir siūlėmis (angl. tenting)                                                                                                                                                                                                                                           |                                            |                  |         | +       |
|                                   | Suslūgimas (angl. distortion)                                                                                                                                                                                                                                                               |                                            | +                |         | +       |
|                                   | Dangos sustūmimas bangomis (angl. corrugation)                                                                                                                                                                                                                                              |                                            | +                | +       | +       |



**1.2 pav.** Liekamosios deformacijos statinių apkrovų poveikio zonose: a) b) orlaivių stovėjimo aikštelė (autorius nuotraukos); c) d) konteinerių terminalas (R. Oginsko nuotraukos); e) f) g) logistikos terminalas (autorius nuotraukos); h) i) y) įvairių krovinių sandėliavimo aikštelė (A. Vaitkaus nuotraukos); j) pirminių vežimėlių sandėliavimo zona (autorius nuotrauka); k) automobilių stovėjimo zona (A. Vaitkaus nuotrauka)



**1.3 pav.** Temperatūrinis plyšys (A. Vaitkaus nuotrauka)

Struktūrinės provėžos siejamos su liekamųjų deformacijų susidarymu birių medžiagų pagrindo sluoksnyje ir/arba žemės sankasoje. Deformavusis apatinei dangos konstrukcijos daliai, susidariusios deformacijos atsikartoja viršutinėje dangos konstrukcijos dalyje. Esant labai standžiam asfalto mišiniui dangos konstrukcijos paviršiuje kartu su struktūrinėmis provėžomis pasireiškia ir išilginiai plyšiai. Šie išilginiai plyšiai įprastai susidaro struktūrinių provėžų centre ir ties kraštais.

Plastinės (šlyties) provėžos pasireiškia viršutiniame asfalto dangos sluoksnyje. Tai yra išilginis ar šoninis asfalto mišinio pasistūmimas (ne tūrinis pokytis) dėl nepakankamo asfalto sluoksnio stabilumo, t. y. dėl šlyties įtempių viršijimo. Plastinėms (šlyties) provėžoms būdingi asfalto mišinio kauburiai ties susidariusios įspaudos kraštais. Šių provėžų formavimosi greitis priklauso nuo aplinkos temperatūros ir apkrovimo laiko. Kuo aukštesnė asfalto temperatūra ir kuo ilgesnis apkrovimo laikas, tuo greičiau pasireiškia plastinės (šlyties) deformacijos (provėžos). Įrengus pakankamos laikomosios gebos dangos konstrukciją, plastinių (šlyties) provėžų vystymasis statinių apkrovų poveikio zonose tampa bene aktualiausiu klausimu. Deja, jų susidarymą ir vystymąsi gana sudėtinga prognozuoti.

Praktikoje stebimi dviejų tipų temperatūriniai plyšiai (Marker 1981):

- temperatūriniai nuovargio plyšiai (angl. *thermal fatigue cracks*);
- žemų temperatūrų plyšiai (angl. *low-temperature cracking*).

Temperatūriniai nuovargio plyšiai vystosi dėl dangos konstrukcijoje susidarančių temperatūrinių įtempių akumuliacijos. Kuo didesniame diapazone kinta paros temperatūra, tuo didesnius temperatūrinius įtempius patiria dangos konstrukcija. Pabrėžtina, kad įtempiai, susidarę dėl temperatūros poveikio esant neseniai įrengtai dangos konstrukcijai įprastai neviršija asfalto stiprumo savybių. Todėl tokio tipo dangose nepasireiškia temperatūriniai nuovargio plyšiai. Tačiau bėgant laikui dangoje atsiradę temperatūriniai įtempiai akumuliuojasi ir dangos konstrukciją eksploatuojant ilgą laiką tikėtina, kad tam tikru momentu bus viršytos asfalto stiprumo savybės. O tai sąlygoja temperatūrinių nuovargio plyšių susidarymą (Isacsson, Zeng 1998a; 1998b).

Žemų temperatūrų plyšiai būdingi šaltojo klimato zonose eksploatuojamoms dangos konstrukcijoms. Jų susidarymas sietinas su dangos konstrukcijoje žemų temperatūrų sužadinamais temperatūros įtempiais. Pastariesiems viršijus asfalto stiprumą dangoje atsiveria žemų temperatūrų plyšiai (Isacsson, Zeng 1998a; 1998b).

Statinių apkrovų poveikio zonose dėl spartaus liekamųjų (ypač plastinių) deformacijų ir temperatūrinių plyšių (eksploatuojant dangos konstrukciją šaltojo klimato zonose) vystymosi dangos konstrukcijos remontuojamos ir/arba rekonstruojamos ženkliai anksčiau nei jų numatytas projektinis eksploatacinis laikotarpis. Dėl to projektuojant tokių zonų dangos konstrukcijas labai

svarbu tinkamai įvertinti veikiančias apkrovas ir klimatinius veiksnius. Šiam tikslui pasiekti svarbu suprasti statinės apkrovos poveikio specifiškumą ir asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimą priklausomai nuo klimatinių veiksnių poveikio.

## **1.2. Statinės apkrovos ir asfalto dangos konstrukcijos samprata**

Statinė apkrova yra tokia apkrova, kurios veikimo kryptis, dydis ir pridėties taško koordinatės yra pastovios ir ją sukeliantis šaltinis neįgyja pastebimų pagreičių (pavyzdžiui, stovinti transporto priemonė, konteineris ir pan.). Tuo tarpu dinaminė apkrova yra tokia apkrova, kurios veikimo kryptis, dydis ir pridėties taško koordinatės kinta taip greitai, kad ją sukeliantis šaltinis įgyja pastebimus pagrečius (pavyzdžiui, judanti transporto priemonė).

Praktikoje pastebima tendencija, kad tą pačią dangos konstrukciją veikiant skirtingo pobūdžio apkrovomis, danga „dirba“ (įlinksta ir deformuojasi) skirtingai. Tai patvirtina A. M. Ghaly (2003) atliktas tyrimas. Jis analizavo statinės ir dinaminės apkrovos (apkrovos veikimo trukmė 0,1 s) poveikį asfalto dangos konstrukcijai atsižvelgiant į tamprumo modulio kitimą. Nagrinėtą asfalto konstrukciją sudarė 15 cm storio asfalto dangos sluoksniai ir 30 cm storio asfalto pagrindo sluoksnis. Visais skaičiavimo variantais tarp asfalto sluoksnių ir žemės sankasos tamprumo modulių išlaikytas santykis 4:2:1. Atlikti skaičiavimai parodė, jog statinės apkrovos atveju dangos konstrukcijos įlinkiai yra apie 1,5-3 kartus didesni nei dinaminės apkrovos atveju. Vadinas, tą pačią asfalto dangos konstrukciją veikiant skirtingo pobūdžio apkrovomis, danga „dirba“ (įlinksta ir deformuojasi) skirtingai.

Panašius rezultatus pristatė B. Picoux, A. El Ayadi ir C. Petit (2009). Jie analizavo dangos konstrukciją, sudarytą iš 5 cm storio asfalto dangos ir 35 cm storio birių medžiagų pagrindo sluoksnio. Tyrimo metu gauta, kad skirtumas tarp statinės ir dinaminės apkrovos sukeltų dangos konstrukcijos įlinkių yra tuo didesnis, kuo mažesnis visos dangos konstrukcijos ekvivalentinis tamprumo modulis.

Visi šie tyrimai pagrindžia koncepciją, kad statinė apkrova pasižymi agresyvesnėmis apkrovos sąlygomis nei dinaminė apkrova ir lemia spartesnę dangos konstrukcijos degradaciją.

Kelių tiesyboje taikomos:

- nestandžiosios;
- standžiosios;
- kompozitinės (pusiau nestandžiosios/standžiosios dangos konstrukcijos).

Nestandžiąsias dangos konstrukcijas sudaro danga ir pagrindo sluoksnis. Bene plačiausiai naudojamos nestandžiosios dangos konstrukcijos tipas – asfalto dangos konstrukcijos. Jas sudaro

vienas arba du asfalto dangos sluoksniai, įrengti ant asfalto pagrindo sluoksnio ir nesurišto arba surišto mineralinių medžiagų pagrindo sluoksnio bei apsauginio šalčiui atsparus sluoksnio.

Asfalto viršutinis sluoksnis įprastai rengiamas 2-5 cm storio. Jis patiria tiesioginį apkrovos ir klimatinį veiksnių poveikį. Todėl šiame sluoksnyje pasireiškia didžiausi vertikalieji gniuždantieji įtempiai ir vyrauja didžiausias temperatūros pokytis paros ir metų atžvilgiu, sąlygojantis didžiausių temperatūrinių įtempių susidarymą. Atsižvelgiant į tai asfalto viršutinio sluoksnio įrengimui rekomenduojama naudoti tankios arba tarpinės granulimetrinės sudėties asfalto mišinius su polimerais modifikuotu bitumu. Siekiant sumažinti transporto priemonių keliamą triukšmą taikytini atviros granulimetrinės sudėties asfalto mišiniai. Kadangi asfalto šutinis sluoksnis tiesiogiai sąveikauja su transporto priemonių ratais, tai jam keliamas atsparumo slydimui reikalavimas (Newcomb, Hansen 2006; Thom 2008).

Asfalto apatinis sluoksnis įprastai rengiamas 5-8 cm storio. Jis nėra tiesiogiai veikiamas apkrovos ir klimatinį veiksnių poveikio, tačiau šiame sluoksnyje susidaro didžiausi šlyties įtempiai. Atsižvelgiant į tai asfalto apatinio sluoksnio įrengimui rekomenduojama naudoti tik tankios granulimetrinės sudėties asfalto mišinius (kitų rūšių asfalto mišinių taikymas nėra pagrįstas). Esant agresyvioms apkrovos sąlygoms (pavyzdžiui, didelėms statinėms apkrovoms) tikslinga naudoti polimerais modifikuotą bitumą. Įrengus asfalto apatinį sluoksnį svarbu užtikrinti pakankamą šio ir asfalto viršutinio sluoksnio sukibimą. Šlyties įtempiams viršijus šių sluoksnių sukibimą, asfalto viršutinis sluoksnis pradeda slinkti apatinio sluoksnio atžvilgiu, t. y. dangos paviršiuje susiformuoja plastinės (šlyties) deformacijos. (Huang 2004; Newcomb, Hansen 2006; Thom 2008).

Asfalto pagrindo sluoksnis įprastai rengiamas 8-18 cm storio ir yra pats storiusias asfalto konstrukcinis sluoksnis. Esant pakankamam visų asfalto sluoksnių sukibimui, t. y. atskiriems asfalto sluoksniams funkcionuojant kaip vienam asfalto sluoksniui, ir dangos konstrukciją veikiant apkrova didžiausi tempiamieji įtempiai susidaro asfalto pagrindo sluoksnio apačioje. Viršijus jų kritinę ribą dangos konstrukcijoje pasireiškia nuovargio plyšiai. Pabrėžtina, kad atsparumo nuovargio plyšių formavimosi aspektu svarbus visų asfalto sluoksnių bendrasis storis. Asfalto apatinio sluoksnio apačioje susidarantys įtempiai mažėja pagal kubinę asfalto sluoksnių storio funkciją. Be to asfalto pagrindo sluoksnis dėl greta esančio birių medžiagų pagrindo sluoksnio yra šiek tiek drėkinamas. Todėl parenkant šio sluoksnio asfalto mišinį svarbu užtikrinti kuo didesnę asfalto mišinio ne pralaidumą vandeniui. Įprastai asfalto pagrindo sluoksnio įrengimui rekomenduojama naudoti tankios granulimetrinės sudėties asfalto mišinius ir nemodifikuotą kelių bitumą (Newcomb, Hansen 2006; Thom 2008).

Nesurišto arba surišto mineralinių medžiagų pagrindo sluoksnis įprastai įrengiamas 15-30 cm storio. Jeigu reikalingas dar didesnis pagrindo sluoksnio storis, tuomet dažniausiai įrengiami

du (viršutinis ir apatinis) nesurišto mineralinių medžiagų pagrindo sluoksniai. Apatinio pagrindo sluoksnio storis įprastai yra apie 15 cm ir šiam sluoksniui įrengti taikomos blogesnėmis charakteristikomis pasižyminčios medžiagos nei viršutiniam nesurišto mineralinių medžiagų pagrindo sluoksniui. Apskritai nesurištas arba surištas mineralinių medžiagų pagrindo sluoksnis praktiškai apsprendžia visos dangos konstrukcijos stiprumą (Huang 2004; Thom 2008).

Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio storis priklauso nuo aukščiau esančių dangos konstrukcijos sluoksnių bendrojo storio ir nuo vietovėje vyraujančio įšalo gylio. Pabrėžtina, kad esant pakankamo storio šalčiui atspariems žemės sankasos gruntams apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis neįrengiamas. Šis sluoksnis pasižymi dideliu pralaidumu vandeniui.

Nestandžiosioms dangos konstrukcijoms taip pat priskiriamos trinkelinių ir plokščių dangos, įrengiamos ant birių medžiagų pagrindo sluoksnio.

Standžiąsias dangos konstrukcijas sudaro betono danga, įrengiama ant nesurišto arba surišto mineralinių medžiagų sluoksnio bei apsauginio šalčiui atsparus sluoksnio. Tokio tipo dangos konstrukcijoms taip pat priskiriamos dangos su plonu ( $\leq 10$  cm storio) viršutiniu asfalto sluoksniu ir trinkelinių ir plokščių dangos, įrengiamos ant hidraulinių rišiklių surišto mineralinių medžiagų pagrindo sluoksnio.

1.3 lentelėje pateikiamas nestandžiosios ir standžiosios dangos konstrukcijos palyginimas. Kompozitinės dangos konstrukcijos pasižymi tarpinėmis nestandžiųjų ir standžiųjų dangos konstrukcijų savybėmis.

**1.3 lentelė.** Nestandžiosios ir standžiosios dangos konstrukcijos palyginimas (Taunk 1998; Huang 2004; Papagiannakis, Masad 2008)

| Požymis                                                                                                  | Nestandžioji dangos konstrukcija                                            | Standžioji dangos konstrukcija                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Rišamoji medžiaga                                                                                        | Bitumas                                                                     | Portlandcementis                                           |
| Įtempių koncentracija                                                                                    | Koncentruoti mažame plote                                                   | Išskirstyti sąlyginai dideliame plote                      |
| Projektavimo metodai                                                                                     | Paremti daugiasluoksnės tamprios sistemos teorija                           | Paremti betono plokštės stiprumo lenkiant skaičiavimu      |
| Įrengimo kaštai                                                                                          | Maži                                                                        | Dideli                                                     |
| Priežiūros kaštai                                                                                        | Dideli                                                                      | Maži                                                       |
| Ekspluatacinis laikotarpis                                                                               | 20 metų (išskyrus ilgaamžės ( <i>angl.</i> perpetual) dangos konstrukcijas) | 40 metų                                                    |
| Viršutinio dangos sluoksnio atnaujinimas                                                                 | kas 4-10 metų                                                               | Kas 12-15 metų                                             |
| Funkcionavimo priklausomybė nuo žemiau esančių dangos konstrukcijos sluoksnių ir žemės sankasos stiprumo | Ženkliai priklauso                                                          | Praktiškai nepriklauso                                     |
| Temperatūros poveikis funkcionavimui                                                                     | Kinta asfalto mišinio tamprumo modulis                                      | Betono plokštės išsigaubia, įsigaubia, plečiasi, traukiasi |
| Deformacinių siūlių įrengimas                                                                            | Nereikalingas                                                               | Būtinas                                                    |
| Ekspluataavimo pradžia nuo įrengimo pabaigos                                                             | Po 24 val.                                                                  | Po 28 parų                                                 |
| Degalų sąnaudos                                                                                          | Sąlyginai didelės                                                           | Sąlyginai mažos                                            |

### 1.3. Asfalto dangos funkcionavimo ypatumai

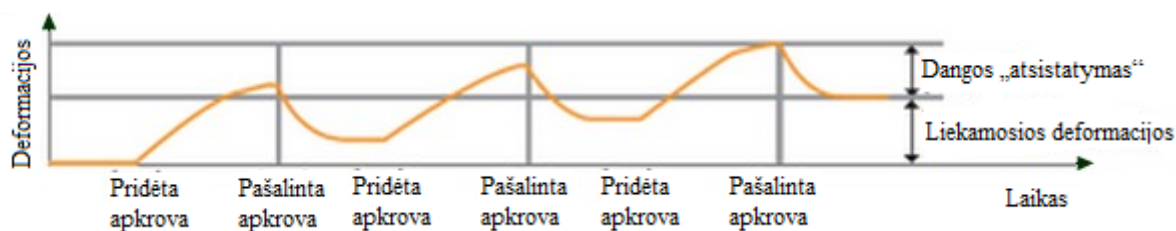
Asfalto dangos dėl jų mišinyje esančio rišiklio (bitumo) savybių pasižymi klampiomis–tampriomis savybėmis. Tamprų kūną paveikus statine apkrova jis iš karto maksimaliai deformuojasi ir deformacijos praktiškai nekinta visą apkrovimo laikotarpį, o pašalinus apkrovą kūnas „grįžta“ („atsistato“) į pradinę padėtį (1.4 pav. a). Laikotarpis tarp apkrovos pašalinimo ir deformacijų atsistatymo yra praktiškai lygus nuliui. Pabrėžtina, kad tampraus kūno deformacijos yra tiesiogiai proporcingos įtempiams (Huko dėsnis). Proporcingumą apibūdinantis koeficientas parodo medžiagos tamprumą ir yra vadinamas tamprumo modulių (Quintus, Killingsworth 1998).

Klampų kūną paveikus statine apkrova jis palaipsniui deformuojasi (gniuždosi) visą apkrovos veikimo laikotarpį ir pašalinus apkrovą lieka deformuotoje būsenoje, t. y. kūnas „neatsistato“ į pradinę padėtį (1.4 pav. b) (Quintus, Killingsworth 1998).

Klampiomis–tampriomis savybėmis pasižymintis kūnas veikiamas statine apkrova deformuojasi palaipsniui, o pašalinus apkrovą stengiasi „grįžti“ į pradinę padėtį (1.4 pav. c). Laikotarpis tarp apkrovos pašalinimo ir deformacijų atsistatymo priklauso nuo kūno tamprumo savybių. Kuo kūnas tampresnis, tuo jis greičiau „atsistato“ (Quintus, Killingsworth 1998). Vis dėlto esant intensyviai cikliniai apkrovimui ir/arba nedideliu tamprumu pasižyminčiam asfalto mišiniui danga praktiškai „nebeatsistato“ į pradinę t. y. į prieš apkrovimą buvusią, padėtį. Tokiu atveju dangoje pradeda formuotis liekamosios deformacijos (1.5 pav.). Jų mastas didėja dėl liekamųjų deformacijų akumuliacijos.



1.4 pav. Kūnų deformavimasis, kai kūnas pasižymi: a) tampriomis savybėmis; b) klampiomis savybėmis; c) klampiomis–tampriomis savybėmis



1.5 pav. Dangos deformavimosi nuo ciklinės, statinės apkrovos poveikio schema

Pabrėžtina, kad asfalto mišinio klampi–tampri elgsena glaudžiai siejama su asfalto dangos temperatūra. Dangos temperatūrai esant didesnei nei +90 °C asfalto mišinys yra visiškai klampios būsenos. Tokiu atveju net mažiausi įtempiai lemia medžiagos deformavimąsi. Dangos temperatūrai kintant nuo +50 °C iki +90 °C asfalto mišinys tampa tamprios–klampios būsenos ir yra jautrus deformavimuisi. Dangos temperatūrai esant nuo 0 °C iki +50 °C asfalto mišinys yra tamprios–plastinės būsenos. Įtempiams neviršijus takumo ribos, asfalto mišinys funkcionuoja kaip tamprus kūnas. Priešingu atveju pasireiškia asfalto mišinio plastinės savybės ir dangoje pradeda formotis liekamosios (plastinės) deformacijos. Dangos temperatūrai nukritus žemiau 0 °C asfalto mišinys tampa tamprios–trapios būsenos. Temperatūriniais įtempiais viršijus medžiagos stiprumo ribą dangoje susidaro temperatūriniai plyšiai (Huang 1993).

Asfalto mišinys kaip tampri–klampi medžiaga įprastai charakterizuojama standumo moduliui. Esant aukštomis temperatūroms asfalto mišinys pasižymi mažu standumo moduliui, o esant žemoms temperatūroms – dideliu.

M. E. Nunn ir T. Smith (1997) atlikti tyrimai parodė, kad asfalto mišinio standumo modulis temperatūrai padidėjus 1 °C įprastai sumažėja 0,06–0,12 GPa. Asfalto mišinio jautrumas temperatūros pokyčiui mažėja didėjant mišinio standumo moduliui.

Temperatūros poveikis dangos degradacijos spartai priklauso nuo jos storio. Pavyzdžiui, storesnėse kaip 100 mm storio asfalto dangose nuovargio plyšiai susidaro daug greičiau dangas eksploatuojant 15–40 °C temperatūroje. Tuo tarpu priešingu atveju (plonesnėse kaip 100 mm storio dangose) nuovargio plyšiai greičiau pasireiškia jas eksploatuojant <15 °C temperatūroje. Dažniausiai nuovargio plyšiai susidaro viršijus ribinius lenkimo (tempimo) įtempius asfalto sluoksnių apačioje ir vystosi link dangos paviršiaus. Tokio nuovargio plyšio formavimosi stadija siejama su vidutinėmis ir aukštomis temperatūromis asfalto sluoksnio apačioje (esant šiai temperatūrai danga labiausiai lenkiama). Tuo tarpu vystymosi stadija siejama su žemomis temperatūromis asfalto sluoksnio viduryje (esant žemai temperatūrai vyksta temperatūrinis traukimas ir rišiklio bei dangos standėjimas (kietėjimas)) (Ongel, Harvey 2004).

Nicholls ir Carswell (2001) nustatė, kad dangos paviršiaus temperatūrai viršijant 45 °C plastinės deformacijos dangoje susiformuoja vos per keletą dienų. Todėl statinių apkrovų zonose naudojamiems asfalto mišiniams rekomenduojama naudoti kietus, aukšta minkštėjimo temperatūra pasižyminčius bitumus.

Tačiau dėl tokių bitumų taikymo esant žemoms temperatūroms asfalto mišinys pasižymi dideliu standumo moduliui ir tampa jautrus žemų temperatūrų temperatūrinių plyšių vystymuisi. Krintant temperatūrai asfalto mišinio mineralinių medžiagų dalelės gaubianti bitumo plėvelė palaipsniui plonėja (traukiasi) ir kietėja. Tai lemia temperatūrinių įtempių didėjimą. Kai

temperatūriniai įtempiai viršija medžiagos tempiamąjį stiprumą dangos paviršiuje susiformuoja temperatūrinis plyšys (Haas 1973).

Susiformavęs temperatūrinis plyšys akimirksniu vystosi gilyn į dangos konstrukciją. Tai įrodė Boutin ir Lupien (2000) atliktas bandymas Kanados Šventosios Anos (angl. *Ste. Anne*) bandomajame ruože. Bandymo metu skirtinguose asfalto dangos gyliuose buvo įrengti elektros laidai ir davikliai, fiksuojantys laiką, kada besivystantys plyšiai nutraukia instaliuotus laidus. Laikas tarp pirmojo, esančio arčiausiai dangos paviršiaus, ir paskutiniojo, labiausiai nutolusio nuo dangos paviršiaus, nutrauktojo laido buvo mažesnis kaip 2 minutės.

Dangoje susidariusių temperatūrinių plyšių masto priklausomybę nuo asfalto dangos storio įrodo tame pačiame (Šventosios Anos) bandomajame ruože įrengti du identiški ruoželiai su skirtingo storio asfalto danga. Aštuonerių metų eksploatacinė patirtis parodė, kad dangos konstrukcijoje su 250 mm storio asfalto danga temperatūrinių plyšių mastas sudarė tik apie 40 % dangos konstrukcijos su 100 mm storio asfalto dangos temperatūrinių plyšių masto (Boutin, Lupien 2000).

Temperatūrinių plyšių susidarymas ir vystymasis lemia dangos lygumo sumažėjimą, o pastarasis eismo nepatogumą, padidėjusias kuro sąnaudas, spartesnę transporto priemonių nusidėvėjimą ir kitus neigiamus veiksnius. Todėl dangos paviršiuje susidarę temperatūriniai plyšiai turi būti kuo greičiau užtaisomi.

Lietuvoje kelių priežiūrą reglamentuoja *Kelių priežiūros vadovas*. Remiantis šio vadovo I dalimi „*Automobilių kelių priežiūros normatyvai KPV PN-14*“ dangoje neturi būti plyšių, platesnių kaip:

- 5 mm (esant I priežiūros lygiui);
- 10 mm (esant II priežiūros lygiui);
- 19 mm (esant III priežiūros lygiui).

Susidarius platesniems temperatūriniams plyšiams jie užtaisomi pavasarį, kai oro temperatūra ne žemesnė kaip +5 °C iki gegužės 1 d., 15 d. arba birželio 1 d. priklausomai nuo keliui priskirto priežiūros lygio. Jeigu neleistino dydžio temperatūriniai plyšiai susidaro vasaros sezono metu, tai jie užtaisomi kai tik atsiranda esant ne žemesnei kaip +5 °C oro temperatūrai.

Lietuvoje temperatūriniai plyšiai užtaisomi remiantis *Kelių priežiūros vadovo II dalimi* „*Automobilių kelių priežiūros darbų atlikimo technologija KPV DT-15*“ ir *Asfalto dangų plyšių, siūlių ir prijungčių su defektais taisymo rekomendacijomis R PT 11*. Taikytinas temperatūrinių plyšių užtaisymo metodas pasirenkamas atsižvelgiant į plyšio plotį (1.4 lentelė).

Temperatūrinių plyšių užtaisymas ir priežiūra reikalauja specifinių žinių ir sudėtingų technologijų. Todėl ne visuomet šios pažaidos yra tinkamai valdomos. To pasėkoje sutrumpėja

dangos eksploataavimo laikotarpis ir padidėja kelių naudotojų ir valdytojų lėšų sąnaudos. Šių padarinių išvengiama taikant prevencines priemones temperatūrinių plyšių susidarymui.

Užsienio šalių patirtis parodė, kad temperatūrinių plyšių susidarymo prevencinė priemonė – tinkamas, šalčio poveikį įvertinantis asfalto mišinio gamybai naudojamo bitumo parinkimas. Pabrėžtina, kad bitumo atsparumo šalčiui užtikrinimas yra itin aktuali tema gaminant statinėms apkrovoms atsparius asfalto mišinius, nes pastariesiems siekiant apriboti liekamųjų (plastinių) deformacijų vystymąsi įprastai taikomi kietesni bitumai. Tokie bitumai esant žemoms temperatūroms pasižymi dideliu jautrumu temperatūrinių plyšių susidarymui.

Lietuvoje asfalto mišinio bitumas parenkamas pagal *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės IT ASFALTAS 08* atsižvelgiant į dangos konstrukcijos klasę ir asfalto sluoksnio funkciją. Kadangi parenkant asfalto mišinio gamybai naudotiną bitumą neįvertinamas jo atsparumas šalčiui, tai naudojamose asfalto dangose stebimas intensyvus temperatūrinių plyšių susidarymas. To pasekoje didėja dangų priežiūros kaštai. Siekiant optimalaus Lietuvos automobilių kelių ir specifinių susisiekimo komunikacijų statinių dangos konstrukcijų funkcionavimo valdymo būtina numatyti metodikas, algoritmus ir/arba modelius bitumo atsparumui šalčiui įvertinti.

**1.4 lentelė.** Temperatūrinių plyšių užtaisymui taikytino metodo pasirinkimas

| Plyšio plotis, mm | Metodas                                            | Aprašymas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <2                | Smulkių plyšių                                     | Dangos paviršius nuvalomas mechanizuotu būdu nuo dulkių ir purvo. Smulkūs plyšiai išvalomi naudojant suspausto oro srovę. Užtaisomas plotas mechanizuotu būdu palaistomas emulsija ir naudojant specialų įrenginį apdorojamas granito skaldele.                                                                                                            |
| ≤12               | Modifikuotos emulsijos ir kvarcinio smėlio mišinio | Plyšys pagal jo konfigūraciją išfrezuojamas ne daugiau kaip iki 50 mm gylio, išplaunamas ir išdžiovinamas naudojant plovimo mašiną ir užpildomas modifikuotos su lateksu emulsijos ir kvarcinio smėlio mišiniu.                                                                                                                                            |
| 2-25              | Plyšio uždengimo                                   | Plyšys panaudojant karšto oro srovę išvalomas, išdžiovinamas ir galutinai uždengiamas sandariklio mase suformuojant juostelę specialia forma (pvz., „bato“ tipo formos). Plyšio uždengimo juostelė apdorojama rišikliu dengtą smulkiąja mineralinę medžiagą ar 1/3 frakcijos mineralinę medžiagą įspaudžiant į dar karštą sandariklio masę.                |
| 12-25             | Išfrezavimo ir sandarinimo                         | Plyšys išfrezuojamas. Esama plyšio ertmė išvaloma, prireikus išdžiovinama ir užsandarinama sandariklio mase bei uždengiama suformuojant juostelę specialia forma (pvz., „bato“ formos). Plyšio uždengimo juostelė apdorojama rišikliu dengtą smulkiąja mineralinę medžiagą ar 1/3 frakcijos mineralinę medžiagą įspaudžiant į dar karštą sandariklio masę. |
| >25               | Pakeitimo                                          | Plyšys ir su juo besiribojančios zonos viršutinis sluoksnis pašalinamas, išfrezuotas plotas išvalomas ir pakeičiamas karštu asfalto mišiniu arba taisymo mase su mineralinėmis medžiagomis. Pakeistas sluoksnis apdorojamas rišikliu dengtą smulkiąja mineralinę medžiagą ar 1/3 frakcijos mineralinę medžiagą įspaudžiant į dar karštą sandariklio masę.  |

#### **1.4. Darbo tikslas ir uždaviniai**

Darbo tikslas – sukurti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį.

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Apibūdinti užsienio šalyse taikomus metodus, įvertinančius bitumo atsparumą šalčiui.
2. Išanalizuoti mokslinius tyrimus asfalto mišinių ir jų komponentų charakteristikoms keliamų reikalavimų tematikoje atsižvelgiant į atsparumą plastinių deformacijų ir temperatūrinių plyšių susidarymui.
3. Sukurti teorinį statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį.
4. Atlikti eksperimentinį tyrimą bitumo atsparumui šalčio poveikiui įvertinti.
5. Patikslinti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį.
6. Pateikti rekomendacijas bitumo parinkimo algoritmui, užtikrinančiam šalčio poveikio bitumui įvertinimą.
7. Apskaičiuoti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo ekonominį efektą.

## 2. TEORINIS STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI MODELIS

Asfalto mišinio gamybai tinkamai parinktas bitumas esant optimaliai granulimetrinei mineralinių medžiagų mišinio sudėčiai užtikrina pageidaujamą dangos funkcionavimą. Kelių tiesyboje vyrauja nuomonė, kad kietesni bitumai taikytini plastinių deformacijų susidarymo vietose, o minkštesni bitumai – temperatūrinių plyšių susidarymo vietose. Tačiau šios ideologijos taikymas statinių apkrovų poveikio zonose yra neefektyvus bitumo parinkimo metodas, nes bet koku atveju dangoje susidaro pažaidos: plastinės deformacijos taikant minkštesnius bitumus (kai aukšta dangos temperatūra); temperatūriniai plyšiai taikant kietesnius bitumus (kai žema dangos temperatūra). Todėl statinių apkrovų poveikio zonose naudojamų asfalto mišinių bitumo parinkimas reikalauja tam tikro algoritmo – modelio –įvertinančio šalčio poveikį.

### 2.1. Užsienio šalyse taikomi metodai, įvertinantys bitumo atsparumą šalčiui

Bitumo atsparumas šalčiui įprastai vertinamas nustatant jo kritinę temperatūrą. Sąvokos „kritinė temperatūra“ apibrėžtis priklauso nuo bitumo funkcionavimo įvertinimui esant žemoms temperatūroms taikomo metodo. Pasaulyje kritinės temperatūros nustatymas atliekamas (Fraass 1937; Lee, Hesp 1994; Petersen *ir kt.* 1994; Dongre 2001; Kim 2005; Gauthier, Anderson 2006; Mitchell *ir kt.* 2007; Sui *ir kt.* 2010):

- Fraso metodu (angl. *Fraass test*);
- lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įprastos formos bandinius (angl. *bending beam rheometer (BBR)*);
- tiesioginio tempimo prietaisu (tiesioginiu tempimu) taikant įprastos formos bandinius (angl. *direct tension (DT) test*);
- lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įpjautus bandinius (angl. *single-edge notch bending (SENB) test*);
- tiesioginio tempimo prietaisu (tiesioginiu tempimu) taikant įpjautus bandinius (angl. *double edge notched tension (DENT) test*);
- bitumo plyšio formavimosi prietaisu (angl. *asphalt binder cracking device (ABCD)*);
- dinaminiu šlyties reometru taikant 4 mm skermens bandinius.

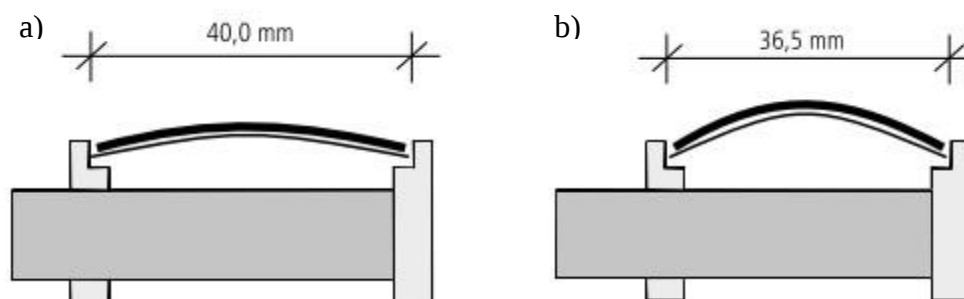
Kritinės temperatūros nustatymas Fraso metodu yra vienas seniausių metodų bitumo atsparumui šalčiui įvertinti. Bandymo metu ant plieninės 41 mm ilgio ir 20 mm pločio plokštelės padengtas 0,5 mm storio bitumo sluoksniu yra cikliška lenkiamas (2.1 pav.). Bandinys kiekvieną kartą sulenkiamas bandymo temperatūrai nukritus 1 °C. Bandymo temperatūra kinta 1 °C/min

greičiu. Bandymas laikomas baigtu bandinyje atsiradus įtrūkiui (2.2 pav.). Temperatūra, kuriai esant bandinys įtrūksta, t. y. bandinyje susiformuoja plyšys, vadinama kritine temperatūra arba trapumo temperatūra pagal Frasą (Fraass 1937). Bandymo atlikimą reglamentuoja standartas *LST EN 12593 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Trapumo temperatūros pagal Frasą nustatymas“*.

Pastebėta, kad šiuo metodu nustatoma kritinė temperatūra yra ekvivalenti temperatūrai, kuriai esant bitumo penetracija yra 1,25. Todėl kritinė temperatūra gali būti numatoma (prognozuojama) remiantis nustatytomis penetracijos ir minkštėjimo temperatūros vertėmis (Read, Whiteoak 2003). Pabrėžtina, kad mokslininkai vis labiau pripažįsta Fraso metodo netinkamumą kritinės temperatūros nustatymui dėl netinkamai vertinamo bitumo funkcionavimo esant žemoms temperatūroms.

Kritinę temperatūrą nustatant lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įprastos formos bandinius kritine temperatūra nurodoma aukštesnioji temperatūra, tenkinanti vieną iš šių sąlygų:

- lenkimo standis praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios  $S(60)$  yra 300 MPa;
- lenkimo standžio kitimo rodiklis praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios  $m(60)$  yra 0,3.



**2.1 pav.** Fraso prietaiso principinė schema a) bandinys su plokšte prieš lenkimą; b) bandinys su plokšte lenkimo momentu (Błażejowski ir kt. 2014)

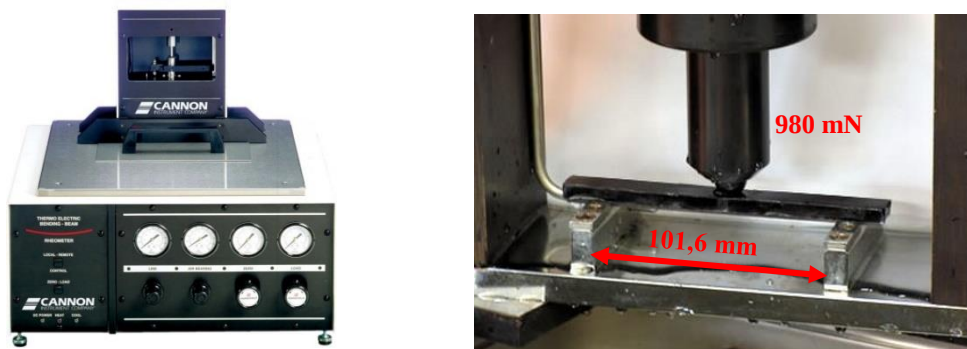


**2.2 pav.** Bandinio įtrūkimas (Błażejowski ir kt. 2014)

Tokiu atveju nustatyta kritinė temperatūra tenkina Amerikos kelių ir transporto asociacijos (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*) patvirtinto standarto *AASHTO M 320 „Performance-Graded Asphalt Binder“* reikalavimus, kad lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  yra  $\geq 0,3$  esant  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  aukštesnei temperatūrai nei žemiausia dangos konstrukcijos temperatūra. Vyrauja nuostata, kad tenkinant šias sąlygas bitumas nėra jautrus temperatūrinių plyšių vystymuisi. 300 MPa lenkimo standžio vertės ribą Strateginės kelių tyrimo programos (angl. *Strategic Highway Research Program*) tyrėjai (1993) nurodė remiantis E. E. Readshaw (1972) pateikta išvada, kad temperatūrinių plyšių vystymasis apribojamas taikant asfalto mišinius, kurių standis esant žemiausiai eksploatacinei temperatūrai neviršija 200 MPa ir atliktais papildomais tyrimais. 0,3 lenkimo standžio kitimo rodiklio vertės riba įvesta remiantis idėja, kad žema lenkimo standžio kitimo verte pasižymintys bitumai lėčiau „atpalaiduoja“ žemų temperatūrų sukeltus įtempius, o tai pasireiškia spartesniu temperatūrinių plyšių vystymusi. (Readshaw 1972; Anderson, Kennedy 1993).

60 s intervalas nuo bandinio apkrovimo pradžios pasirinktas pritaikius laiko-temperatūros superpozicijos principą Strateginės kelių tyrimo programos vystymo metu pateikta išvada, kad asfalto mišinio standis (analogiškai ir bitumo standis) praėjus 2 val. nuo bandinio apkrovimo pradžios, bandinį apkraunant pastovia gniuždančiąja apkrova, puikiai koreliuoja su temperatūrinių plyšių vystymusi kelyje. Vadinasi, esant  $T_1\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai medžiagos standis praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios yra praktiškai lygus medžiagos standžiui praėjus 2 val. nuo bandinio apkrovimo pradžios esant  $T_1-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai (Anderson, Kennedy 1993).

Bitumo lenkimo standis  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios esant tam tikrai neigiamai bandymo temperatūrai nustatomas lenkiamo strypelio reometru. Suformuota 127 mm ilgio, 12,7 mm pločio ir 6,4 mm aukščio bitumo sijelė dedama ant atramų, viena nuo kitos nutolusių 101,6 mm, ir 240 s veikiama pastovia 980 mN gniuždančiąja apkrova (2.3 pav.).



Pastaba: bandymas atliekamas taikant įprastos formos bandinį

**2.3 pav.** Bandymo lenkiamu strypelio reometru principinė schema

Bitumo lenkimo standis bet kuriuo laiko momentu apskaičiuojamas taikant elementariojo lenkimo teoriją (angl. *elementary bending theory*) išlaikant sąlygą, kad bandinys apkrovimo metu „dirba“ kaip tiesiškai klampus–tamprus kūnas (2.1 formulė). Kadangi bandinio atstumo tarp atramų ir jo aukščio santykis yra 16, tai skaičiavimuose nevertinamos šlyties deformacijos (Petersen *ir kt.* 1994). Tuo tarpu bitumo lenkimo standžio kitimo rodiklis bet kuriuo laiko momentu apskaičiuojamas pagal standžio kitimo laike logaritminį grafiką (2.2 formulė). Bandymo atlikimą ir rezultatų apskaičiavimą reglamentuoja standartas *LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“*.

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)}; \quad (2.1)$$

čia:  $S(t)$  – lenkimo standis laiko momentu  $t$ , MPa;

$L$  – bandymo apkrova, N;

$b$  – bandinio (sijelės) plotis, mm;

$h$  – bandinio (sijelės) aukštis (storis), mm;

$\delta(t)$  – bandinio (sijelės) įlinkis laiko momentu  $t$ , mm.

$$m(t) = |B + 2 \cdot C \cdot \log(t)|; \quad (2.2)$$

čia:  $m(t)$  – lenkimo standžio kitimo rodiklis laiko momentu  $t$ ;

$B$  ir  $C$  – regresinės lygties (2.3 formulė) koeficientai;

$t$  – laiko momentas, s.

$$\log S_c(t) = A + B \cdot \log(t) + C \cdot (\log(t))^2; \quad (2.3)$$

čia:  $S_c(t)$  – apskaičiuotas lenkimo standis laiko momentu  $t$ ;

$A$ ,  $B$  ir  $C$  – antro laipsnio logaritminio daugianario (polinomo) regresinės lygties koeficientai;

$t$  – laiko momentas, s.

Kritinę temperatūrą nustatant tiesioginio tempimo prietaisu taikant įprastos formos bandinius kritine temperatūra nurodoma tokia temperatūra, kuriai esant bandinio deformacijos nutrūkimo metu yra lygios 1 %.

Bandymo metu suformuotas specialios formos bandinys (2.4 pav.) dedamas į tiesioginio tempimo prietaisą, kuriame vienas bandinio galas pritvirtinamas nejudamai, o kitas tempiamas taip, kad bandinys deformuotųsi 3 %/min (1 mm/min) greičiu. Bandinys tempiamas tol, kol nutrūksta arba išsitempia daugiau nei 10 %. Bandymo pabaigoje fiksuojamas bandinio ilgis buvęs

bandinio trūkimo pradžioje ir apskaičiuojama bandinio deformacija. Pabrėžtina, kad bandinio irimas esant trapiam bitumui trunka taip trumpai, kad bandinį tempiant didžiausia apkrova (esant didžiausiems įtempiams) bandinys iš karto nutrūksta, t. y. pasidalija į dvi dalis. Tačiau esant tasesniam (elastingesniam) bitumui bandinį tempiant didžiausia apkrova (esant didžiausiems įtempiams) bandinys nenutrūksta, bet tempiasi (ilgėja). Tokiu atveju bandinio irimo pradžia fiksuojamas momentas, kai pasiekiami didžiausi įtempiai. Bandymo atlikimą ir rezultatų apskaičiavimą reglamentuoja standartas *AASHTO T 314 „Determination the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)“*. Bandymo metodika taikytina tik esant mažoms deformacijoms, t. y. kai bandymo metu bandinys nedeformuojamas daugiau kaip 10 %.

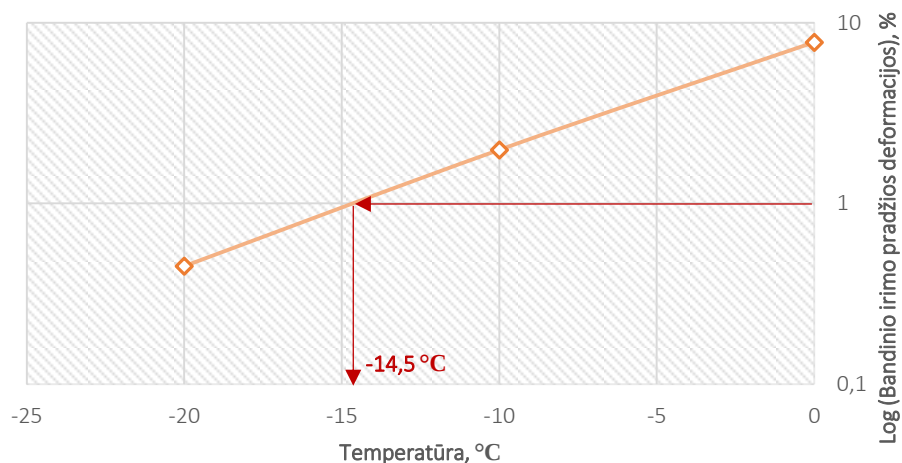
Kritinė temperatūra nustatoma naudojant logaritminėje skalėje atidėtas bandinio irimo pradžios deformacijas esant skirtingoms temperatūroms pagal sąlygą, kad bandinio irimo pradžios deformacijos yra lygios 1 % (2.5 pav.) (Petersen *ir kt.* 1994).

Atkreiptinas dėmesys, kad kritinė temperatūra taip pat nustatoma sujungiant lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu su įprastos formos bandiniais gautus rezultatus.

Lenkiamo strypelio reometru su įprastos formos bandiniais bandymas atliekamas esant dviem skirtingoms temperatūroms. Bandymo temperatūros parenkamos taip, kad esant temperatū-



**2.4 pav.** Tiesioginio tempimo bandymui paruošas specialios formos bandinys (Pavement... 2011)



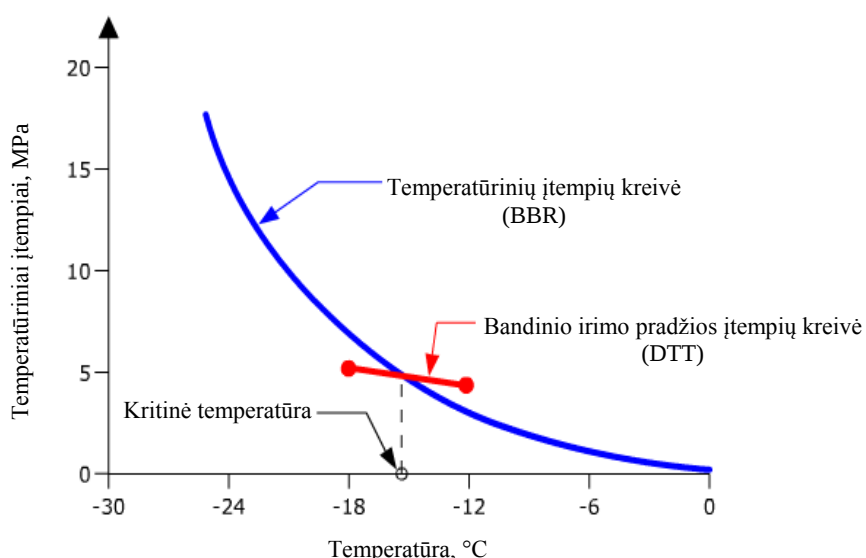
**2.5 pav.** Kritinės temperatūros nustatymas pagal bandinio irimo pradžios deformacijas

rai  $T$  lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300$  MPa, o esant temperatūrai  $T-6$  °C –  $>300$  MPa. Nustatytas lenkimo standis esant skirtingoms bandymo temperatūroms taikant įvairius matematinius modelius perskaičiuojamas į temperatūrinius įtempius.

Tiesioginio tempimo prietaisu su įprastos formos bandiniais bandymas atliekamas esant dviem skirtingoms temperatūroms. Bandymo temperatūros parenkamos taip, kad esant temperatūrai  $T$  bandinio irimo pradžios deformacijos yra  $\geq 1$  %, o esant temperatūrai  $T-6$  °C –  $<1$  %. Atlikus bandymą nustatomi bandinio didžiausi įtempiai atitinkantys bandinio irimo pradžią. Šie įtempiai taip pat vadinami temperatūriniais įtempiais.

Temperatūriniai įtempiai apskaičiuoti pagal lenkiamo strypelio reometru nustatytas lenkimo standžio vertes ir nustatyti tiesioginio tempimo prietaisu pavaizduojami temperatūrinių įtempių priklausomybės nuo temperatūros grafike (2.6 pav.). Kritine temperatūra priimama ta temperatūra, kuriai esant susikerta temperatūrinių įtempių kreivė (BBR) ir bandinio irimo pradžios įtempių kreivė (DTT). Šią kritinės temperatūros nustatymo metodiką reglamentuoja standartas AASHTO R 49 „*Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders*“.

Atkreiptinas dėmesys, kad žinant bitumo kritinę temperatūrą, tačiau norint ją patikrinti, nebūtina atlikti bandymus tiesioginiu tempimo prietaisu su įprastos formos bandiniais esant dviem skirtingoms temperatūroms – bandymą pakanka atlikti esant vienai temperatūrai. Tokiu atveju bandymo temperatūra atitinka 10 °C aukštesnę temperatūrą nei nustatyta kritinė temperatūra. Jeigu tiesioginio tempimo prietaisu su įprastos formos bandiniais nustatytas bandinio irimo pradžios įtempis yra aukščiau nei sudaryta temperatūrinių įtempių kreivė pagal lenkiamo strypelio reometru nustatytas lenkimo standžio vertes, tai laikoma, kad kritinė temperatūra nustatyta teisingai.

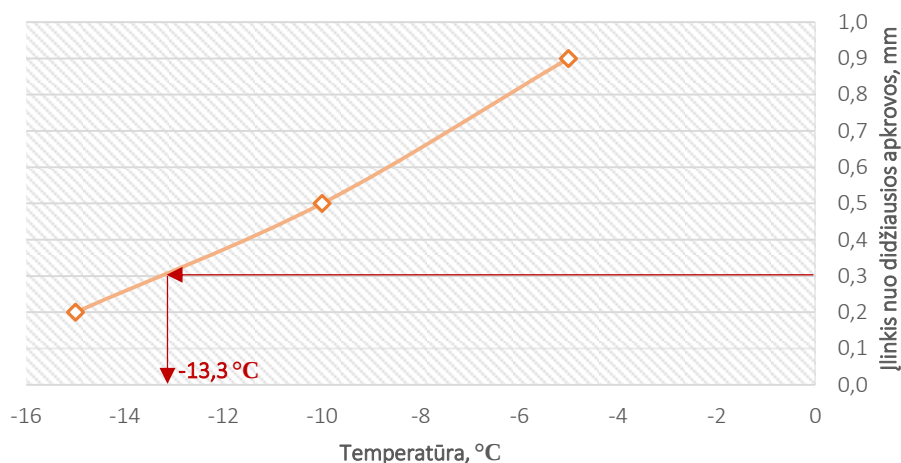


**2.6 pav.** Kritinės temperatūros nustatymo pagal lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu gautus bandymų rezultatus principas

Kritinę temperatūrą nustatant lenkiamo strypelio reometru taikant įpjautus bandinius kritine temperatūra nurodoma žemiausia temperatūra, kuriai esant bandinys įlinksta 0,3 mm bandinį veikiant didžiausia apkrova.

Bandymo metu 40,0 mm ilgio, 12,5 mm pločio ir 25,0 mm aukščio bitumo sijelė su ties viduriu padaryta 5,0 mm įpjova ir įtvirtinta tarp dviejų aliuminio sijelių (bendras sijelės ilgis 120 mm) lenkiama taip, kad bandinys deformuotųsi 0,01 mm/s greičiu. Bandymas laikomas baigtu, kai bitumo sijelė sulūžta, t. y. pasidalina į dvi dalis. Jeigu bandinio įlinkis sijelės trūkimo momentu viršija 1 mm nuo pakoreguotos jėgos ir įlinkio priklausomybės grafiko atskaitos pradžios, tai bandymas atliekamas dar kartą esant žemesnei bandymo temperatūrai. Taikomas ne didesnis kaip 5 °C temperatūros kitimo intervalas tarp bandymo temperatūrų. Bandymas atliekamas esant mažiausiai dviem skirtingoms temperatūroms. Pagal gautus rezultatus nubraižomas įlinkio, veikiant didžiausiai apkrovai, priklausomybės nuo bandymo temperatūros grafikas, ir nustatoma kritinė temperatūra (2.7 pav.). Pabrėžtina, kad krintant bandymo temperatūrai bandinio įlinkis veikiant didžiausiai apkrovai mažėja eksponentiškai. Ši kritinė temperatūra taip pat vadinama atsparumo trūkimui temperatūra ir parodo bitumo trapumo ir elastingumo būsenos ribą, t. y. viršijus šią temperatūrą bitumas tampa trapios būsenos. Bandymo atlikimą ir rezultatų apskaičiavimą reglamentuoja standartas *LST CEN/TS 15963 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo trūkimui temperatūros nustatymas atliekant įpjauto strypo tritaškio lenkimo bandymą“*.

Bitumo atsparumas šalčiui taip pat vertinamas taikant irimo mechanikos dėsnius (angl. *fracture mechanics principles*) išlaikant tiesinės tampriosios irimo mechanikos (angl. *linear elastic fracture mechanics*) sąlygas (bandymas atliekamas taikant tą pačią (aukščiau aptartą) metodiką). Šiuo atveju bitumo atsparumą šalčiui charakterizuoja irimo tūsumas  $K_{IC}$  (angl. *fracture toughness*) ir irimo energija  $G_f$  (angl. *fracture energy*). Irimo tūsumas apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę.



**2.7 pav.** Kritinės temperatūros nustatymas pagal bandinio įlinkį veikiant didžiausiai apkrovai

Tuo tarpu irimo energija išreiškiama ploto, apriboto apkrovos ir įlinkio priklausomybės grafiku, ir ryšio ploto santykiu. Nors šių charakteristikų vertėms nekeliama jokių reikalavimų, tačiau analizuojant duomenis bitumo funkcionavimas charakterizuojamas geriau nei nustatant kritinę temperatūrą lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu taikant įprastus bandinius. Pavyzdžiui, pagal irimo energiją galima įvertinti bitumo modifikavimo laipsnį (Lee, Hesp 1994; Hesp 2004; Velasquez *ir kt.* 2011; Tabatabaee *ir kt.* 2012).

Pabrėžtina, kad su asfalto mišinio funkcionavimu geriausiai koreliuoja nustatytas įlinkis veikiant didžiausiai apkrovai ir irimo energija. (Velasquez *ir kt.* 2011; Tabatabaee *ir kt.* 2012).

$$K_{1C} = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{h}\right); \quad (2.4)$$

čia:  $K_{1C}$  – irimo tūsumas,  $MPa \cdot m^{0,5}$ ;

$P$  – didžiausia apkrova, N;

$L$  – atstumas tarp atramų;

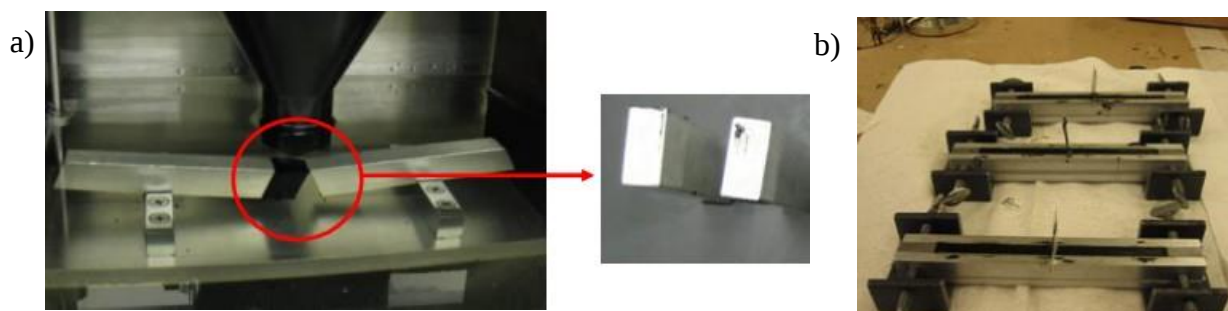
$b$  – bandinio plotis, mm;

$h$  – bandinio aukštis, mm;

$a$  – įpjovos gylis, mm;

$f\left(\frac{a}{h}\right)$  – parametras priklausantis nuo bandinio geometrijos.

R. Velasquez *ir kt.* (2011) pasiūlė vietoj 40,0 mm ilgio bitumo sijelės su ties viduriu padaryta įpjova ir įtvirtinta tarp dviejų aliuminio sijelių (bendras sijelės ilgis 120 mm) naudoti įprastas bitumo sijeles taikomas lenkiamo strypelio reometru juse padarant įpjovą (2.8 pav. b). Tokiu atveju išvengiama bitumo sijelės irimo (trūkimo) ties metaline sijele dėl nepakankamos adhezijos (2.8 pav. a), t. y. užtikrinama, kad sijelė irtų (trūktų) ties įpjova. Atkreiptinas dėmesys, kad sijelės irimo plokštuma turi būti statmena sijelės išilginei ašiai. Priešingu atveju gauti rezultatai yra nekorektiški.

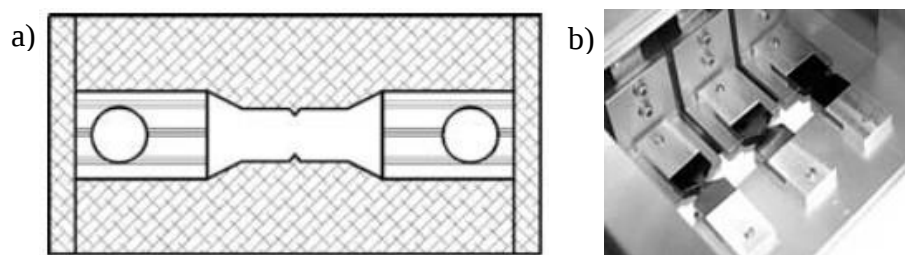


**2.8 pav.** Lenkiamo strypelio reometru naudotini įpjauti bandiniai: a) bitumo ir metalinės sijelės nepakankamo sukibimo (adhezijos) pavyzdys (Velasquez *ir kt.* 2011); b) pasiūlyta bandinių forma (Velasquez *ir kt.* 2011)

Kritinės temperatūros nustatymas naudojant tiesioginio tempimo prietaisą su įpjautais bandiniais yra analogiškas kritinės temperatūros nustatymui pagal lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu gautus bandymų rezultatus taikant įprastus bandinius (2.6 pav.). Pagrindinis skirtumas – tiesioginio tempimo bandymui vietoj įprastų bandinių naudojami įpjauti bandiniai (2.9 pav.). Pabrėžtina, kad taikant įpjautus bandinius rezultatai pasižymi mažesniu variacijos koeficientu ir didesniu pakartojamumu (ypač esant aukštesnėms bandymo temperatūroms) nei naudojant įprastus bandinius. Siekiant, kad esant žemoms temperatūroms bandinys taip greitai nesuirtų (netrūktų) tikslinga bandymo metu taikyti mažesnę deformavimosi greitį (pvz. 1,8 %/min) nei įprastai taikomas (3 %/min) (Mitchell *ir kt.* 2007).

Li *ir kt.* (2006) šiuo metodu nustatydami kritinę temperatūrą taikė dangos konstrukcijos konstantą (angl. *pavement constant*) lygią 1 (įprastai taikoma dangos konstrukcijos konstanta lygi 18), t. y. lenkiamo strypelio reometru nustatytoms lenkimo standžio vertėms perskaičiuojant į temperatūrinius įtempius nebuvo atliktas apskaičiuotų įtempių perskaičiavimas į faktiniame kelyje susidarancius temperatūrinius įtempius. Gauti rezultatai buvo artimi kritinei temperatūrai, nustatytai lenkiamo strypelio reometru ir tiesioginio tempimo prietaisu naudojant įprastus bandinius. Tai leidžia daryti prielaidą, kad dangos konstrukcijos konstantos taikymo metodika yra ne visiškai teisinga ir turi būti peržiūrėta bei atnaujinta.

Atlikus tiesioginio tempimo bandymą su įpjautais bandiniais apie bitumo atsparumą šalčiui taip pat sprendžiama taikant irimo mechanikos dėsnius. Rezultatų nagrinėjimui taikytinas irimo mechanikos modelis priklauso nuo medžiagos elgsenos. G. Gauthier ir D. A. Anderson (2006) gautiems rezultatams analizuoti taikė tiesinę tampriąją irimo mechaniką, tampriąją plastiškąją irimo mechaniką (angl. *elastic plastic fracture mechanics (EPFM)*) ir nuo laiko priklausomą irimo mechaniką (angl. *time dependant fracture mechanics (TDFM)*). Taikant tiesinę tampriąją irimo mechaniką bitumo atsparumas šalčiui įvertinamas pagal irimo tūsumą  $K_{IC}$  ir tiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitį  $G_{IC}$  (angl. *linear strain energy release rate*), taikant tampriąją plastiškąją irimo mechaniką – pagal netiesinio deformavimosi energijos atidavimo greitį  $J_{IC}$  (angl. *non-linear energy release rate*), taikant nuo laiko priklausomą irimo mechaniką – pagal pseudo-deformavimosi energijos atidavimo greitį  $J_{VC}$ .



**2.9 pav.** Tiesioginio tempimo bandymui naudojami įpjauti bandiniai a) bandinys formoje; b) bandinys tiesioginio tempimo prietaise (Mitchell *ir kt.* 2007)

Pabrėžtina, kad taikant tiesinę tampriąją irimo mechaniką ir tampriąją plastiškąją irimo mechaniką tiesiškai tampriai funkcionuojančioms medžiagoms tiesinių deformacijų energijos atidavimo greitis  $G_{IC}$  ir netiesinės energijos atidavimo greitis  $J_{IC}$  yra lygiavertės charakteristikos, vadinamos irimo energijos atidavimo greičiu. Tuo tarpu taikant tampriąją plastiškąją irimo mechaniką ir nuo laiko priklausomą irimo mechaniką tampriai plastiškai funkcionuojančioms medžiagoms netiesinės energijos atidavimo greitis  $J_{IC}$  ir pseudo-energijos atidavimo greitis  $J_{VC}$  yra lygiavertės charakteristikos (Gauthier, Anderson 2006).

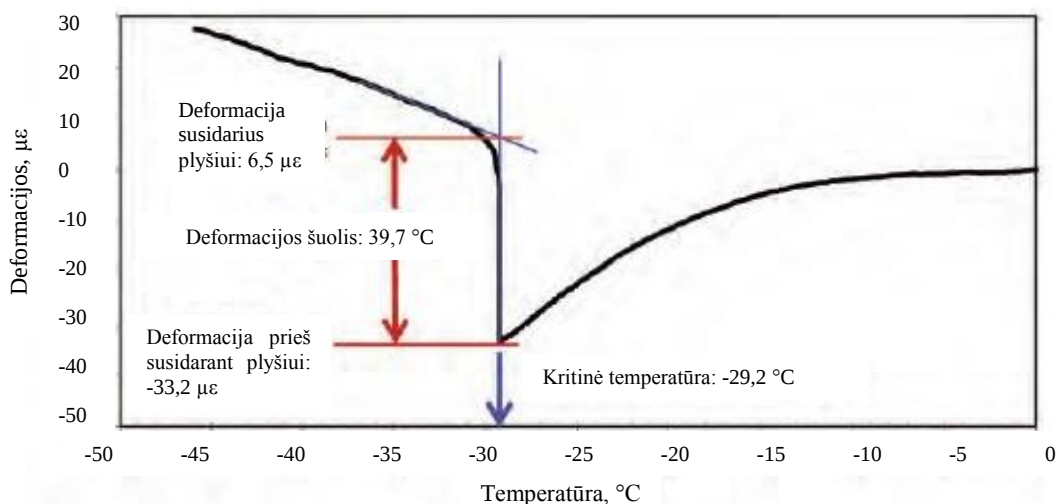
Atlikto tyrimo metu nustatyta, kad bitumui charakterizuoti tiesinę tampriąją irimo mechaniką tikslinga taikytina tik atliekant bandymus žemesnėje temperatūroje nei nustatyta stiklėjimo temperatūra (angl. *glass temperature*), o nuo laiko priklausomą irimo mechaniką rekomenduojama taikyti klampioms–tamprioms medžiagoms.

Šiuo metu nėra nustatyta reikalavimų trūkimo mechanikos charakteristikoms, apibūdinančioms bitumo atsparumą šalčio poveikiui, pagal kurias būtų nustatoma kritinė temperatūra. G. G. Gauthier ir D. A. Anderson (2006) kritinės temperatūros nustatymui pasiūlė taikyti šias irimo mechanikos charakteristikas ir jų vertes:

- irimo tūsumą ( $K_{IC} = 100 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{0,5}$ );
- netiesinės energijos atidavimo greitį ( $J_{IC} = 100 \text{ N/m}$ ) (Hesp 2003);
- pseudo-energijos atidavimo greitį ( $J_{VC} = 100 \text{ N/m}$ ).

G. G. Gauthier (2005) nagrinėjo koreliaciją tarp skirtingų irimo mechanikos charakteristikų ir bitumo kritinių temperatūrų. Geriausia koreliacija pasižymėjo pseudo-energijos atidavimo greitis. Todėl siūloma bitumo atsparumą šalčio poveikiui vertinti taikant nuo laiko priklausomą irimo mechaniką.

Kritinę temperatūrą nustatant bitumo plyšio formavimosi prietaisu kritine temperatūra priimama ta temperatūra, kuriai esant bandinyje susiformuoja plyšys, t. y. staiga ženkliai sumažėja bandinio gniuždančiosios deformacijos – įvyksta deformacijų šuolis (2.10 pav.). Tai tiesioginis

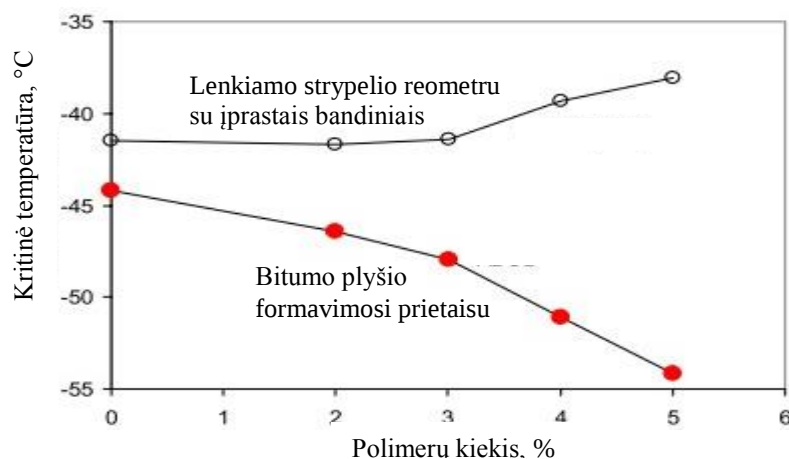


**2.10 pav.** Kritinės temperatūros nustatymas pagal deformacijos šuolį (Kim 2007)

kritinės temperatūros nustatymo metodas, paremtas bitumo traukimosi esant žemoms temperatūroms koncepcija. Todėl geriausiai reprezentuoja bitumo elgseną eksploatuojame kelyje. Taikant šį metodą nereikia atlikti jokių papildomų skaičiavimų, žinoti tiriamojo bitumo reologinių savybių (pvz. lenkimo standį) ar medžiagos tempiamojo stiprio. Jo taikymas ypač rekomenduotinas tiriant inovatyvius, gausiai modifikuotus bitumus.

Bandymo metu apie 50,8 mm skersmens invarinį žiedą, kurio temperatūrinis traukimosi koeficientas yra tik  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ , suformuotas  $14,38 \text{ cm}^3$  tūrio žiedo formos bandinys laikomas klimatinėje kameroje. Pradinė bandymo temperatūra  $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Klimatinėje kameroje palaikomas pastovus temperatūros kritimas: nuo  $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūra krenta  $40 \text{ }^{\circ}\text{C/val.}$  greičiu, o nuo  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $20 \text{ }^{\circ}\text{C/val.}$  greičiu. Bitumas pasižymi ženkliai didesniu temperatūriniu traukimosi koeficientu nei invaras (nuo  $170 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  iki  $200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), todėl traukiantis bitumui invaro žiedas riboja bitumo traukimąsi. To pasekoje susidaro temperatūriniai įtempiai. Jiems viršijus bitumo tempiamąjį stiprį įvyksta staigus gniuždančiųjų deformacijų sumažėjimas, t. y. bandinyje susiformuoja plyšys. Bandymo atlikimą, rezultatų analizavimą ir apskaičiavimą reglamentuoja standartas AASHTO TP 92 „*Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device*“.

Kritinės temperatūros nustatymas bitumo plyšio formavimosi prietaisu yra patikimesnis metodas nei lenkiamo strypelio reometru naudojant įprastus bandinius (ypač esant modifikuotiems bitumams). Tai įrodo S. S. Kim (2007) atliktas tyrimas, kurio metu nustatytos kritinės temperatūros esant skirtingiems polimerų (stireno-butadieno-stireno) kiekiams naudojant lenkiamo strypelio reometrą su įprastais bandiniais ir naudojant bitumo plyšio formavimosi prietaisą (2.11 pav.). Akivaizdu, kad lenkiamo strypelio reometras neteisingai charakterizuoja modifikuotų bitumų funkcionavimą esant žemoms temperatūroms. Tuo tarpu bitumo plyšio formavimosi prietaisu nustatytos kritinės temperatūros žemėja didėjant polimerų kiekiui. Tai atitinka praktikoje stebimą tendenciją, kad mišinių gamybai naudojant polimeriais modifikuotus



**2.11 pav.** Kritinės temperatūros priklausomybė nuo polimerų kiekio (Kim 2007)

bitumus asfalto dangose susidarymo mažiau temperatūrinių plyšių. Panašias idėjas dėl lenkiamo strypelio reometro netinkamumo polimerais modifikuotų bitumų kritinės temperatūros nustatymui pateikė R. N. Dongré *ir kt.* (1991), R. Q. Kluttz, R. N. Dongré (1997) ir D. A. Anderson (1999).

Kritinę temperatūrą nustatant dinaminio šlyties reometru taikant 4 mm skersmens bandinius kritine temperatūra priimama aukštesnioji temperatūra, tenkinanti vieną iš šių sąlygų:

- šlyties įtempių relaksacijos modulis (angl. *shear stress relaxation modulus*) praėjus 7200 s nuo bandinio šliejimo pradžios  $G(7200)$  yra 160 MPa;
- tariamasis relaksacijos greitis (angl. *apparent relaxation rate*) praėjus 7200 s nuo bandinio šliejimo pradžios  $m_r(7200)$  yra 0,26.

Tokiu atveju nustatyta kritinė temperatūra tenkina C. Sui *ir kt.* (2011) rekomenduotinas šlyties įtempių relaksacijos modulio  $G(7200) \leq 160$  MPa ir tariamojo relaksacijos greičio  $m_r(7200) \geq 0,26$  vertes esant žemiausiai dangos konstrukcijos temperatūrai. Šios vertės nustatytos remiantis Amerikos kelių ir transporto asociacijos patvirtinto standarto *AASHTO M 320 „Performance-Graded Asphalt Binder“* reikalavimais, kad lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  yra  $\geq 0,3$  esant 10 °C aukštesnei temperatūrai nei žemiausia dangos konstrukcijos temperatūra. Pabrėžtina, kad ribinės vertės nustatytos esant 0,98644 ir 0,95668 koreliacijos koeficientui atitinkamai tarp lenkimo standžio  $S(t)$  ir šlyties įtempių relaksacijos modulio  $G(t)$  bei tarp lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(t)$  ir tariamojo relaksacijos greičio  $m_r(t)$ .

Šlyties įtempių relaksacijos modulis apskaičiuojamas taikant įvairius perskaičiavimo modelius (pvz., Maksvelo modelį (angl. *Maxwell model*), Christensen–Anderson–Marasteanu (CAM) modelį) šlyties reometru nustatomoms bitumo charakteristikoms – kompleksiniam moduliui  $G^*$  ir fazės kampui  $\delta$ .

Bandymo metu 4 mm skersmens bandinys veikiamas kintančio dažnio sinusoidine šliejimo jėga esant žemai arba vidutinei bandymo temperatūrai. Bandymas atliekamas bent prie dviejų skirtingų temperatūrų. Bandymo atlikimą, rezultatų analizavimą ir apskaičiavimą iš dalies reglamentuoja standartas *AASHTO T 315 „Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer“*, tačiau išsamesnį rezultatų gavimą ir interpretavimą pateikia C. Sui *ir kt.* (2010; 2011).

Šiame poskyryje pateikti bitumo atsparumo šalčiui vertinimo metodai taikytini tiek nesendintam, tiek trumpalaikiu sendinimu ir/arba ilgalaikiu sendinimu pasendintam bitumui.

Nors pasaulyje atlikta daug mokslinių tyrimų bitumo atsparumo šalčiui vertinimo tematikoje, tačiau nėra vieningos nuomonės apie tinkamiausią metodą kritinės temperatūros nustatymui. To priežastis – bitumo atsparumo šalčiui įvertinimas laboratoriniais metodais ir gautų rezultatų palyginimas su faktiniu dangos konstrukcijos funkcionavimu yra procesas, reikalaujantis daug žmogiškųjų, laiko ir finansinių sąnaudų.

## 2.2. Reikalavimai asfalto mišinių ir jų komponentų charakteristikoms atsižvelgiant į atsparumą plastinėms deformacijoms ir temperatūriniams plyšiams

Asfalto dangos funkcionavimas priklauso nuo asfalto sluoksnių storio ir asfalto mišinio medžiagų (mineralinių medžiagų mišinio ir bitumo) bei paties mišinio charakteristikų. Įprastai asfalto sluoksnių storio parinkimas yra reglamentuotas norminiais dokumentais ir priklauso nuo projektinės apkrovos dydžio. Tačiau šiuose dokumentuose dažniausiai nenurodomos reikalaujamos asfalto mišinio charakteristikos. Todėl pastarosios parenkamos kiekvienu atveju individualiai atsižvelgiant į vietovės klimatinės sąlygas ir pageidaujamą dangos funkcionavimą arba taikant papildomus asfalto mišinių projektavimą reglamentuojančius dokumentus. Lietuvoje asfalto mišiniai projektuojami remiantis *Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašu TRA ASFALTAS 08*.

Praktika rodo, kad Lietuvoje naudojami asfalto mišiniai nėra atsparūs plastinėms deformacijoms ir temperatūriniams plyšiams. Todėl siekiant išvengti šių pažeidimų susidarymo asfalto dangose būtina taikyti griežtesnius reikalavimus mineralinių medžiagų mišinio, bitumo ir asfalto mišinio charakteristikoms.

### *Reikalavimai mineralinių medžiagų mišiniui*

Mineralinių medžiagų mišinio dalelės yra pagrindinis asfalto mišinio komponentas lemiantis transporto priemonių perduodamų apkrovų atlaikymą. Stiprus asfalto mišinio karkasas pasižymi dideliu stiprumu šlyčiai ir užtikrina asfalto mišinio atsparumą plastinėms deformacijoms (Cross, Brown 1992; Huang *ir kt.* 2009; Golalipour *ir kt.* 2012).

Atsparumo plastinių deformacijų aspektu rekomenduojama taikyti mineralinių medžiagų mišinius atitinkančius formos rodiklio  $SI_{20}$  ir plokštumo rodiklio  $FI_{20}$  kategoriją. Kubinės stambiosios skaldytosios mineralinių medžiagų dalelės lemia standesnę asfalto mišinį (Li, Kett 1967; Stephens, Sinha 1978; Topal, Sengoz 2005; Arasan *ir kt.* 2011).

Mineralinių medžiagų dalelės asfalto mišinio tankinimo metu ir dėl transporto priemonių poveikio smulkėja (trupa). To pasekoje pakinta projektinė asfalto mišinio mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis sąlygojanti asfalto mišinio tūrinių charakteristikų pokytį (Collins *ir kt.* 1997). Mineralinių medžiagų dalelių smulkėjimas (trupėjimas) apribojamas nurodant reikalaujamą atsparumo trupinimui kategoriją (Erichsen *ir kt.* 2011). Asfalto viršutiniam sluoksniui atsparumas trupinimui pagal Los Andželo koeficientą turi tenkinti  $LA_{20}$  kategoriją.

Reikalaujama, kad asfalto viršutinis sluoksnis būtų atsparus slydimui, t. y. būtų užtikrinamas pakankamas dangos ir padangos sukibimas. Dangos atsparumas slydimui mažėja dėl paviršiaus poliruojamumo. Mineralinių medžiagų atsparumas poliruojamumui priklauso nuo mineralinių medžiagų rūšies (kalkakmenis, granitas, dolomitas, gabras ir kt.). Asfalto mišinio

atsparumą slydimui taip pat sąlygoja tuštymių dydis ir kiekis tarp sutankinto asfalto mišinio mineralinių medžiagų dalelių (Fwa *ir kt.* 2003). Mineralinių medžiagų mišiniai, pasižymintys didesne atsparumo poliruojamumui (PSV) verte, lemia didesnę asfalto mišinio atsparumą slydimui (Kane *ir kt.* 2012). Atsižvelgiant į tai rekomenduojama asfalto viršutiniam sluoksniui taikyti  $PSV_{50}$  atsparumo poliruojamumui kategoriją.

Skaldytos stambiosios mineralinių medžiagų dalelės pasižymi dideliu vidinės trinties kampu. O tai užtikrina stiprų asfalto mišinio karkasą. Jeigu asfalto mišinio mineralinių medžiagų mišinyje naudojamas per mažas skaldytų mineralinių medžiagų dalelių kiekis, tai asfalto mišinys tampa jautrus plastinių deformacijų formavimuisi (Yeggoni *ir kt.* 1996; Arasan *ir kt.* 2011; Singh *ir kt.* 2012). Todėl siekiant tinkamo asfalto mišinio funkcionavimo esant didelėms statinėms apkrovoms rekomenduojama asfalto mišinio gamybai naudoti mineralinių medžiagų mišinius atitinkančius stambiosios mineralinės medžiagos dalelių kategoriją pagal aptrupėjusio ir skelto paviršiaus procentą  $C_{100/0}$ .

Didelio tankio mineralinių medžiagų mišiniuose dalelės labiau sąveikauja tarpusavyje ir pasižymi mažesniu oro tuštymių kiekiu nei mažo tankio mineralinių medžiagų mišiniuose. Pabrėžtina, kad tankios struktūros asfalto mišiniai (pvz. asfaltbetonis), kuriuose vyrauja smulkiųjų mineralinių medžiagų mišiniai yra praktiškai tokio paties atsparumo plastinėms deformacijoms kaip stambiųjų mineralinių medžiagų mišiniai (Kandhal, Cooley 2002). Manoma, kad tarpinės struktūros asfalto mišiniai (pvz. skaldos ir mastikos asfaltas) yra atspariausias asfalto mišinys taikytinas asfalto viršutiniam sluoksniui įrengti (Newcomb, Hansen 2006). Be to mineralinių medžiagų mišiniai, kuriuose yra didesnis didžiausias nominalus mineralinių medžiagų mišinio dalelės dydis pasižymi didesniu asfalto mišinio atsparumu plastinėms deformacijoms (Siddharthan *ir kt.* 2002; Hafeez *ir kt.* 2012).

#### *Reikalavimai bitumui*

Asfalto mišinio rišiklis – bitumas – padengia ir sujungia mineralinių medžiagų mišinio daleles į vieną kompozitą. Reologiniu požiūriu tai yra medžiaga, kurios elgsena priklauso nuo temperatūros ir šlyties įtempių. Ji įgyja kieto kūno, klampaus-tampraus kūno arba Niutono skysčio savybes (Sybilski 1994). Vadinasi skirtinga bitumo elgsena sąlygoja skirtingą asfalto mišinio funkcionavimą.

Pasaulyje naudojami dviejų rūšių bitumai: nemodifikuotasis (kelių bitumas) ir polimerais modifikuotasis bitumas. Siekiant padidinti asfalto mišinio atsparumą plastinių deformacijų ir temperatūrinių plyšių susidarymui tikslinga taikyti polimerais modifikuotą bitumą (Collins *ir kt.* 1997; Lu, Isacsson 1997; Marasteanu, Anderson 1998; Dimonie *ir kt.* 2006; Lee *ir kt.* 2007; Lesueur 2009).

Atsižvelgiant į atsparumą plastinių deformacijų susidarymui asfalto mišinio gamybai rekomenduojama naudoti kietesnius bitumus, kurių penetracija esant 25 °C temperatūrai yra 35–50 dmm. Bitumai, kurių penetracija esant 25 °C temperatūrai yra mažesnė nei 30 dmm, yra labai kieti (trapūs) ir imlūs temperatūrinių plyšių susidarymui. Kita vertus bitumai pasižymintys didele penetracijos verte esant 25 °C temperatūrai (pvz. didesne nei 50–70 dmm) yra neatsparūs plastinių deformacijų susidarymui. Apskritai penetracija esant 25 °C temperatūrai parodo bitumo konsistenciją: kuo didesnė penetracijos vertė, tuo bitumas minkštesnis ir kuo mažesnė – tuo kietesnis. Jei penetracija esant 25 °C temperatūrai yra mažesnė nei 30 dmm bitumas laikomas kietu, o jei didesnė nei 100 dmm – minkštu (Lee *ir kt.* 2007; Lesueur 2009).

Minkštėjimo temperatūra parodo bitumo elgseną esant aukštai aplinkos temperatūrai ir yra laikoma bitumo klampios-tamprios būsenos riba. Įprastai kelių bitumo minkštėjimo temperatūra yra apie 40–60 °C priklausomai nuo bitumo rūšies. Tuo tarpu modifikuotųjų bitumų minkštėjimo temperatūra kai kuriais atvejais yra aukštesnė nei 80 °C priklausomai nuo bitume esančių polimerų kiekio (Planche *ir kt.* 1996; Airey 2003; Lesueur 2009; Liang *ir kt.* 2014). Viršijus minkštėjimo temperatūrą, t. y. bitumui perėjus iš klampios-tamprios būsenos į plastišką, bet koks apkrovos poveikis pasireiškia sparčiu plastinių deformacijų vystymusi. Todėl siekiant išvengti plastinių deformacijų susidarymo asfalto dangose asfalto mišinio gamybai parenkamo bitumo minkštėjimo temperatūra neturi viršyti numatomos aukščiausios asfalto dangos temperatūros.

Bitumo klampa esant tam tikrai temperatūrai charakterizuoja bitumo elgseną toje temperatūroje. Įprastai bitumo klampa nustatoma esant 60 °C, 90 °C ir/arba 135 °C temperatūrai. Kiekviena temperatūra atitinkamai parodo bitumo elgseną dangos naudojimo, tankinimo ir bitumo tekėjimo vamzdžiais metu. Siekiant išvengti plastinių deformacijų susidarymo rekomenduojama asfalto mišinių gamybai taikyti ne mažesnę kaip 200 Pa·s dinamine klampa pasižyminčius bitumus (dinaminė klampa nustatoma esant 60 °C bandymo temperatūrai) (Pavement... 2011).

Jeigu asfalto mišinio tankinimo metu bitumo klampa yra per maža, tai asfalto mišinys dėl bitumo paslankumo išstumiamas į tankintuvo priekį. Priešingu atveju, t. y. esant per didelės klamos bitumui, nepasiekiamas reikalaujamas asfalto mišinio sutankinimas. Siekiant tinkamo bitumo sutankinimo bitumo klampa tankinimo metu turi būti nuo 2 Pa·s iki 20 Pa·s (Read, Whiteoak 2003).

Labai svarbu užtikrinti optimalią bitumo klampą asfalto mišinio maišymo metu. Per didelės klamos bitumas nepadengia visų mineralinių medžiagų mišinio dalelių. To pasekoje neužtikrinamas asfalto mišinio homogeniškumas ir vientisumas. Tuo tarpu labai mažos klamos bitumas padengia visas mineralinių medžiagų mišinio daleles, tačiau sandėliavimo ir/arba transportavimo metu dažnai nuteka nuo mineralinių medžiagų mišinio dalelių. Siekiant užtikrinti

tinkamą mineralinių medžiagų mišinio dalelių padengimą bitumu rekomenduojama, kad bitumo klampa būtų apie 0,2 Pa·s (Read, Whiteoak 2003).

Remiantis Amerikos kelių ir transporto asociacijos patvirtinto standarto *AASHTO M 320 „Performance-Graded Asphalt Binder“* reikalavimais nesendinto bitumo dinaminė klampa esant 135 °C temperatūrai neturi viršyti 3,0 Pa·s.

Bitumo reologinės savybės charakterizuojamos kompleksiniu šlyties moduliu  $G^*$  ir fazės kampu  $\delta$ . Kompleksinis šlyties modulis atspindi bitumo atsparumą cikliniam šliejimui. Tuo tarpu fazės kampas – bitumo klampią-tamprią elgseną. Bitumas, kurio fazės kampas yra lygus 0 °, laikomas visiškai tampriu, o esant 90 ° fazės kampui – visiškai klampiu. Atsižvelgiant į atsparumą palstinėms deformacijoms pageidautina asfalto mišinio gamybai taikyti bitumą pasižymintį kuo didesniu kompleksiniu šlyties moduliu  $G^*$  ir kuo mažesniu fazės kampu  $\delta$ . Išlaikant šias sąlygas bitumas labiau priešinasi deformavimuisi ir greičiau atsistato (grįžta) į pradinę padėtį po apkrovos pašalinimo (Oliver, Tredrea 1998; Airey 2003). Todėl reikalaujama, kad kompleksinio šlyties modulio ir sinuso fazės kampo santykis  $G^*/\sin\delta$  nesendintam bitumui būtų ne mažesnis kaip 1,0 kPa, o trumpalaikiu sendinimu veikiant šilumai ir orui sendintam bitumui ne mažesnis kaip 2,2 kPa (Bahia, Anderson 1995).

Lenkimo standis ir lenkimo standžio kitimo rodiklis po 60 s apkrovimo laikotarpio bei žema kritinė temperatūra charakterizuoja bitumo elgseną esant žemoms temperatūroms, t. y. bitumo atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui. Krintant asfalto dangos temperatūrai, asfalto mišinio ir bitumo standumas didėja. Maža lenkimo standžio kitimo rodiklio vertė siejama su lėtu temperatūrinių įtempių mažėjimu („atidavimu“) (Lu ir kt. 1998). Esant per daug standžiam bitumui jis tampa trapus, o to pasekoje susidaro temperatūriniai plyšiai. Atsižvelgiant į atsparumą temperatūrinių plyšių susidarymui esant kritinei žemai dangos temperatūrai lenkimo standis po 60 s apkrovimo laikotarpio neturi būti didesnis nei 300 MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklis po 60 s apkrovimo laikotarpio neturi būti mažesnis nei 0,3 (Lu, Isacsson 2001; Marasteanu 2004).

Tamprioji atstata parodo modifikuoto bitumo gebėjimą atsistatyti (grįžti) į pradinę padėtį. 0 % tamprioji atstata reiškia, kad bitumas visiškai neatsistato po apkrovos pašalinimo, o 100 % tamprioji atstata – kad bitumas visiškai atsistato po apkrovos pašalinimo. Vadinasi pagal tampriosios atstatos vertes galima spręsti apie bitumo modifikavimo laipsnį, t. y. bitume esančių elastomerų kiekį (Isacsson; Lu 1995). Siekiant, kad asfalto mišinys būtų atsparus plastinėms deformacijoms, rekomenduojama asfalto mišinio gamybai taikyti bitumus pasižyminčius ne mažesne kaip 90 % tampriąja atstata.

### *Reikalavimai asfalto mišiniui*

Įprastai asfalto mišinio projektavimas grindžiamas asfalto mišinio tūrinėmis savybėmis. Lietuvoje projektuojamiems asfalto mišiniams nurodyti reikalavimai tik mažiausiam bitumo kiekiui ir oro tuštymių kiekiui, t. y. nenurodyti reikalavimai mineralinių medžiagų tuštymių kiekiui, oro tuštymių, užpildytų bitumu, kiekiui, absorbuotajam bitumo kiekiui, efektyviajam bitumo kiekiui ir bitumo plėvelės storiui.

Mineralinių medžiagų tuštymių kiekio reikalavimas grindžiamas reikalaujama mažiausiu bitumo kiekiu atsižvelgiant į mišinio tipą ir granulimetrinę mineralinių medžiagų sudėtį. Atlikti moksliniai tyrimai rodo, kad mineralinių medžiagų tuštymių kiekio reikalavimas gali būti grindžiamas tariamuoju bitumo plėvelės storio. P. S. Kandhal *ir kt.* (1998) nustatė, kad esant 8 % asfalto mišinio sutankinimui optimalus bitumo plėvelės storis yra 9–10  $\mu\text{m}$ . Tokiu atveju asfalto mišiniui, pasižyminčiam 12,5 mm nominaliu didžiausiu mineralinių medžiagų dalelės dydžiu ir 4 % oro tuštymių kiekiu, mažiausias mineralinių medžiagų tuštymių kiekis yra 15,5 %. Tačiau W. J. Christopher *ir kt.* (2011) pabrėžė, kad didžiausiu atsparumu plastinėms deformacijoms pasižymi asfalto mišiniai, kurių tariamasis plėvelės storis yra nuo 7  $\mu\text{m}$  iki 9  $\mu\text{m}$ . Kelių tiesyboje vyrauja nuomonė, kad asfalto mišiniai pasižymintys didesniu tariamuoju bitumo plėvelės storio yra linkę plastiškai deformuotis. Tuo tarpu asfalto mišinius, kurių tariamasis bitumo plėvelės storis yra mažesnis kaip 7  $\mu\text{m}$ , sudėtinga tinkamai įrengti. Remiantis užsienio šalių patirtimi asfalto mišiniui, pasižyminčiam 12,5 mm nominaliu didžiausiu mineralinių medžiagų dalelės dydžiu, reikalaujamas mažiausias mineralinių medžiagų tuštymių kiekis –14 % (Kandhal *ir kt.* 1998; Sengoz, Topal 2007).

Pasaulyje vykdomi dangos konstrukcijos funkcionavimo tyrimai parodė, kad asfalto mišiniai, pasižymintys oro tuštymių kiekiu nuo 3 % iki 5 % nėra linkę deformuotis. Pabrėžtina, kad mažesnis nei 3 % oro tuštymių kiekis sąlygoja plastinių deformacijų susidarymą. Tuo tarpu asfalto mišiniai pasižymintys 6 % oro tuštymių kiekiu laikomi pralaidžiais vandeniui (Quintus *ir kt.* 1991).

Asfalto mišinių mechaninės charakteristikos skirstomos į dvi grupes: į charakteristikas, įvertinančias apkrovų poveikį – standumas, atsparumas nuovargiui ir atsparumas plastinėms deformacijoms – ir į charakteristikas, įvertinančias klimatinių veiksnių poveikį – atsparumas temperatūrinių plyšių susidarymui ir atsparumas vandeniui.

Asfalto mišinio standumas priklauso nuo temperatūros: temperatūrai didėjant asfalto mišinio standumas mažėja, o temperatūrai mažėjant – didėja (Motiejūnas *ir kt.* 2010). Atsižvelgiant į atsparumą plastinėms deformacijoms pageidautina, kad esant aukštai dangos temperatūrai asfalto mišinys būtų kuo standesnis. Tačiau esant žemoms temperatūroms tokio tipo asfalto mišinys tampa labai kietas, o tai lemia temperatūrinių plyšių susidarymą. Todėl asfalto

mišinys turi būti parenkamas taip, kad jo standumas tenkintų atsparumą plastinių deformacijų ir temperatūrinių plyšių susidarymą (Pellinen 2004). Reikalaujama, kad asfalto viršutinio sluoksnio mažiausias standumo modulis kistų nuo 4500 MPa iki 9000 MPa priklausomai nuo apkrovos ir sluoksnio storio (French... 2009).

Dangos konstrukcijose dėl apkrovų ir klimatinių veiksnių poveikio pasireiškia degradacijos procesas, o tai lemia nuovargio plyšių susidarymą. Šis reiškinys sietinas su tempiamųjų įtempių bei deformacijų asfalto sluoksnio apačioje viršijimu. Pabrėžtina, kad asfalto sluoksnių tempiamieji įtempiai kinta priklausomai nuo asfalto sluoksnio storio pagal kubinę funkciją. Todėl asfalto sluoksnio storio didinimas yra efektyvesnė priemonė nuovargio plyšių susidarymui mažinti nei didesnio standumo modulio asfalto mišinio taikymas (Timm, Newcomb 2006). Atsparumas nuovargio plyšiams užtikrinamas apribojant tempiamąsias deformacijas. Rekomenduojama, kad viršutinio asfalto sluoksnio tempiamosios deformacijos po  $10^6$  apkrovimo ciklų būtų didesnės nei 100–130  $\mu$  (French... 2009).

Keliami reikalavimai asfalto mišinio atsparumui plastinėms deformacijoms įvertinti priklauso nuo taikomo bandymo metodo. Vienas iš plačiausiai naudojamų laboratorinių bandymų, įvertinančių asfalto mišinio atsparumą plastinėms deformacijoms, – rato riedėjimo vėžės bandymas. Tačiau keliami reikalavimai taip pat priklauso nuo bandymui atlikti taikomo prietaiso dydžio (didelis ar mažas) ir bandymo sąlygų (apkrovos dydžio, užkrovimo ciklų skaičiaus, temperatūros, bandymo atlikimo aplinkos). Prancūzijos civilinės aviacijos centras (angl. *the French civil aviation center*) (2009) reikalauja, kad provėžos gylis po 10000 užkrovimo ciklų skaičiaus neviršytų 7,5–15,0 mm esant 60 °C bandymo temperatūrai (esant didelio standumo asfalto mišiniui bandymas atliekamas taikant 30000 užkrovimo ciklų). Šiuo atveju bandymas atliekamas dideliu prietaisu. Kituose šaltiniuose nurodoma, kad aukšto standumo modulio viršutinio sluoksnio asfalto mišiniai neturi deformuotis daugiau kaip 3 % po 100000 užkrovimo ciklų skaičiaus (Mapoula-Chardonnet *ir kt.* 2014). Kolorado transporto departamentas nurodo, kad didžiausias provėžos gylis po 10000 ir 20000 užkrovimo ciklų skaičiaus atitinkamai neturi viršyti 4 mm ir 10 mm.

Asfalto mišinio reakcija į statinių apkrovų poveikį charakterizuojama statiniu moduliu. Bandymo metu bandinys 300 s apkraunamas tokia statine apkrova, kad deformacijų amplitudė būna apie 200  $\mu$ . Bandymas atliekamas esant 30 °C temperatūrai. Reikalaujamas ne mažesnis kaip 200 MPa statinis modulis (French... 2009).

Asfalto mišinio atsparumas temperatūrinių plyšių susidarymui charakterizuojamas kritine temperatūra, kuriai esant bandinyje susiformuoja plyšys, t. y. bandinys pasidalina į dvi dalis. Ši temperatūra nustatoma atliekant vienašio tempimo bandymą (Isacsson, Zeng 1998b).

Reikalaujama kritinė temperatūra atitinka žemiausią aplinkos temperatūrą, kurioje bus naudojamas projektuojamas asfalto mišinys.

Asfalto mišinio atsparumas vandeniui charakterizuojamas tempiamojo stiprio santykiu. Įprastai asfalto mišiniams rekomenduojamas mažiausias tempiamojo stiprio santykis – 70 % arba 80 % (Kennedy, Anagnos 1984; Roberts *ir kt.* 1996; French... 2009; Mapoula-Chardonnet *ir kt.* 2014). T. W. Kennedy ir J. N. Anagnos (1984) pabrėžė, kad asfalto mišiniai pasižymintys mažesniu nei 70 % tempiamojo stiprio santykiu yra jautrūs vandeniui.

### **2.3. Teorinis bitumo atsparumo šalčiui modelis**

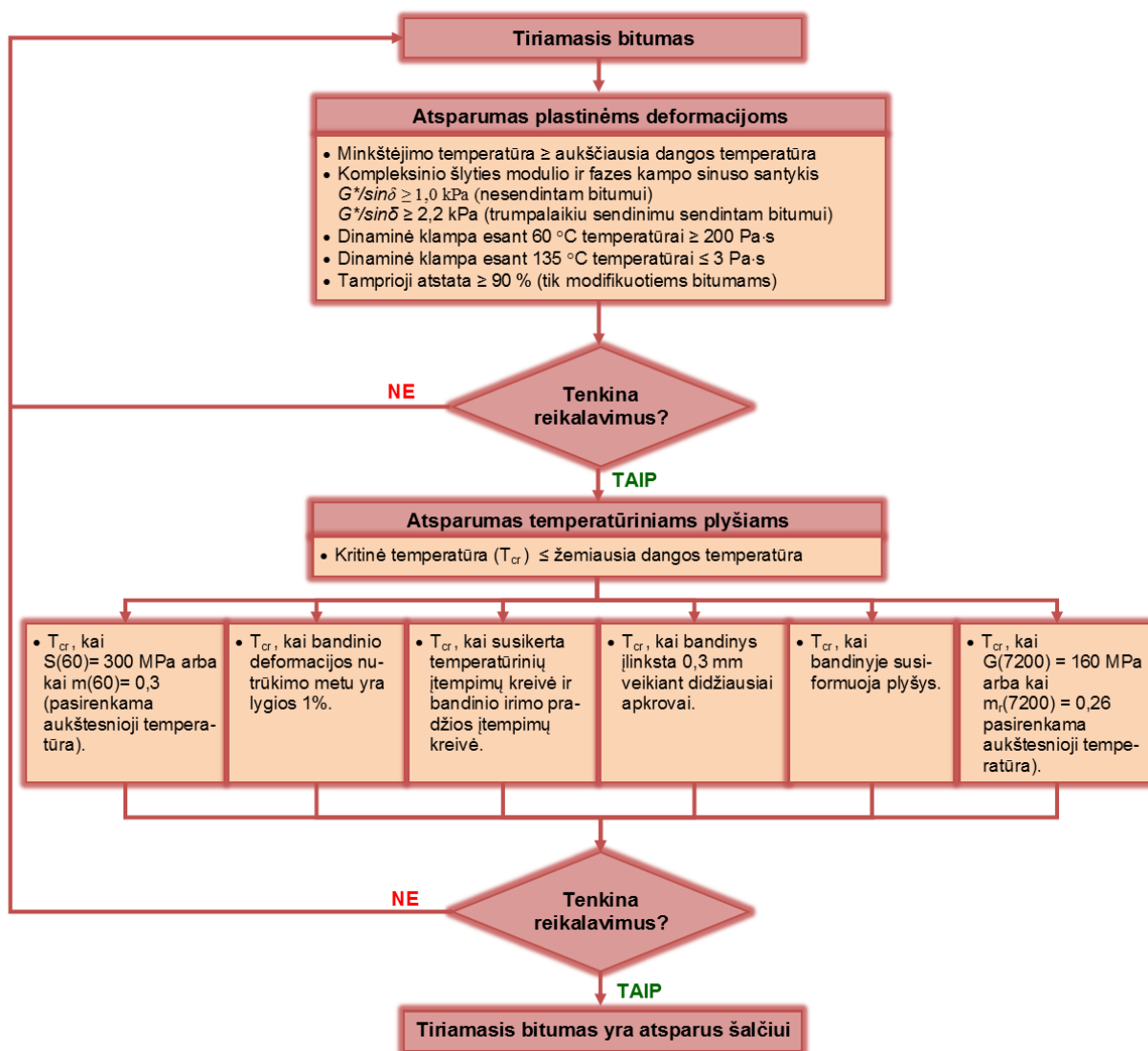
Asfalto mišinio funkcionavimas glaudžiai siejamas su asfalto mišinio gamybai parinkto bitumo savybėmis. Tinkamai parinktas bitumas esant optimaliai mineralinių medžiagų mišinio granulimetrinei sudėčiai užtikrina asfalto dangos naudojimą be pirmalaikių dangos struktūros pažeidimų susidarymo.

Statinų apkrovų poveikio zonose dėl vyraujančios apkrovos specifiškumo bitumo parinkimas yra diskutuotinas klausimas. Asfalto mišinio gamybai taikant kietesnius bitumus apribojamas plastinių deformacijų susidarymas, tačiau toks asfalto mišinys yra jaurus temperatūrinių plyšių susidarymui. Temperatūriniai plyšiai nesusidaro arba jų mastas yra ženkliai mažesnis naudojant minkštus bitumus. Deja, su tokiais bitumais pagaminti asfalto mišiniai yra itin imlūs plastinių deformacijų susidarymui, ypač esant didelėms, ilgalaikėms statinėms apkrovoms. Todėl sprendžiant šias dvi problemas, reikalaujančias viena kitai prieštaringų sprendinių, rekomenduojama vadovautis teoriniu statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modeliu, sudarytu remiantis 2.2 poskyryje pateiktais reikalavimais bitumui (2.12 pav.).

Teorinį statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį galima suskirstyti į du etapus. Pirmajame etape užtikrinamas tiriamojo bitumo atsparumas plastinėms deformacijoms. Kelių tiesyboje laikomasi nuostatos, kad asfalto mišiniai, atsparūs plastinėms deformacijoms, yra atsparūs statinių apkrovų poveikiui. Jeigu tiriamasis bitumas netenkina atsparumo plastinių deformacijų kriterijų, tai toks bitumas netaikytinas statinių apkrovų poveikio zonose naudojamiems asfalto mišiniams gaminti. Tokiu atveju grįžtama į statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio pradžią, pasirenkamas kitas tiriamasis bitumas ir kartojamos atsparumo plastinėms deformacijoms tikrinimo procedūros. Priešingu atveju, t. y. jeigu tiriamasis bitumas tenkina atsparumo plastinėms deformacijoms kriterijus, bitumas tiriamas toliau atsparumo temperatūrinių plyšių aspektu.

Antrajame teorinio statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio etape užtikrinamas tiriamojo bitumo atsparumas temperatūriniams plyšiams. Atkreiptinas dėmesys, kad bitumo atsparumas temperatūriniams plyšiams vertinamas pasirenkant

vieną iš šešių užsienio šalyse taikomų metodikų, apibrėžiamų skirtingomis kritinės temperatūros nustatymo ribinėmis sąlygomis. Kritinės temperatūros nustatymui taikomos metodikos pasirinkimą dažniausiai lemia turima laboratorinė įranga. Siekiant tiksliausio šalčio poveikio bitumui įvertinimo, pasirenkant taikytiną metodiką būtina atsižvelgti į mokslininkų atliekamus naujausius tyrimus kritinės temperatūros ir jos koreliacijos su faktiniu kelio funkcionavimu nustatymo tematikoje. Jeigu tiriamasis bitumas netenkina atsparumo temperatūriniais plyšiams kriterijų, tai toks bitumas netaikytinas toje vietovėje naudotiniams asfalto mišiniams gaminti. Tokiu atveju grįžtama į statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio pradžią, pasirenkamas kitas tiriamasis bitumas ir kartojamos atsparumo platinėms deformacijoms ir temperatūriniais plyšiams tikrinimo procedūros. Priešingu atveju, t. y. jeigu tiriamasis bitumas tenkina atsparumo temperatūriniais plyšiams kriterijus, tiriamasis bitumas laikomas atspariu šalčiui ir naudotinu statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai.



**2.12 pav.** Teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis

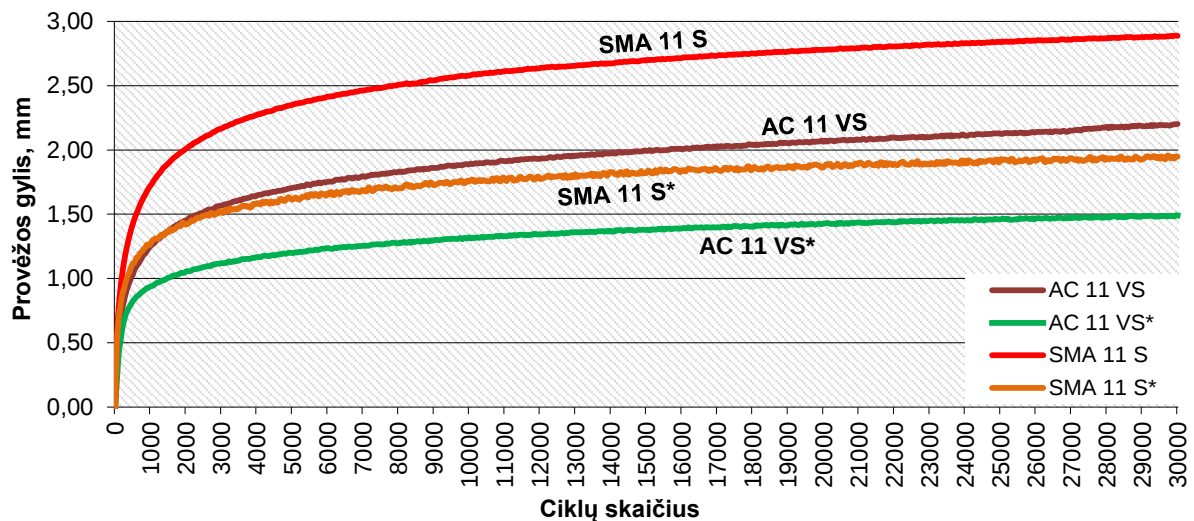
Modelyje pateiktų charakteristikų nustatymui taikomi Lietuvos standartizacijos departamento arba Amerikos kelių ir transporto asociacijos (jeigu Lietuvoje nėra analogiško norminio dokumento) patvirtinti standartai (2.1 lentelė).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Civilinės inžinerijos mokslo centro Kelių technologijų laboratorijoje vykdant dalinai Europos socialinio fondo finansuojamą projektą „Taškinėms statinėms ir dinaminėms apkrovoms atsparios susisiekimo komunikacijų dangos konstrukcijos, pritaikytos besikeičiančio klimato sąlygoms, modelis“ (projekto kodas VP1-3.1-ŠMM-10-V-02-022) sukurti 4 asfalto mišiniai taikytini statinių apkrovų poveikio zonose. Asfalto mišinių gamybai naudotas vienos rūšies bitumas, parinktas pagal 2.12 pav. pateiktąjį modelį. Sukurtų asfalto mišinių atsparumas plastinėms deformacijoms įvertintas atlikus rato riedėjimo vėžės bandymą bandinį apkraunant 1,52 kN rato apkrova esant 60 °C temperatūrai (2.14 pav.). Prognozuojama, kad sukurtuose asfalto mišiniuose temperatūriniai plyšiai dėl žemų temperatūrų poveikio pasireikš tik viršijus -28,20 °C temperatūrą.

Šio modelio pritaikymas aptartajame projekte pagrindė jo tinkamumą statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui įvertinti.

**2.1 lentelė.** Bitumo charakteristikoms nustatyti taikomi standartai

| Charakteristika                     | Standartas                                                                                                                                        |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Atsparumas plastinėms deformacijoms |                                                                                                                                                   |
| Minkštėjimo temperatūra             | LST EN 1427 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas“                                      |
| Kompleksinis šlyties modulis        | LST EN 14770 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR)“         |
| Fazės kampas                        |                                                                                                                                                   |
| Dinaminė klampa                     | LST EN 12596 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Dinaminės klamos nustatymas vakuuminiu kapiliaru“                                                  |
|                                     | LST EN 13302 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Bituminio rišiklio dinaminės klamos nustatymas naudojant sukųjį klampomatį“                        |
|                                     | LST EN 13702 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Modifikuoto bitumo dinaminės klamos nustatymas kūgio ir plokštės metodu“                           |
| Tamprioji atstata                   | LST EN 13398 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Modifikuoto bitumo tampriosios atstatos nustatymas“                                                |
| Atsparumas šalčiui                  |                                                                                                                                                   |
| Kritinė temperatūra                 | LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“                                   |
|                                     | LST EN 12593 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Trapumo temperatūros pagal Frasą nustatymas“                                                       |
|                                     | LST CEN/TS 15963 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo trūkimui temperatūros nustatymas atliekant įpjauto strypo tritaškio lenkimo bandymą“ |
|                                     | AASHTO T 314 „Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)“                           |
|                                     | AASHTO R 49 „Standard Practice for Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders“                                    |
|                                     | AASHTO TP 92 „Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device“                                    |



2.13 pav. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių atsparumas rato riedėjimui

## 2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus užsienio šalyse taikomus bitumo atsparumo šalčiui metodus nustatyta, kad kritinės temperatūros nustatymo ribinės sąlygos yra skirtingos ir priklauso nuo metodo.
2. Bitumo atsparumas plastinėms deformacijoms (statinėms apkrovoms) užtikrinamas pagal minkštėjimo temperatūrą, kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo sinuso santykį, dinaminę klampą ir tampriąją atstatą, o atsparumas temperatūriniais plyšiams (šalčiui) – pagal kritinę temperatūrą.
3. Teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis susideda iš dviejų etapų: pirmas etapas – bitumo atsparumo plastinėms deformacijoms užtikrinimas; antras etapas – bitumo atsparumo temperatūriniais plyšiams užtikrinimas.
4. Bitumas laikomas šalčiui atspariu, jeigu bandymais nustatyta kritinė temperatūra yra žemesnė nei žemiausia asfalto dangos temperatūra bitumo taikymo vietoje.
5. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio tinkamumas turi būti pagrįstas laboratoriniais ir lauko tyrimais atsižvelgiant į skirtingų metodų įtaką kritinės temperatūros vertei.

### 3. BITUMO ATSPARUMO ŠALČIUI EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Remiantis teoriniu statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modeliu bitumo atsparumas šalčiui įvertinamas pagal bitumo kritinę temperatūrą. Kuo kritinė temperatūra žemesnė, tuo bitumas atsparesnis šalčiui. Kritinės temperatūros nustatymui pasaulyje taikomi net keli metodai – BBR, DTT, SENB, DENT, ABCD ir kt. (2.1 poskyris).

Lietuvoje bitumo atsparumas šalčiui vertinamas tik pagal trapumo temperatūrą, nustatytą pagal Frasą. Atliekami moksliniai tyrimai rodo, kad trapumo temperatūra pagal Frasą netinkamai charakterizuoja bitumo elgseną esant žemoms temperatūroms. Todėl būtina numatyti kitų įvertinančių bitumo atsparumą šalčiui bei geresnę koreliaciją su temperatūrinių plyšių susidarymu kelyje pasižyminčių metodų taikymą.

Vienas iš tokių metodų – kritinės temperatūros nustatymas lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įprastos formos bandinius. Jungtinėse Amerikos Valstijose šis metodas įtrauktas į bitumo klasifikaciją pagal bitumo eksploatacinių charakteristikų (angl. *Performance grade*) reikalavimus. Todėl šiame bitumo atsparumo šalčiui eksperimentiniame tyrime taikytas būtent šis kritinės temperatūros nustatymo metodas.

#### 3.1. Tyrimo objektas ir metodika

Siekiant nustatyti skirtingų bitumų atsparumą šalčiui ir įvertinti jų tinkamumą statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai laboratorijoje atliktas eksperimentinis tyrimas. Eksperimentinio tyrimo metu analizuota 11-a skirtingos rūšies bitumų: 5 – kelių bitumai (20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 100/150), 4 – polimerais modifikuoti bitumai (PMB 10/40–65, PMB 25/55–60, PMB 45/80–55, PMB 45/80–65) ir 2 – gausiai polimerais modifikuoti bitumai (PMB 25/55–80 HiMA ir PMB 45/80–80 HiMA).

Eksperimento atlikimui išskirti trys tyrimo etapai. Pirmojo etapo metu visiems tiriamiesiems bitumams nustatytos jų fizikinės savybės:

- Penetracija esant 25 C temperatūrai pagal standartą *LST EN 1426 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Penetracijos adatos būdu nustatymas“*;
- Minkštėjimo temperatūra pagal standartą *LST EN 1427 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas“*;
- Dinaminė klampa pagal standartą *LST EN 13302 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Bituminio rišiklio dinaminės klamos nustatymas naudojant sukujį klampomatį“*.

Šiame etape polimerais modifikuotiems bitumams nustatyta jų mechaninė savybė – tamprioji atstata – pagal standartą *LST EN 13398 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Modifikuoto bitumo tampriosios atstatos nustatymas“*;

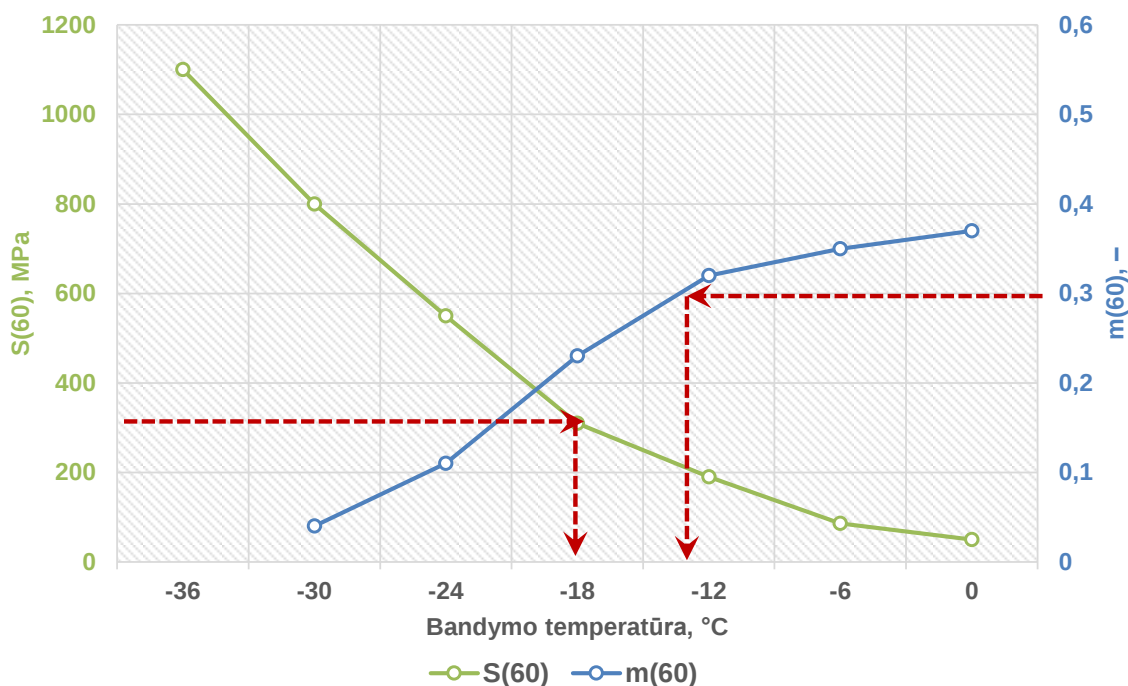
Antrojo etapo metu visiems tiriamiesiems bitumams atlikus trumpalaikį (pagal standartą *LST EN 12607-1 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumas kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas“* ir ilgalaikį (pagal standartą *LST EN 14769 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV)“*) sendinimą nustatytos jų mechaninės savybės:

- Lenkimo standis  $S(60)$  pagal standartą *LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“*;
- Lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  pagal standartą *LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“*;

Trečiojo etapo metu visiems tiriamiesiems bitumams nustatyta bitumo kritinė temperatūra ir bitumo jautrumas temperatūrai. Kritinė temperatūra nustatyta pagal standartą *AASHTO M 320 „Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder“* remiantis antrajame etape nustatytomis tiriamųjų bitumų lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  vertėmis esant skirtingoms bandymo temperatūroms. Bandymui atlikti taikytos temperatūros pasirinktos atsižvelgiant į kitų mokslininkų darbus nustatant kritinę temperatūrą bitumams, pasižymintiems panašiomis charakteristikomis kaip tiriamieji bitumai, lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) naudojant įprastus bandinius (Błazejowski ir kt. 2014). Bitumo jautrumas temperatūrai įvertintas pagal penetracijos rodiklį, apskaičiuojamą pagal standarto *LST EN 12591 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai“ A priedą*.

#### *Kritinės temperatūros nustatymo principas*

Nustatant bitumo kritinę temperatūrą lenkimo standis  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  nustatomas esant bent dviem skirtingoms bandymo temperatūroms. Kiekviena bandymo temperatūra viena nuo kitos skiriasi  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , t. y. bandymas atliekamas esant  $T\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $T-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Bandymo temperatūros keičiamos tol, kol esant  $T\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai nustatomas lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300\text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60) - \geq 0,3$ , o esant  $T-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai lenkimo standis  $S(60)$  yra  $> 300\text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60) - < 0,3$ . Tuomet pagal gautas lenkimo standžio ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  vertes interpoliacijos būdu nustatoma temperatūra, kuriai esant lenkimo standis  $S(60) = 300\text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60) = 0,3$  (3.1 pav.). Kritine temperatūra priimama aukštesnioji temperatūra, tenkinanti sąlyga  $S(60) = 300\text{ MPa}$  arba  $m(60) = 0,3$ .



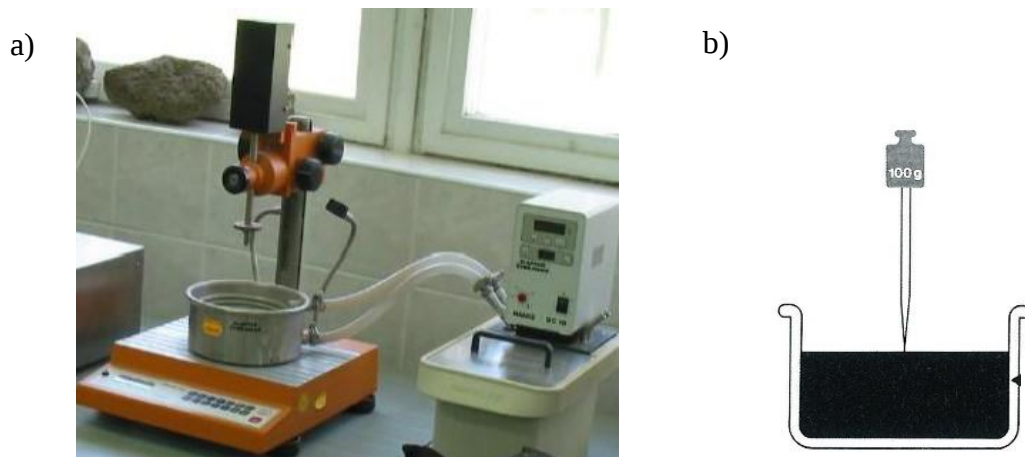
**3.1 pav.** Kritinės temperatūros nustatymo principas

### 3.2. Tyrimui naudota įranga ir jos specifika

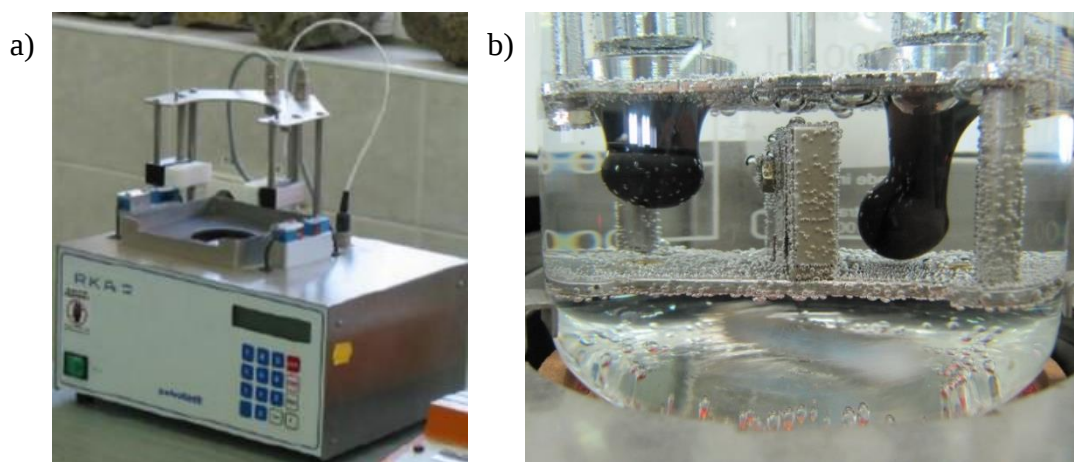
Penetracijai esant 25 °C temperatūrai nustatyti naudotas penetrometras (3.2 pav. a). Bandymo atlikimo procedūra – automatizuota. Tačiau prieš pradedant bandymą rankiniu būdu iki bandinio viršaus nuleidžiama adata su 100 g. svoriu (3.2 pav. b). Svarbu, kad nuleista adata nebūtų įsmigusi į bandinį arba nebūtų nutolusi nuo bandinio viršaus. Neišlaikius šios sąlygos bandymo metu gauti rezultatai nėra patikimi.

Minkštėjimo temperatūrai nustatyti naudotas automatizuotas minkštėjimo temperatūros nustatymo prietaisas (3.3 pav. a), kuriame įmontuoti lazeriai, fiksuojantys bandinio ištįsimą iki apatinės rėmelio plokštelės (3.3 pav. b). Pabrėžtina, kad minkštėjimo temperatūros nustatymas atliekamas vandenyje, jeigu tiriamojo bitumo minkštėjimo temperatūra yra ne aukštesnė kaip 80 °C. Priešingu atveju bandymui atlikti naudojamas glicerinas. Atsižvelgiant į tai kelių bitumams ir polimerais modifikuotiems bitumams minkštėjimo temperatūra nustatyta naudojant vandenį, o gausiai polimerais modifikuotiems bitumams – gliceriną.

Dinaminei klampai nustatyti naudotas sukusis klampomatis (3.4 pav. a). Bandymo rezultatai pateikiami sukiojo klampomačio ekrane. Patikimų rezultatų gavimui būtina tinkamai parinkti bandymui taikytiną antgalio tipą ir jo sukimosi greitį. Antgalio tipas ir jo sukimosi greitis parenkamas taip, kad bandymo metu būtų pasiekiamas pageidaujamas šlyties greitis ir sukimosi momentas tenkintų tam antgalio tipui ir sukimosi greičiui nustatytą sukimosi momento intervalą. Eksperimentinio tyrimo metu bandymas atliktas esant 20 aps./min greičiui naudojant cilindrinį antgalį Nr. 21 (3.4 pav. b) esant 135 °C temperatūrai.



**3.2 pav.** Bitumo penetrācijas esant 25 C temperatūrai nstatymas: a) penetrometras PNR 10;  
b) adatos padētis bandymo pradžioje



**3.3 pav.** Minkštējimo temperatūros nstatymas: a) minkštējimo temperatūros nstatymo prietaisas RKA 2 b) bandinio ištīsimas iki apatinēs rēmelio plokštelēs



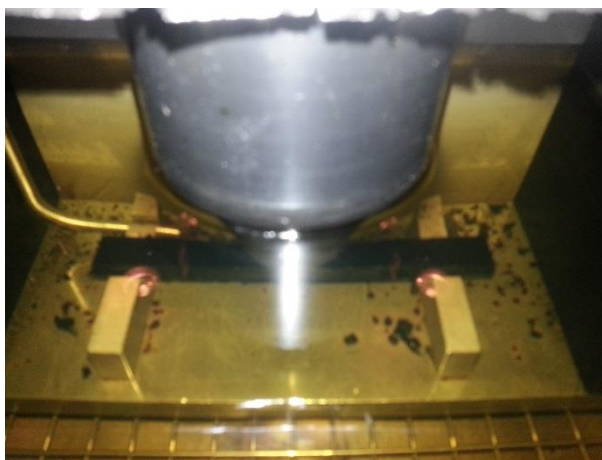
**3.4 pav.** Dinamīnēs klampos nstatymas: a) sukusis klampomātis Brookfield DV-III Ultra  
b) cilindrinis antgalis Nr. 21

Tampriajai atstatai nustatyti naudotas duktilometras (3.5 pav.). Bandinio tempimo procedūra pastoviu 50 mm/min greičiu kol bandinys pailgėja 200 mm yra automatizuotas, tačiau bandinio susitraukimas, jį padalinus pusiau, atliekamas rankiniu būdu naudojant liniuotę.

Lenkimo standžiui ir lenkimo standžio kitimo rodikliui nustatyti naudotas lenkiamo strypelio reometras (3.6 pav. a). Bandymo atlikimas ir rezultatų apskaičiavimas – automatizuotas. Tačiau gaunamų rezultatų korektiškumas glaudžiai priklauso nuo bandinio (sijelės) geometrinių parametrų, t. y. nuo bandinio paruošimo. Apskaičiuojant lenkimo standį sijelės aukštis keliamas kubu, todėl esant per aukštam arba per žemam bandiniui gaunama ženkliai didesnė rezultatų paklaida nei esant per siaurai arba per plačiai sijelei. Taip pat pabrėžtina, kad sijelės lenkimas (2.3 pav.) atliekamas išlaikant tiesinę tampriąją-klampiąją (*angl.* linear viscouelastic) bitumo elgseną.



**3.5 pav.** Tampriosios atstatos nustatymas (Duktilometras)



**3.6 pav.** Lenkimo standžio ir lenkimo standžio kitimo rodiklio nustatymas a) lenkiamo strypelio reometras CANNON; b) sijelės lenkimas

### 3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai ir vertinimas

#### *Penetracija esant 25 °C temperatūrai*

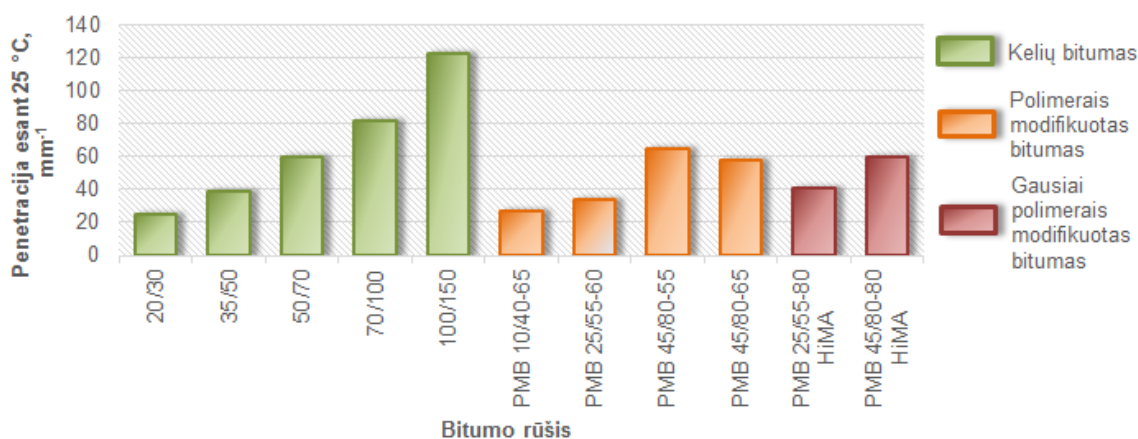
Bitumo penetracija esant 25 °C temperatūrai nustatyta 11-ai skirtingos rūšies tiriamųjų bitumų. Bandymo rezultatai pateikti 3.7 pav. Kiekvienas bitumas tenkina jam keliamus penetracijos, esant 25 °C temperatūrai, reikalavimus, pateiktus *Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų apraše TRA BITUMAS 08/14*.

Statinių apkrovų poveikio zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai dėl atsparumo plastinėms deformacijoms pageidautini kietesni bitumai, t. y. bitumai, kurių penetracija – mažesnė. Atsižvelgiant į tai kiekvienoje bitumo rūšies grupėje nustatyti mažiausias penetracijos vertes turintys bitumai. Išskirtinas kelių bitumas 20/30 (25,1 mm<sup>-1</sup>), polimerais modifikuotas bitumas PMB 10/40–65 (26,9 mm<sup>-1</sup>) ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 25/55–80 HiMA (40,8 mm<sup>-1</sup>). Tačiau tokie bitumai esant žemoms temperatūroms yra trapūs – jautrūs šalčiui –, išskyrus gausiai polimerais modifikuotą bitumą PMB 25/55–80 HiMA, kurio penetracija siekia net 40,8 mm<sup>-1</sup>. Didžiausia penetracijos verte pasižymėjo kelių bitumas 100/150 (123,0 mm<sup>-1</sup>) ir 70/100 (81,7 mm<sup>-1</sup>). Tokie bitumai dėl savo itin didelio minkštumo netaikytini aukštų temperatūrų ir sunkių ilgalaikių statinių apkrovų veikimo zonose.

#### *Minkštėjimo temperatūra*

Bitumo minkštėjimo temperatūra nustatyta 11-ai skirtingos rūšies tiriamųjų bitumų. Bandymo rezultatai pateikti 3.8 pav. Visi bitumai, išskyrus kelių bitumą 20/30, tenkina jiems keliamus minkštėjimo temperatūros reikalavimus, pateiktus *Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų apraše TRA BITUMAS 08/14*. Kelių bitumas 20/30 viršija reikalaujamą minkštėjimo temperatūrą tik +0,6 °C.

Statinių apkrovų poveikio zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai dėl atsparumo plastinėms deformacijoms pageidautini bitumai su aukštesne minkštėjimo temperatūra. Dėl šios



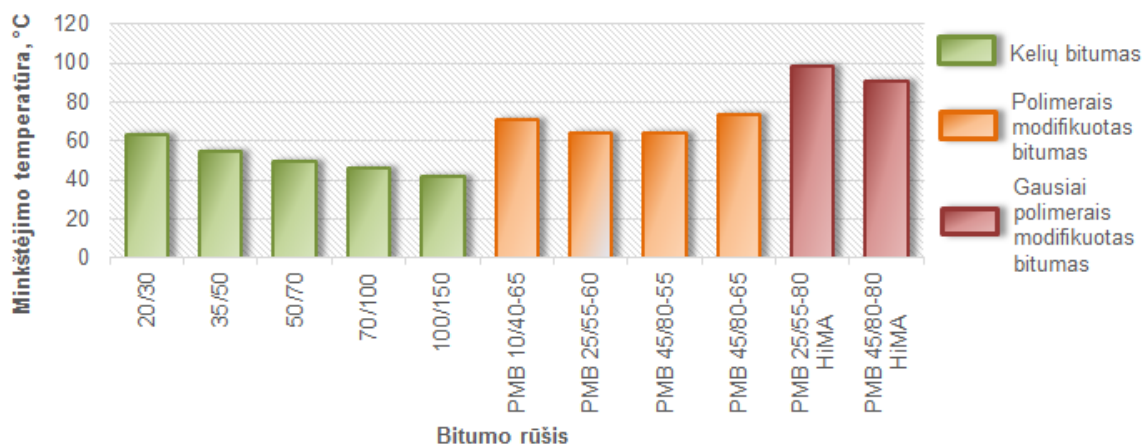
3.7 pav. Penetracijos, esant 25 °C temperatūrai, bandymo rezultatai

priežasties kelių bitumo 20/30 minkštėjimo temperatūros viršijimas laikomas palankiu rezultatu. Kiekvienoje bitumo rūšies grupėje nustatyti bitumai, pasižymintys aukščiausia minkštėjimo temperatūra. Išskirtinas jau aptartas kelių bitumas 20/30 (63,6 °C), polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 (73,7 °C) ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 25/55–80 HiMA (98,7 °C). Kadangi viršutinio asfalto sluoksnio temperatūra vasaros laikotarpiu dažnai viršija 60 °C temperatūrą, tai iš šių bitumų aukštų temperatūrų ir sunkių ilgalaikių statinių apkrovų veikimo zonose naudojamiems asfalto mišiniams gaminti labiausiai rekomenduotina taikyti gausiai polimerais modifikuotą bitumą PMB 25/55–80 HiMA.

Žemiausiomis minkštėjimo temperatūromis (<55 °C) pasižymėjo visi kelių bitumai, išskyrus kelių bitumą 20/30. Kadangi viršijus minkštėjimo temperatūrą bitumas elgiasi kaip visiškai klampus skystis (praranda standumą) ir veikiant apkrovai deformuojasi, tai tokie bitumai netaikytini gaminti aukštų temperatūrų ir sunkių ilgalaikių statinių apkrovų veikimo zonose naudojamiems asfalto mišiniams.

#### *Dinaminė klampa*

Bitumo dinaminė klampa esant 135 °C temperatūrai nustatyta 9-iems skirtingos rūšies tiriamiesiems kelių ir polimerais modifikuotiems bitumams. Dviem gausiai polimerais modifikuotiems bitumams dinaminė klampa nustatyta esant 160 °C temperatūrai, nes esant 135 °C temperatūrai šios rūšies bitumas buvo per daug klampus (antgalis praktiškai nesisuko). Atkreiptinas dėmesys, kad polimerais modifikuotam bitumui PMB 10/40–65 vietoj 20 aps./min antgalio sukimosi greičio taikytas 15 aps./min sukimosi greitis. Bandymo rezultatai pateikti 3.9 pav. Pagal standartą AASHTO M 320 „Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder“ reikalaujama, kad dinaminė klampa esant 135 °C temperatūrai nebūtų didesnė nei 3 Pa·s. Visi tirtieji kelių bitumai išskyrus gausiai polimerais modifikuotus bitumus tenkina reikalaujamą dinaminės klamos vertę.

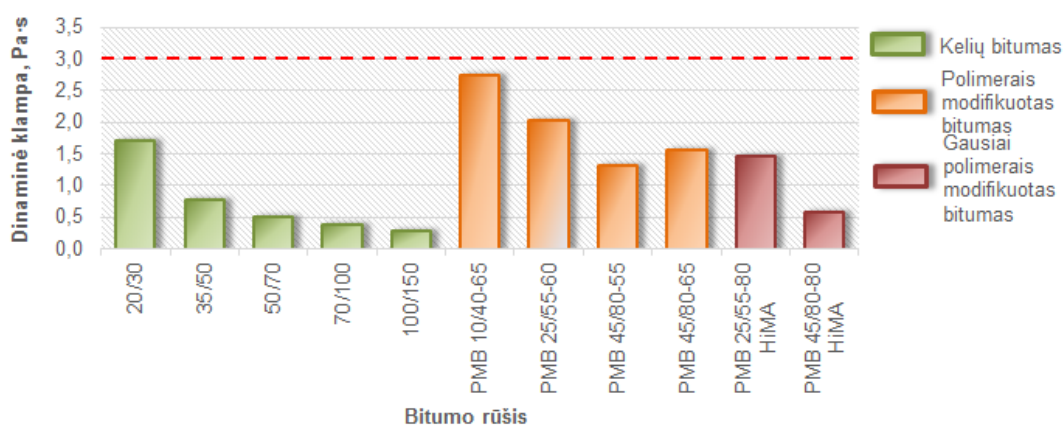


**3.8 pav.** Minkštėjimo temperatūros bandymo rezultatai

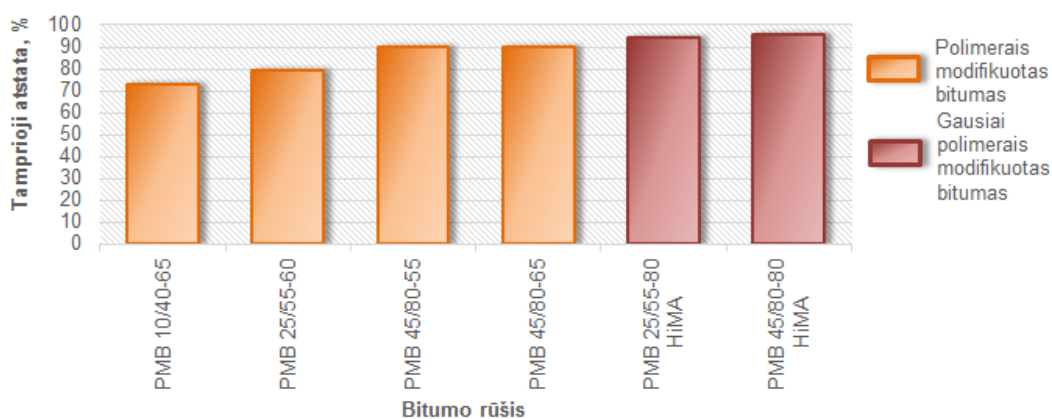
### Tamprioji atstata

Bitumo tamprioji atstata nustatyta 6-iems polimerais modifikuotiems bitumams. Bandymo rezultatai pateikti 3.10 pav. Visi polimerais modifikuoti bitumai tenkina jiems keliamus tampriosios atstatos reikalavimus, pateiktus *Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų apraše TRA BITUMAS 08/14*. Reikalaujama kad visų polimerais (elastomerais) modifikuotų bitumų tamprioji atstata būtų  $\geq 50\%$ .

Statinių apkrovų poveikio zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai dėl atsparumo plastinėms deformacijoms pageidautini bitumai su didesne tampriosios atstatos verte. Kuo didesnė ši vertė, tuo bitume daugiau elastomerų ir tuo geriau jie funkcionuoja. Kiekvienoje modifikuoto bitumo rūšies grupėje nustatyti didžiausias tampriosios atstatos vertes turintys bitumai. Išskirtinas polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–55 (90 %) ir PMB 45/80–65 (90 %) bei gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA (96 %). Iš šių bitumų sunkių ilgalaikių statinių apkrovų veikimo zonose naudojamiems asfalto mišiniams gaminti labiausiai rekomenduotina naudoti gausiai polimerais modifikuotą bitumą PMB 45/80–80 HiMA. Tačiau pa stebėtina, kad gausiai polimerais modifikuoto bitumo PMB 25/55–80 HiMA tamprioji atstata nuo bitumo PMB 45/80–80 HiMA tampriosios atstatos skyrėsi vos 2 %. Mažiausia tampriosios atstatos verte pasižymėjo polimerais modifikuotas bitumas PMB 10/40–65 (73 %).



3.9 pav. Dinaminės klamos bandymo rezultatai



3.10 pav. Tampriosios atstatos bandymo rezultatai

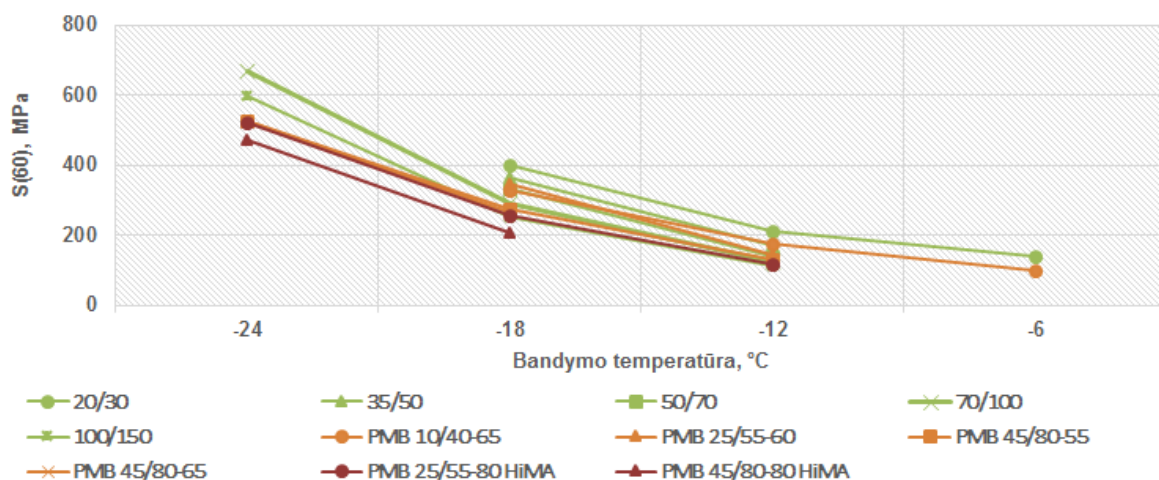
### Lenkimo standis

Bitumo lenkimo standis nustatytas 11-ai skirtingos rūšies tiriamųjų bitumų esant skirtingoms bandymo temperatūroms. Bandymo rezultatai pateikti 3.11 pav.

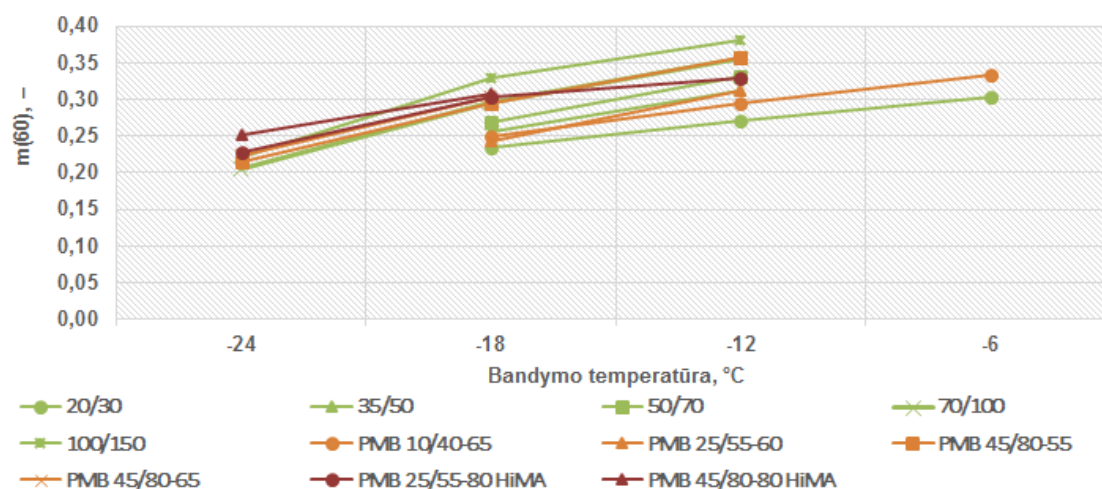
Temperatūrinių plyšių susidarymo atžvilgiu asfalto mišinių gamybai pageidautini bitumai, kurių lenkimo standis esant žemai temperatūrai yra mažiausias. Atsižvelgiant į tai kiekvienoje bitumo rūšies grupėje nustatyti mažiausias lenkimo standžio vertes turintys bitumai. Išskirtinas kelių bitumas 100/150, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA. Didžiausiomis lenkimo standžio vertėmis pasižymėjo kelių bitumas 20/30.

### Lenkimo standžio kitimo rodiklis

Bitumo lenkimo standžio kitimo rodiklis nustatytas 11-ai skirtingos rūšies tiriamųjų bitumų esant skirtingoms bandymo temperatūroms. Bandymo rezultatai pateikti 3.12 pav.



**3.11 pav.** Lenkimo standžio, praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios, kitimas priklausomai nuo bandymo temperatūros



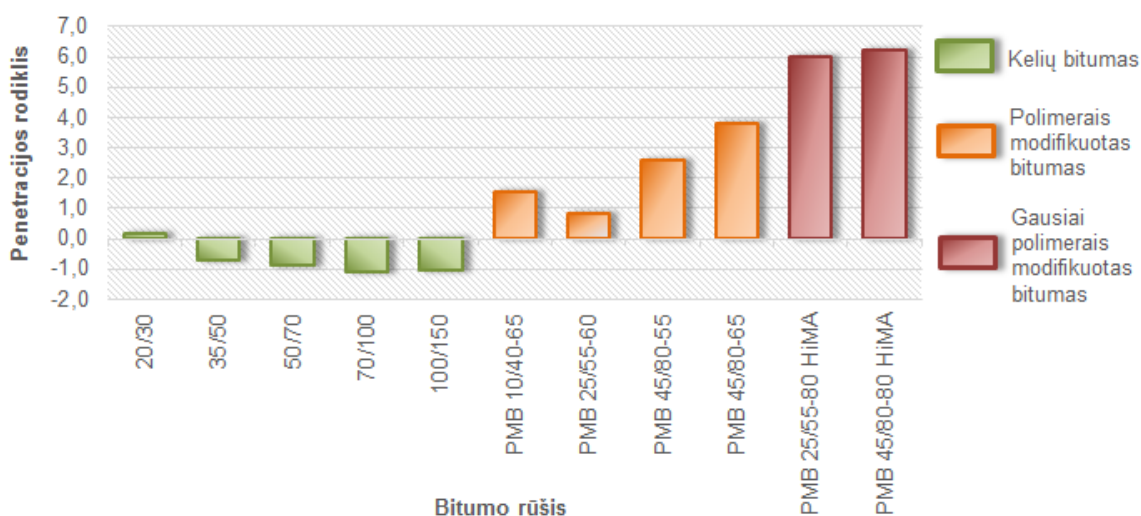
**3.12 pav.** Lenkimo standžio kitimo rodiklio, praėjus 60 s nuo bandinio apkrovimo pradžios, kitimas priklausomai nuo bandymo temperatūros

Temperatūrinių plyšių susidarymo atžvilgiu asfalto mišinių gamybai pageidautini bitumai, kurių lenkimo standžio kitimo rodiklis esant žemai temperatūrai yra didžiausias. Atsižvelgiant į tai kiekvienoje bitumo rūšies grupėje nustatyti didžiausias lenkimo standžio kitimo rodiklio vertes turintys bitumai. Išskirtinas kelių bitumas 100/150, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA. Mažiausiomis lenkimo standžio kitimo rodiklio vertėmis pasižymėjo kelių bitumas 20/30.

#### *Jautrumas temperatūrai*

Bitumo jautrumas temperatūrai nustatytas penetracijos indeksu, apskaičiuojamu pagal penetraciją esant 25 °C temperatūrai ir minkštėjimo temperatūrą. Penetracijos indeksas apskaičiuotas 11-ai skirtingos rūšies tiriamųjų bitumų. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.13 pav. Visi kelių bitumai tenkina jiems keliamus penetracijos rodiklio reikalavimus, pateiktus standarte *LST EN 12591 „Kelių bitumo techniniai reikalavimai“*. Polimerais modifikuotiems bitumams neregamentuojamas penetracijos rodiklio reikalavimas.

Žinoma, kad kuo mažesnis penetracijos rodiklis, tuo bitumas greičiau keičia savo konsistenciją kintant temperatūrai, t. y. tuo bitumas jautresnis temperatūros pokyčiui (Błażejowski ir kt. 2014). Todėl statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai atsparumo plastinių deformacijų ir temperatūrinių plyšių susidarymo aspektu pageidautini bitumai, pasižymintys aukštesniu penetracijos rodikliu. Iš visų tirtųjų bitumų aukščiausia penetracijos rodiklio verte pasižymėjo gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA (6,21). Polimerais modifikuotų bitumų penetracijos rodiklis buvo net 1,6–7,5 karto mažesnis ir kito nuo 0,83 (PMB 25/55–60) iki 3,82 (PMB 45/80–65). Tuo tarpu kelių bitumų penetracijos rodiklis siekė net minus 1,08 (70/100). Vadinasi kelių bitumai yra itin jautrūs temperatūros pokyčiui. Dėl to jie nėra rekomenduotini taikyti statinių apkrovų veikimo zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai.

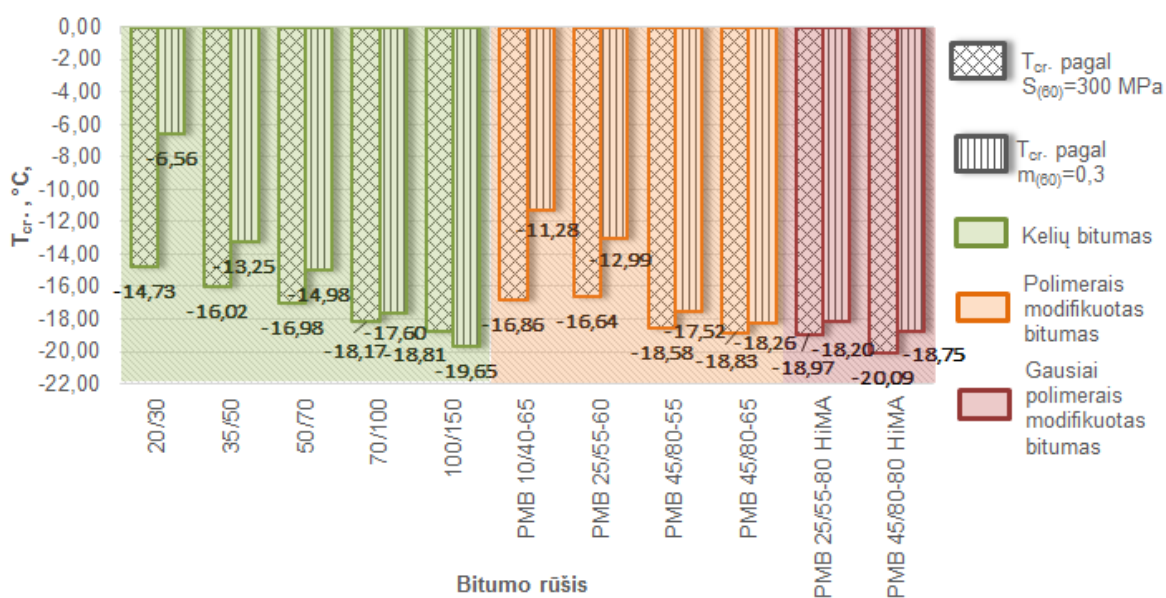


**3.13 pav.** Penetracijos rodiklio rezultatai

### Kritinė temperatūrai

Bitumo kritinė temperatūra nustatyta 11-ai skirtingos rūšies bitumų. Atsparumo šalčio poveikiui (temperatūrinių plyšių susidarymo) aspektu pageidautini bitumai, kurių lenkimo standis  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  esant kritinei aplinkos temperatūrai atitinkamai yra  $\leq 300 \text{ MPa}$  ir  $\geq 0,3$ . Todėl pagal kiekvieno bitumo lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimo grafikus kintant bandymo temperatūrai nustatytos kritinės temperatūros, kurioms esant lenkimo standis  $S(60)=300 \text{ MPa}$  arba lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)=0,3$  (A priedas). 3.14 pav. pateiktos nustatytos kritinės temperatūros pagal lenkimo standžio  $S(60)=300 \text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)=0,3$  ribines sąlygas.

Kiekvienoje bitumo rūšies grupėje kiekvienai ribinei sąlygai atskirai nustatyti žemiausias kritines temperatūras turintys bitumai. Pagal lenkimo standžio  $S(60)=300 \text{ MPa}$  sąlygą žemiausia kritine temperatūra pasižymėjo kelių bitumas 100/150 ( $-18,81 \text{ }^\circ\text{C}$ ), polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ( $-18,83 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA ( $-20,09 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pagal lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)=0,3$  sąlygą žemiausia kritine temperatūra pasižymėjo kelių bitumas 100/150 ( $-19,65 \text{ }^\circ\text{C}$ ), polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ( $-18,26 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA ( $-18,75 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Galutinė bitumo kritinė temperatūra priimama aukštesnioji (mažiau neigiama) temperatūra. Esant šiai temperatūrai tenkinamos abi sąlygos, t. y. lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300 \text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis –  $m(60) \geq 0,3$ . 3.15 pav. pateikta kiekvienam bitumui nustatyta galutinė kritinė temperatūra.



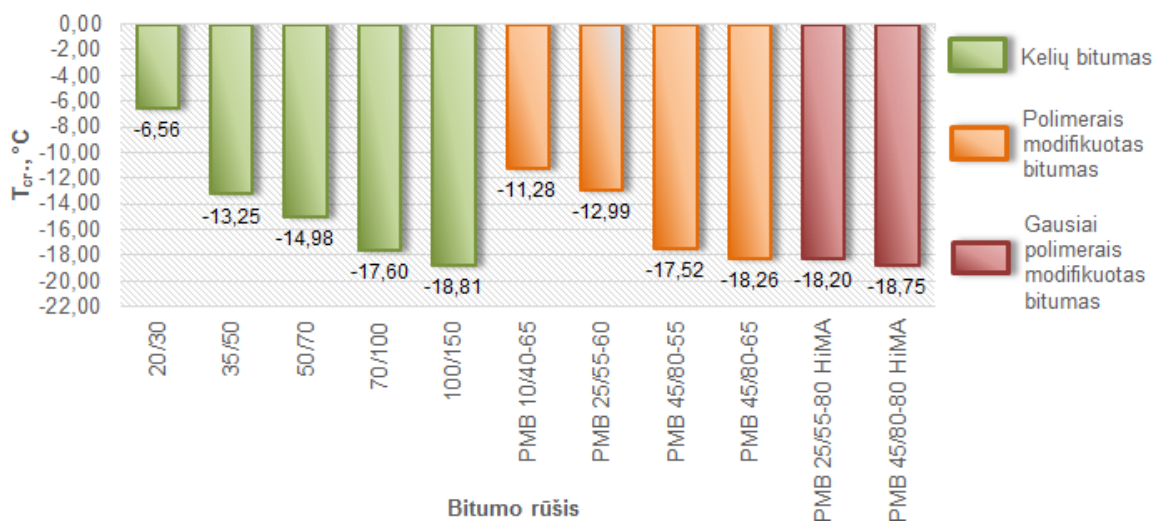
**3.14 pav.** Kritinė temperatūra nustatyta pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  ribines sąlygas

Tarp kelių bitumų žemiausia kritine temperatūra pasižymėjo kelių bitumas 100/150 (-18,81 °C), tarp polimerais modifikuotų bitumų – polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 (-18,26 °C) ir tarp gausiai polimerais modifikuotų bitumų – gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA (-18,75 °C). Visų kitų tirtųjų bitumų kritinė temperatūra nesiekė -18 °C. Pati aukščiausia kritinė temperatūra nustatyta kelių bitumui 20/30 (-6,56 °C). Lietuvoje dažniausiai taikomų kelių bitumų 50/70 ir 70/100 kritinė temperatūra atitinkamai siekė -14,98 °C ir -17,60 °C.

Kadangi atliekant bandymą taikomas laiko–temperatūros superpozicijos principas (2.1 poskyris), tai pagal lenkimo standžio  $S(60)=300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)=0,3$  sąlygas nustatyta bitumo kritinė temperatūra neatitinka tikrosios kritinės temperatūros, kuri charakterizuoja temperatūrinių plyšių susidarymą. Pastaroji yra 10 °C žemesnė. Vadinasi asfalto mišinių gamybai taikant tiriamuosius bitumus dangoje susidarys temperatūriniai plyšiai, kai bus viršyta  $T_{cr}-10$  °C temperatūra. 3.1 lentelėje pateikta tirtųjų bitumų patikslinta kritinė temperatūra.

Patikslinta kritinė temperatūra atitinka aplinkos temperatūrą, kurioje eksploatuojamas asfalto mišinys. Akivaizdu, kad visi tirtieji bitumai taikyti asfalto mišinių gamybai, kai žemiausia dangos konstrukcijos temperatūra neviršija -16,56 °C. Visi tirtieji kelių bitumai taikytini asfalto mišiniams, naudojamiems ne žemesnėje nei -16,56 °C, polimerais modifikuoti bitumai – ne žemesnėje nei -21,28 °C, o gausiai polimerais modifikuoti bitumai – ne žemesnėje nei -28,20 °C. 3.2 lentelėje pateikti atsparumo šalčiui aspektu išreitinguotieji tirtieji bitumai pagal patikslintą kritinę temperatūrą.

Jungtinėse Amerikos Valstijose bitumas klasifikuojamas remiantis bitumo eksploatacinių charakteristikų (*angl.* Performance Grade (PG)) reikalavimais. Patikslinta kritinė temperatūra, nustatyta pagal lenkimo standžio  $S(60)=300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)=0,3$  są-



**3.15 pav.** Kritinė temperatūra, tenkinanti lenkimo standžio  $S(60) \leq 300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60) \geq 0,3$  sąlygas

lygas, atsižvelgiant į laiko-temperatūros superpozicijos principą lyginama su galimomis žemiausiomis PG temperatūromis (-46, -40, -34, -28, -22, -16 ir -10). Žemiausia PG temperatūra priimama ta temperatūra, kuri yra artimiausia patikslintai kritinei temperatūrai temperatūros didėjimo atžvilgiu. Pavyzdžiui, jeigu patikslinta kritinė temperatūra yra -33,25 °C, tai žemiausia PG temperatūra yra -28 °C. 3.1 lentelėje pateikta tirtiesiems bitumams nustatyta PG žemiausia temperatūra.

Remiantis Jungtinių Amerikos Valstijų klasifikavimu ne žemesnėje nei -16 °C temperatūroje eksploatuotino asfalto mišinio gamybai naudotini du tirtieji bitumai, ne žemesnėje nei -22 °C temperatūroje – penki tirtieji bitumai, ne žemesnėje nei -28 °C temperatūroje – keturi tirtieji bitumai. 3.2 lentelėje pateikti atsparumo šalčiui aspektu išreitinguotieji tirtieji bitumai pagal žemiausią PG temperatūrą.

**3.1 lentelė.** Tirtųjų bitumų patikslinta kritinė temperatūra ir nustatyta žemiausia PG temperatūra

| Bitumo rūšis      | Kritinė temperatūra, °C |             | Patikslinta kritinė temperatūra, °C | Žemiausia temperatūra pagal eksploatacinių savybių reikalavimus (PG), °C |
|-------------------|-------------------------|-------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                   | $S(60)=300$ MPa         | $m(60)=0,3$ |                                     |                                                                          |
| 20/30             | -14,73                  | -6,56       | -16,56                              | -16                                                                      |
| 35/50             | -16,02                  | -13,25      | -23,25                              | -22                                                                      |
| 50/70             | -16,98                  | -14,98      | -24,98                              | -22                                                                      |
| 70/100            | -18,17                  | -17,60      | -27,60                              | -22                                                                      |
| 100/150           | -18,81                  | -19,65      | -28,81                              | -28                                                                      |
| PMB 10/40-65      | -16,86                  | -11,28      | -21,28                              | -16                                                                      |
| PMB 25/55-60      | -16,64                  | -12,99      | -22,99                              | -22                                                                      |
| PMB 45/80-55      | -18,58                  | -17,52      | -27,52                              | -22                                                                      |
| PMB 45/80-65      | -18,83                  | -18,26      | -28,26                              | -28                                                                      |
| PMB 25/55-80 HiMA | -18,97                  | -18,20      | -28,20                              | -28                                                                      |
| PMB 45/80-80 HiMA | -20,09                  | -18,75      | -28,75                              | -28                                                                      |

**3.2 lentelė.** Atsparumo šalčiui aspektu išreitinguotieji bitumai

| Pagal patikslintą kritinę temperatūrą |                   | Pagal žemiausią PG temperatūrą                                           |                   |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Patikslinta kritinė temperatūra, °C   | Bitumo rūšis      | Žemiausia temperatūra pagal eksploatacinių savybių reikalavimus (PG), °C | Bitumo rūšis      |
| -16,56                                | 20/30             | -16                                                                      | 20/30             |
| -21,28                                | PMB 10/40-65      | -16                                                                      | PMB 10/40-65      |
| -22,99                                | PMB 25/55-60      | -22                                                                      | PMB 25/55-60      |
| -23,25                                | 35/50             | -22                                                                      | 35/50             |
| -24,98                                | 50/70             | -22                                                                      | 50/70             |
| -27,52                                | PMB 45/80-55      | -22                                                                      | PMB 45/80-55      |
| -27,60                                | 70/100            | -22                                                                      | 70/100            |
| -28,20                                | PMB 25/55-80 HiMA | -28                                                                      | PMB 25/55-80 HiMA |
| -28,26                                | PMB 45/80-65      | -28                                                                      | PMB 45/80-65      |
| -28,75                                | PMB 45/80-80 HiMA | -28                                                                      | PMB 45/80-80 HiMA |
| -28,81                                | 100/150           | -28                                                                      | 100/150           |

Pastaba: sąrašo viršuje pateikti šalčio poveikiui jautriausi bitumai

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus 11-os bitumų fizikinių ir mechaninių savybių tyrimo bandymus nustatyta, kad visi tirtieji bitumai tenkino jiems keliamus reikalavimus pagal Lietuvoje galiojančius norminius dokumentus išskyrus kelių bitumą 20/30, kurio minkštėjimo temperatūra viršijo 0,95 % (0,6 °C) reikalaujamą didžiausią vertę (63,0 °C). Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamyboje bitumo minkštėjimo temperatūros reikalaujamos didžiausios vertės viršijimas laikomas teigiamu reiškiniu.
2. Atlikus bitumo mechaninių savybių nustatymą lenkiamo strypelio reometru ir bitumo vertinimą atsparumo šalčiui aspektu gauta, kad pagal lenkimo standžio  $S(60)=300 \text{ MPa}$  sąlygą kiekvienoje bitumo grupėje šalčiui atspariausi bitumai yra kelių bitumas 100/150, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA, pagal lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)=0,3$  sąlygą – kelių bitumas 100/150, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–80 HiMA.
3. Atlikus bitumo kritinės temperatūros, tenkinančios lenkimo standžio  $S(60)\leq 300 \text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)\geq 0,3$  sąlygas, nustatymo analizę gauta, kad 90,9 % tirtųjų bitumų kritinė temperatūra nustatyta pagal lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60) = 0,3$  sąlygą.
4. Atlikus bitumo patikslintos kritinės temperatūros kitimo analizę nustatyta, kad skirtingų bitumų patikslinta kritinė temperatūra skiriasi net iki 12,25 °C. Aukščiausia kritinė temperatūra (-16,56 °C) nustatyta kelių bitumui 20/30, žemiausia (-18,75 °C) – kelių bitumui 100/150.
5. Atlikus bitumo atsparumo šalčiui vertinimą pagal patikslintą kritinę temperatūrą nustatyta, kad šalčio poveikiui atspariausi bituminiai rišikliai – gausiai polimerais modifikuoti bitumai PMB 25/55–80 HiMA ir PMB 45/80–80 HiMA, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir kelių bitumas 100/150. Šių bitumų patikslinta kritinė temperatūra kinta nuo -28,00 °C iki -28,81 °C.
6. Nustačius bitumo žemiausią temperatūrą pagal eksploatacinių savybių reikalavimus gauta, kad du tirtieji bitumai taikytini ne žemesnėje nei -16 °C eksploataavimo temperatūroje, penki tirtieji bitumai – ne žemesnėje nei -22 °C temperatūroje, keturi tirtieji bitumai – ne žemesnėje nei -28 °C temperatūroje.

## **4. STATINĖMS APKROVOMS ATSPARIŲ ASFALTO MIŠINIŲ BITUMO PARINKIMO REKOMENDACIJOS ĮVERTINANT ATSPARUMĄ ŠALČIUI**

Atlikto bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinio tyrimo metu tarp skirtingų bitumo rūšių esant žemoms temperatūroms pastebėtas akivaizdus bitumo funkcionavimo skirtumas. Nustatyta kritinė temperatūra tarp tiriamųjų bitumų skyrėsi net iki 12,25 °C. Tai pagrindžia asfalto mišinio gamybai naudojamo bitumo parinkimo būtinumą įvertinant jo atsparumą šalčiui.

### **4.1. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis**

Asfalto mišinio gamybai taikytinas bitumas parenkamas atsižvelgiant į bitumo charakteristikas, lemiančias pageidaujamą asfalto mišinio funkcionavimą. Siekiant optimizuoti bitumo parinkimo procedūrą ir eliminuoti žmogiškąjį faktorių bitumo tinkamumo pripažinime tikslinga taikyti įvairius bitumo parinkimo modelius. Pastarieji griežtai apibrėžia parinkimo procedūrą, ribines charakteristikų vertes, taikytinas bandymų atlikimo metodikas ir ribines bitumo tinkamumo sąlygas.

Atlikus bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinį tyrimą 2.3 poskyryje pateiktas teorinis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis patikslintas pagal tyrimo metu taikytą metodiką. 4.1 pav. pateiktas statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis. Jis apibrėžia bitumo kritinės temperatūros nustatymą lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įprastos formos bandinius.

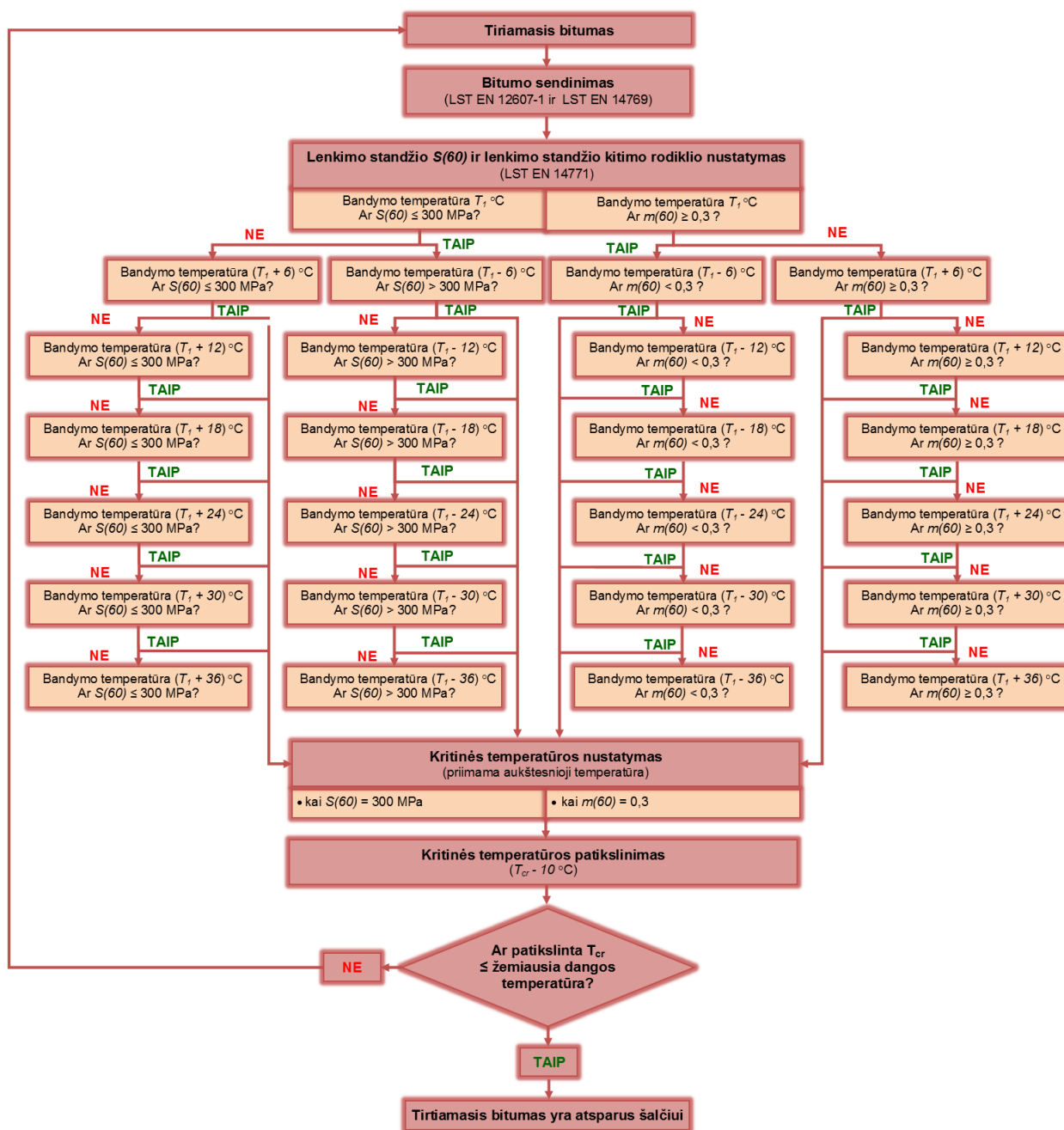
Tiriant statinių apkrovų zonose naudotinių asfalto mišinių bitumo atsparumą šalčiui, atsparumas statinėms apkrovoms (plastinių deformacijų susidarymui) turi būti užtikrinamas prieš tikrinant bitumo atsparumą šalčiui (temperatūrinių plyšių susidarymui). Pabrėžtina, kad 4.1 pav. pateiktasis modelis taip pat taikytinas automobilių kelių asfalto mišinių bitumo atsparumui šalčiui užtikrinti.

Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį sudaro šeši etapai:

1. Tiriamojo bitumo pasirinkimas;
2. Bitumo trumpalaikis ir ilgalaikis sendinimas;
3. Lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  nustatymas;
4. Kritinės temperatūros nustatymas;
5. Kritinės temperatūros patikslinimas;
6. Tiriamojo bitumo įvertinimas atsparumo šalčiui aspektu.

Tiriamąjį bitumų trumpalaikis ir ilgalaikis senėjimas atitinkamai atliekamas pagal standartą LST EN 12607-1 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumas kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas“ ir LST EN 14769 „Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas ilgalaikis senėjimas naudojant slėginį senėjimo indą (PAV)“.

Lenkimo standis  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  nustatomi pagal standartą LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“.



4.1 pav. Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelis

Kritinė temperatūra nustatoma pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  ribines sąlygas, t. y. interpoliacijos būdu pagal nustatytas lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  vertes esant skirtingoms žemoms temperatūroms apskaičiuojama temperatūra, kai lenkimo standis  $S(60) = 300 \text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60) = 0,3$ . Kritinė temperatūra priimama aukštesnioji temperatūra, kuriai esant  $S(60) = 300 \text{ MPa}$  arba  $m(60) = 0,3$ . Tokiu atveju tiriamasis bitumas tenkina abu Jungtinių Amerikos Valstijų bitumo klasifikacijos pagal bitumo eksploatacines charakteristikas reikalavimus, t. y. lenkimo standis  $S(60)$  yra  $\leq 300 \text{ MPa}$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklis  $m(60)$  yra  $\geq 0,3$  esant  $10^\circ\text{C}$  aukštesnei temperatūrai nei žemiausia dangos konstrukcijos temperatūra.

Kritinė temperatūra patikslinama iš nustatytosios kritinės temperatūros atimant  $10^\circ\text{C}$ . Šis patikslinimas reikalingas dėl bandymo metu taikomo laiko–temperatūros superpozicijos principo (2.1 pskyris).

Tiriamasis bitumas įvertinamas atsparumo šalčiui aspektu lyginant patikslintą kritinę temperatūrą su žemiausia dangos temperatūra, kurioje bus naudojamas tiriamasis bitumas. Jeigu patikslinta kritinė temperatūra yra žemesnė nei žemiausia dangos temperatūra, kurioje bus naudojamas bitumas, tai tiriamasis bitumas laikomas atspariu šalčiui. Priešingu atveju, t. y. kai patikslinta kritinė temperatūra yra aukštesnė nei žemiausia dangos temperatūra, kurioje bus naudojamas bitumas, tiriamasis bitumas laikomas jautriu šalčiui ir netaikytinu asfalto mišinio gamybai. Tuomet grįžtama į modelio pradžią, pasirenkamas kitas tiriamasis bitumas ir analogiškai kartojami visi modelyje pateikti bitumo atsparumo šalčiui nustatymo etapai.

Pateiktojo statinėms apkrovoms atsparaus asfalto mišinio bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymas orientuotas į asfalto viršutinio sluoksnio bitumo parinkimą atsparumo šalčiui aspektu. Tačiau atkreiptinas dėmesys, kad temperatūros poveikiui jautriausia  $10 \text{ cm}$  storio viršutinė asfalto dangos dalis. Be to pasaulyje vis labiau populiarėja dangos konstrukcijos su plonais asfalto sluoksniais. Todėl remiantis vyraujančiomis dangos konstravimo tendencijomis ateityje būtina numatyti šio modelio taikymą apatinių asfalto sluoksnių asfalto mišinių bitumo parinkimui.

## **4.2. Rekomendacijos bitumo parinkimo algoritmui**

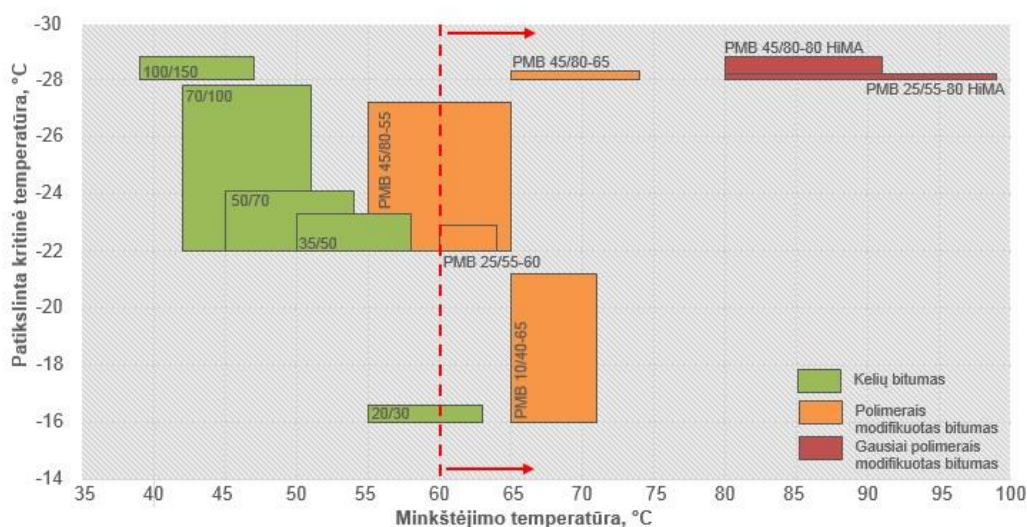
Lietuvoje gaminamiems asfalto mišiniams naudojamas bitumas parenkamas pagal Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos patvirtintas *Automobilių kelių dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo taisyklės IT ASFALTAS 08*. Jose asfalto mišinių gamybai naudotini bitumai suskirstyti atsižvelgiant į dangos konstrukcijos klasę, asfalto sluoksnio tipą, asfalto mišinio rūšį. Kitaip sakant asfalto mišinio gamybai naudotinas bitumas parenkamas neįvertinant jo atsparumo plastinėms deformacijoms ir temperatūriniais plyšiams.

Siekiant išskirti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai taikytinus bitumus sudarytas tirtųjų bitumų išdėstymas patikslintos kritinės temperatūros ir minkštėjimo temperatūros atžvilgiu (4.2 pav.). Pateikta bitumo minkštėjimo temperatūra atitinka Lietuvoje bitumams keliamus reikalavimus. Tačiau atkreiptinas dėmesys, kad polimerais modifikuotiems bitumams norminiuose dokumentuose nurodoma tik mažiausia minkštėjimo temperatūros vertė. Todėl didžiausia minkštėjimo temperatūros vertė polimerais modifikuotiems bitumams priimta eksperimentinio tyrimo metu nustatyta minkštėjimo temperatūra.

Kadangi asfalto dangos temperatūra vasaros laikotarpiu kai kuriose vietovėse siekia net  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tai statinių apkrovų poveikio zonose rekomenduojama taikyti tik tuos bitumus, kurių minkštėjimo temperatūra yra aukštesnė nei  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (4.2 pav. nuo raudonos punktyrinės linijos į dešinę esantys bitumai), t. y. polimerais modifikuoti bitumai PMB 25/55–60, PMB 10/40-65 ir PMB 45/80-65 bei gausiai polimerais modifikuoti bitumai PMB 25/55-80 HiMA ir PMB 45/80-80 HiMA. Kelių bitumo 20/30 ir polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/50-55 taikymas statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai yra diskutuotinas klausimas ir turi būti grindžiamas papildomais tyrimais, t. y. turi būti įrodyta, kad aukščiausia dangos temperatūra neviršys  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  arba bitumo minkštėjimo temperatūra yra didesnė nei  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Siekiant, kad statinėms apkrovoms atspaus asfalto mišinio bitumas būtų atsparus šalčio poveikiui, rekomenduojama asfalto mišinio gamybai pasirinkti bitumą, pasižymintį kuo žemesne patikslinta kritine temperatūra, t. y. 4.2 pav. kuo aukščiau esantį bitumą.

Bendru atveju asfalto mišinio gamybai taikytinas bitumas atsparumo šalčiui atžvilgiu parenkamas pagal 4.1 pav. pateiktąjį modelį. Šio modelio taikymas užtikrina asfalto dangos funkcionavimą be temperatūrinių plyšių susidarymo ne žemesnėje temperatūroje nei projektinė žemiausia dangos temperatūra.



**4.2 pav.** Tirtųjų bitumų išsidėstymas patikslintos kritinės temperatūros ir minkštėjimo temperatūros atžvilgiu

Pabrėžtina, kad atliktas bitumo atsparumo šalčiui eksperimentini tyrimas sudarė palankias sąlygas paprastesniam asfalto mišinio gamybai taikytino bitumo parinkimui atsižvelgiant į jautrumą šalčiui – temperatūriniais plyšiams – nei patikslinto statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymas. Tirtieji bitumai atsižvelgiant į jiems nustatytą žemiausią temperatūrą pagal eksploatacinių charakteristikų (PG) reikalavimus ir į žemiausią dangos temperatūrą, t. y. į vietovės klimatinės sąlygas, tiesiogiai naudotini asfalto mišinio gamybai netaikant patikslinto statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio. Iš tirtųjų bitumų asfalto mišinio gamybai pasirenkamas tas bitumas, kurio žemiausia PG temperatūra yra ne aukštesnė nei žemiausia dangos (aplinkos) temperatūra. 4.1 lentelėje pateiktas tirtųjų bitumų tinkamumas asfalto mišinio gamybai priklausomai nuo žemiausios dangos temperatūros.

Nesant duomenų apie žemiausią dangos temperatūrą, asfalto mišinio gamybai taikytino bitumo parinkimui atsparumo šalčiui aspektu rekomenduojama naudoti žemiausią aplinkos temperatūrą. Kadangi pastaroji praktiškai yra tokia pati kaip žemiausia asfalto dangos temperatūra.

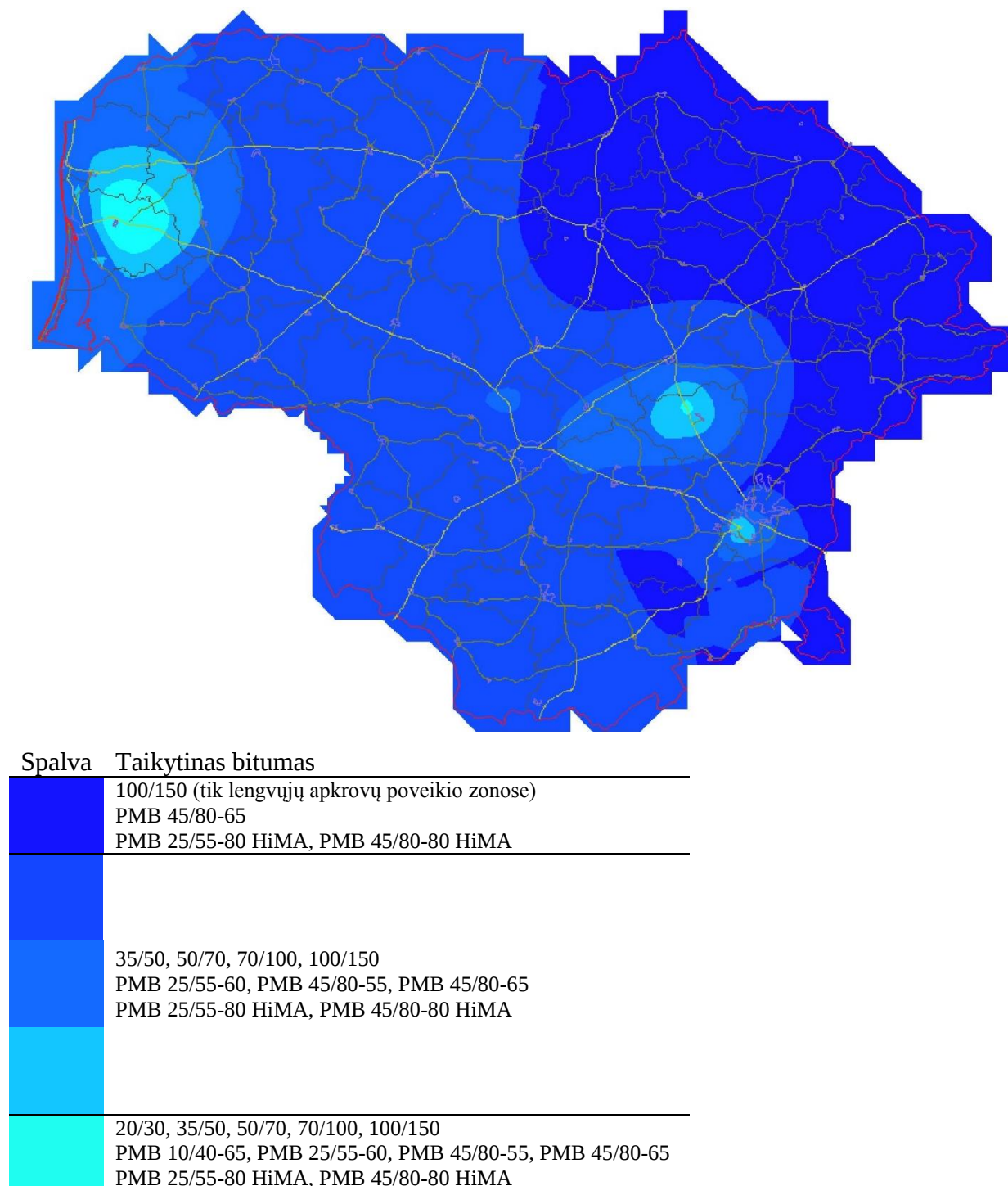
Nesant tikslių duomenų apie žemiausią aplinkos temperatūrą, asfalto mišinio gamybai taikytino bitumo parinkimui atsparumo šalčiui aspektu rekomenduojama naudoti bitumo atsparumo šalčiui žemėlapi (4.3 pav.). Pabrėžtina, kad tokį Lietuvos rajonavimą atliko L. Juknevičiūtė–Žilinskienė (2009) remiantis žemiausia mėnesio temperatūra pagal 1999-2008 m. duomenis. Tirtosios bitumo rūšys priskirtos kiekvienai zonai atsižvelgiant į nustatytą žemiausią PG temperatūrą ir L. Juknevičiūtės–Žilinskienės pateiktas žemiausias temperatūras, užfiksuotas Kelių oro sąlygų informacinės sistemos (KOSIS) stotelėse.

Atkreiptinas dėmesys, kad dėl vykstančio globalinio atšilimo mažėja dienų skaičius, kai oro temperatūra yra mažesnė nei 0 °C – klimatas šiltėja. Todėl ryškėja poreikis iš naujo atlikti Lietuvos rajonavimą pagal naujausius bent 10 metų laikotarpio žemiausios temperatūros duomenis. Sudarant žemėlapi rekomenduojama atsižvelgti į temperatūrų pasikartojamumą. Jeigu temperatūros, patenkančios į intervalą nuo žemiausios dangos temperatūros iki žemiausios dangos

**4.1 lentelė.** Tirtųjų bitumų tinkamumas asfalto mišinio gamybai priklausomai nuo žemiausios dangos temperatūros

| Žemiausia dangos temperatūra, °C | Bitumo rūšis                                                                                                                           |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -16                              | 20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 100/150<br>PMB 10/40-65, PMB 25/55-60, PMB 45/80-55, PMB 45/80-65<br>PMB 25/55-80 HiMA, PMB 45/80-80 HiMA |
| -22                              | 35/50, 50/70, 70/100, 100/150<br>PMB 25/55-60, PMB 45/80-55, PMB 45/80-65<br>PMB 25/55-80 HiMA, PMB 45/80-80 HiMA                      |
| -28                              | 100/150 (tik lengvųjų apkrovų poveikio zonose)<br>PMB 45/80-65<br>PMB 25/55-80 HiMA, PMB 45/80-80 HiMA                                 |

temperatūros pridėjus 1 °C, per 10 metų laikotarpį stebimos mažiau nei 0,01 %, tai šias temperatūras sudarant žemėlapi rekomenduojama eliminuoti. To priežastis – kelių tiesyboje stebima tendencija, jog ekonomiškiau taikyti pigesnes kelių tiesybos medžiagas ir užtaisyti susidarius pavienius temperatūrinius plyšius nei taikyti brangesnes kelių tiesybos medžiagas ir praktiškai 100 % apsaugoti dangą nuo temperatūrinių plyšių susidarymo. Be to esant tokiam mažam žemiausios temperatūros pasikartojamumui dėl šiltėjančio klimato tikėtina, kad iš viso nebus pasiekta ši eliminuojama žema temperatūra.



**4.3 pav.** Bitumo atsparumo šalčiui žemėlapis (Juknevičiūtė-Žilinskienė 2009)

Pabrėžtina, kad Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo institute analizuojami KOSIS stotelių duomenys Lietuvos rajonavimui pagal žemiausią dangos temperatūrą. Tačiau darbas dar nėra baigtas, todėl šiame darbe gauti rezultatai nėra pateikiami.

Bitumo atsparumo šalčiui tyrime pritaikyta Jungtinių Amerikos Valstijų bitumo klasifikavimo sistema, paremta bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimais, yra taikytina Lietuvos rajonavimui pagal bitumo atsparumą šalčiui. Tačiau atkreiptinas dėmesys, kad atliekamos KOSIS stotelių duomenų analizės metu pastebėta, jog žemiausia dangos temperatūra Lietuvoje kinta tolygiai, t. y. nėra ženklų temperatūros svyravimų tarp gretimai esančių KOSIS stotelių. Todėl rekomenduojama Lietuvoje klasifikuojant bitumus atsparumo šalčiui aspektu pagal bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimus taikyti mažesnę PG kitimo intervalą (pvz. 2 °C). Šiuo metu taikytas 6 °C temperatūros kitimo intervalas.

#### **4.3. Ekonominio efekto skaičiavimai**

Kelių priežiūra – bene didžiausias Kelių priežiūros ir plėtros programa (KPPP) finansuotinas segmentas, kuriam kasmet skiriama apie 20–30 % numatytų KPPP finansavimo lėšų (Lietuvos... 2015). Tačiau esama kelių būklė rodo, kad kelių priežiūrai skiriamos lėšos yra nepakankamos ir neužtikrina tvarių dangos konstrukcijų eksploatavimo. Todėl siekiant gerinti Lietuvos automobilių kelių tinklo būklę būtina įgyvendinti papildomas priemones, mažinančias kelių degradacijos procesą. Viena iš tokių priemonių – statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymas.

Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymas asfalto mišinio gamybai naudotino bitumo parinkimui užtikrintų asfalto mišinio atsparumą šalčio poveikiui – temperatūrinių plyšių susidarymui. Asfalto dangos prevencija temperatūrinių plyšių susidarymo atžvilgiu lemia ne tik lėtesnį dangos degradacijos procesą, bet ir mažesnius kelių priežiūros kaštus. Siekiant pagrįsti statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo teikiamą naudą atliktas ekonominio efekto skaičiavimas, nustatant 20 metų laikotarpio naudojimo metu susidarančių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštus. Skaičiavimai atlikti dviem atvejais:

- Analizuojant 5000 m<sup>2</sup> ploto logistikos terminalą;
- Analizuojant magistralinės reikšmės 9 m kelio dangos pločio automobilių kelią.

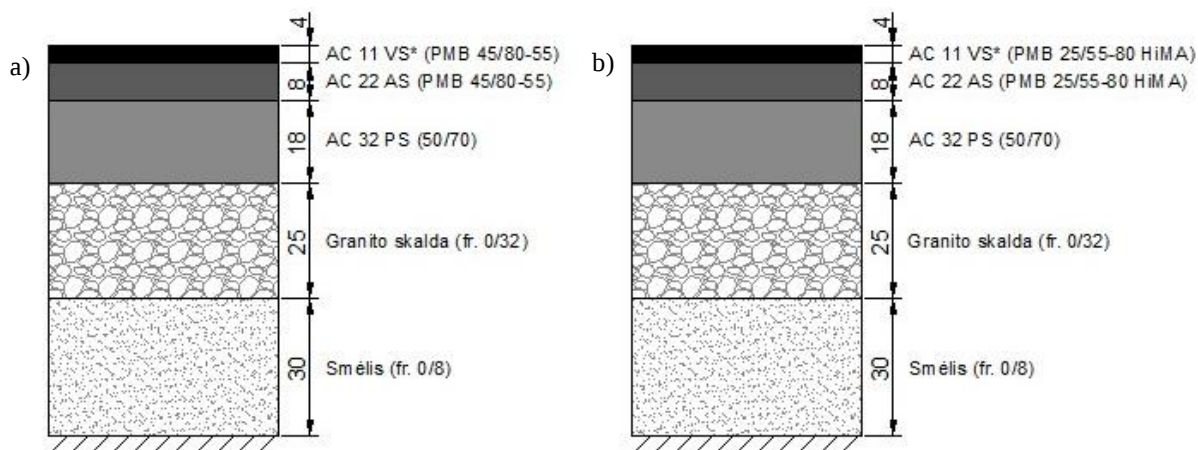
Pabrėžtina, kad abiem skaičiavimo atvejais nevertinti dangos įrengimo, sustiprinimo ir kiti kelių priežiūros kaštai (išskyrus kaštus dėl temperatūrinių plyšių susidarymo). Taip pat skaičiavimo metu priimama, kad abu analizuojamieji objektai yra Lietuvos rytuose.

### Logistikos terminalas

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo instituto vykdyto projekto „Taškinėms statinėms ir dinaminėms apkrovoms atsparios susisiekimo komunikacijų dangos konstrukcijos, pritaikytos besikeičiančio klimato sąlygoms, modelis“ (projekto kodas VP1-3.1-ŠMM-10-V-02-022) metu atlikta Lietuvoje įrengtų logistikos terminalų analizė. Jos metu nustatyta, kad Lietuvoje vyrauja vidutinio didumo logistikos terminalai, kuriuos sudaro apie 5000 m<sup>2</sup>. Todėl ekonominiuose skaičiavimuose analizuotas būtent tokio ploto logistikos terminalas.

To paties projekto vykdymo metu atliktas statinėms apkrovoms atsparių asfalto dangos konstrukcijų modeliavimas ir pasiūlytos tokiose zonose naudoti rekomenduotinos dangos konstrukcijos. Viena iš jų yra pateikta 4.4 pav. Ekonominio efekto skaičiavime priimama, kad būtent ši dangos konstrukcija bus įrengiama 5000 m<sup>2</sup> ploto logistikos terminale.

Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo ekonominio efekto skaičiavime, nustatant 20 metų laikotarpyje susidarančių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštus, nagrinėjami du 4.4 pav. pateiktos dangos konstrukcijos asfalto mišinio bitumo parinkimo variantai. Pirmajame variante asfalto mišinio gamybai taikytinas bitumas parinktas pagal *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės IT ASFALTAS 08*. Jose nurodyta, kad įrengiant SV dangos konstrukcijos klasės dangos konstrukciją asfalto viršutinio ir apatinio sluoksnio asfalto mišiniui gaminti naudojamas polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80-55. Šiame variante asfalto mišinio bitumo atsparumas šalčiui nėra įvertinamas. Antrajame variante asfalto mišinio gamybai taikytinas bitumas parinktas vadovaujantis statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modeliu. Pritaikius modelį gauta, kad šios dangos konstrukcijos asfalto mišiniui gaminti tinka gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 25/55-80 HiMA. Šiame variante įvertinamas asfalto mišinio bitumo atsparumas šalčiui.



**4.4 pav.** Logistikos terminale taikytina dangos konstrukcija: a) neįvertinant bitumo atsparumo šalčiui; b) įvertinant bitumo atsparumą šalčiui

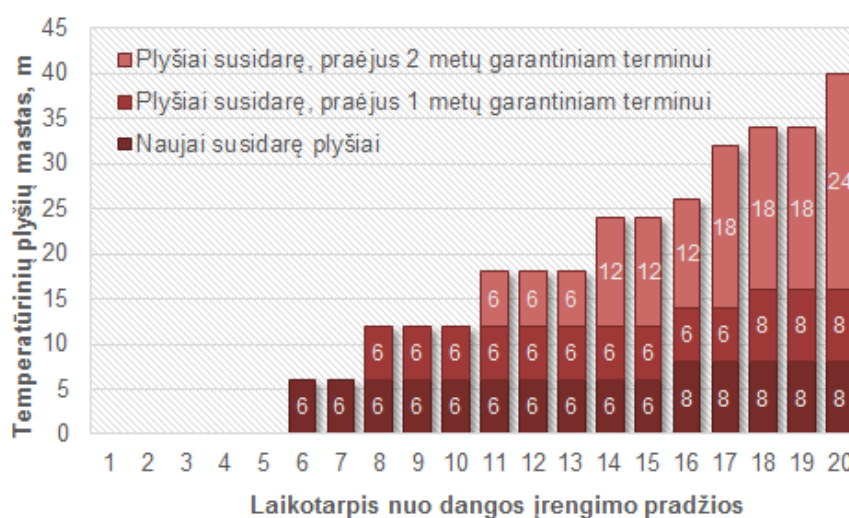
Kadangi nagrinėjamas logistikos terminalas yra Lietuvos rytinėje dalyje, tai pagal 4.3 pav. pateiktą bitumo atsparumo šalčiui žemėlapi šioje zonoje taikytini tik tie bitumai, kurių žemiausia temperatūra pagal eksploatacinių savybių reikalavimus (PG) yra  $-28^{\circ}\text{C}$ . Bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinio tyrimo metu gauta, kad polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 PG yra  $-22^{\circ}\text{C}$ , o gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 25/55-80 HiMA PG yra  $-28^{\circ}\text{C}$ . Vadinasi pirmuoju variantu dangos konstrukcijoje susidarys temperatūriniai plyšiai. Pabrėžtina, kad antruoju variantu dangos konstrukcijoje nesusidarys temperatūriniai plyšiai dėl žemų temperatūrų poveikio, tačiau gali pasireikšti temperatūriniai nuovargio plyšiai, kurie šiame darbe nėra nagrinėjami. Taip pat atkreiptinas dėmesys, kad abiem variantams dangos konstrukcijos sluoksnių storiai ir taikytinos medžiagos yra tos pačios, išskyrus bitumo rūšį. Tačiau abiem variantams naudojamas tik polimerais modifikuotas bitumas, todėl dangos konstrukcijų įrengimo kaina yra vienoda.

Susidariusių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų analizė atlikta 20-ies metų laikotarpiui. Skaičiavimo metu priimta, kad 1-5 dangos naudojimo metais dangoje nesusidaro temperatūrinių plyšių, 5-15 dangos naudojimo metais – kasmet susidaro po 6 m temperatūrinių plyšių, likusiais dangos naudojimo metais – kasmet susidaro po 8 m temperatūrinių plyšių. Tokia plyšių susidarymo tendencija pasirinkta remiantis užsienio šalių patirtimi temperatūrinių plyšių prognozavimo ir dangos funkcionavimo kriterijų nustatymo tematikoje (Morosiuk, Riley 2004; National... 2004; American... 2008).

Specifinių susisiekimo komunikacijų statinių dangoms nėra pateikiama ribinių dangos funkcionavimo sąlygų, todėl šiame ekonominio efekto skaičiavime remtasi automobilių keliuose taikomomis dangos funkcionavimo kriterijais. Automobilių keliuose ribinis susidariusių temperatūrinių plyšių kiekis 20 metų eksploatacinio laikotarpio metu priklauso nuo kelio reikšmės ir kinta nuo 95 m/km iki 190 m/km (National... 2004; American... 2008). Vadinasi, temperatūriniais plyšiais neturi būti pažeistas daugiau kaip 1 % nagrinėjamo dangos ploto. Kitaip sakant  $5000\text{ m}^2$  logistikos terminalo plote 20 metų eksploatacinio laikotarpio metu neturi susidaryti daugiau kaip 100 m temperatūrinių plyšių (priimant, kad pažeistos dangos plotis ties plyšiu yra 0,5 m).

Remiantis *Asfalto dangų plyšių, siūlių ir prijungčių su defektais taisymo rekomendacijomis R PT 11* užtaisymo plyšio garantinis terminas priklauso nuo naudojamo metodo ir yra 1 metai arba 2 metai. Ekonominio efekto skaičiavimuose priimta, kad visiems naujai susidariusiems plyšiams taikomas 1 metų garantinis terminas, o pakartotinai užtaisomiems – 2 metų garantinis terminas. Plyšio užtaisymo kaina, suteikiant 1 metų garantinį terminą, – 6 Eur/m, suteikiant 2 metų garantinį terminą – 11 Eur/m. 20 metų laikotarpio  $5000\text{ m}^2$  logistikos terminalo plyšių užtaisymo grafikas pateiktas 4.5 pav.

Atliekant dabartinės (esamos) temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų vertės skaičiavimą 20 metų laikotarpyje įvertinta laiko įtaką pinigų srautams priimant diskonto normą lygią 6 % (VĮ Transporto... 2006; Čygas ir kt. 2006; European... 2008). Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.2 lentelėje. Apskaičiuota, kad 20-ies metų laikotarpyje 5000 m<sup>2</sup> ploto logistikos terminale susidariusių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų dabartinė vertė yra 1503,60 Eur. Vadinasi vietoj polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 asfalto mišinio gamybai naudojant gausiai polimerais modifikuotą bitumą PMB 25/55-80 HiMA kasmet logistikos terminalo asfalto dangos priežiūrai kasmet vidutiniškai būtų sutaupoma po 75,18 Eur.



4.5 pav. Plyšių užtaisymo grafikas

4.2 lentelė. 5000 m<sup>2</sup> ploto logistikos terminalo kaštai temperatūrinių plyšių užtaisymui

| Metai | Temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai, Eur |             | Diskontavimo koeficientas |
|-------|---------------------------------------------|-------------|---------------------------|
|       | Nediskontuota                               | Diskontuota |                           |
| 2016  | 0,00                                        | 0,00        | 1                         |
| 2017  | 0,00                                        | 0,00        | 0,9524                    |
| 2018  | 0,00                                        | 0,00        | 0,9070                    |
| 2019  | 0,00                                        | 0,00        | 0,8638                    |
| 2020  | 0,00                                        | 0,00        | 0,8227                    |
| 2021  | 36,00                                       | 28,21       | 0,7835                    |
| 2022  | 36,00                                       | 26,86       | 0,7462                    |
| 2023  | 102,00                                      | 72,49       | 0,7107                    |
| 2024  | 102,00                                      | 69,04       | 0,6768                    |
| 2025  | 102,00                                      | 65,75       | 0,6446                    |
| 2026  | 168,00                                      | 103,14      | 0,6139                    |
| 2027  | 168,00                                      | 98,23       | 0,5847                    |
| 2028  | 168,00                                      | 93,55       | 0,5568                    |
| 2029  | 234,00                                      | 124,10      | 0,5303                    |
| 2030  | 234,00                                      | 118,19      | 0,5051                    |
| 2031  | 246,00                                      | 118,33      | 0,4810                    |
| 2032  | 312,00                                      | 142,93      | 0,4581                    |

#### 4.2 lentelės tęsinys

| Metai    | Temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai, Eur |             | Diskontavimo koeficientas |
|----------|---------------------------------------------|-------------|---------------------------|
|          | Nediskontuota                               | Diskontuota |                           |
| 2033     | 334,00                                      | 145,72      | 0,4363                    |
| 2034     | 334,00                                      | 138,78      | 0,4155                    |
| 2035     | 400,00                                      | 158,29      | 0,3957                    |
| Iš viso: | 2976,00                                     | 1503,60     |                           |

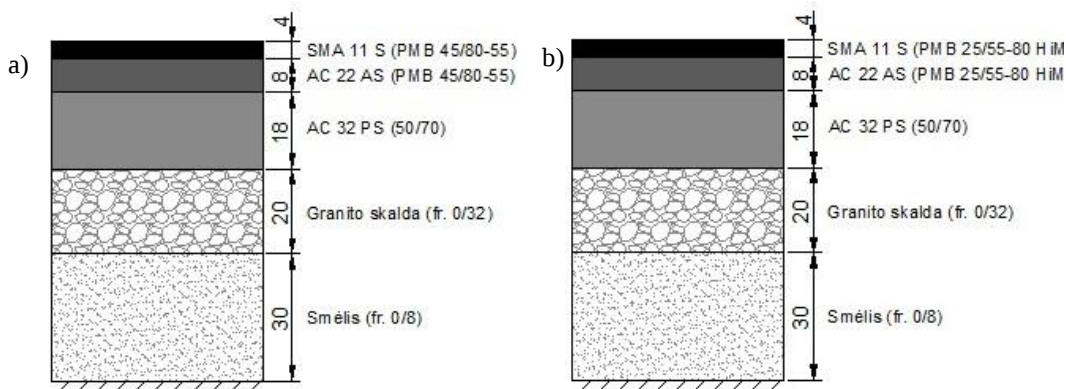
Dabartinė kaštų vertė: 1503,60 Eur

Diskonto norma: 6,00%

#### Magistralinės reikšmės automobilių kelias

Magistraliniuose keliuose vyrauja sunkusis transportas, todėl šiuose keliuose įprastai rengiamos SV dangos konstrukcijos klasę atitinkančios dangos konstrukcijos, kurios parenkamos pagal *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07*. Remiantis *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklėmis IT ASFALTAS 08* įrengiant SV dangos konstrukcijos klasės dangos konstrukciją asfalto viršutinis sluoksnis rengiamas iš skaldos ir mastikos asfalto (SMA), kuriam gaminti naudojamas polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80-55, asfalto apatinis sluoksnis – iš asfaltbetonio (AC), kuriam gaminti taip pat naudojamas polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80-55, asfalto pagrindo sluoksnis – iš asfaltbetonio, kuriam gaminti naudojamas kelių bitumas. Magistraliniuose automobilių keliuose taikytina SV dangos konstrukcijos klasę atitinkanti dangos konstrukcija pateikta 4.6 pav. Šiuo variantu asfalto mišinio bitumas parinktas neatsižvelgiant į jo atsparumą šalčiui.

Tai pačiai dangos konstrukcijai įrengti naudotino asfalto mišinio bitumo parinkimui pritaikius statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį gauta, kad asfalto mišiniui gaminti tinka gausiai polimerais modifikuotas bitumas PMB 25/55-80 HiMA. Šiame variante įvertintas asfalto mišinio bitumo atsparumas šalčiui.



**4.6 pav.** Magistraliniuose keliuose taikytina SV dangos konstrukcijos klasės dangos konstrukcija: a) neįvertinant bitumo atsparumo šalčiui; b) įvertinant bitumo atsparumą šalčiui

Kadangi nagrinėjamas magistralinis kelias yra Lietuvos rytinėje dalyje, tai pagal 4.3 pav. pateiktą bitumo atsparumo šalčiui žemėlapi šioje zonoje taikytini tik tie bitumai, kurių žemiausia temperatūra pagal eksploatacinių savybių reikalavimus (PG) yra  $-28^{\circ}\text{C}$ . Bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinio tyrimo metu gauta, kad polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 PG yra  $-22^{\circ}\text{C}$ , o gausiai polimerais modifikuotas bitumo PMB 25/55-80 HiMA PG yra  $-28^{\circ}\text{C}$ . Vadinasi pirmuoju variantu dangos konstrukcijoje susidarys temperatūriniai plyšiai. Pabrėžtina, kad antruoju variantu dangos konstrukcijoje nesusidarys temperatūriniai plyšiai dėl žemų temperatūrų poveikio, tačiau gali pasireikšti temperatūriniai nuovargio plyšiai, kurie šiame darbe nėra nagrinėjami. Taip pat atkreiptinas dėmesys, kad abiem variantams dangos konstrukcijos sluoksnių storiai ir taikytinos medžiagos yra tos pačios, išskyrus bitumo rūšį. Tačiau abiem variantams naudojamas tik polimerais modifikuotas bitumas, todėl dangos konstrukcijų įrengimo kaina yra vienoda.

Susidariusių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų analizė atlikta 20-ies metų laikotarpiui. Skaičiavimo metu priimta, kad 1-5 dangos naudojimo metais dangoje nesusidaro temperatūrinių plyšių, 5-15 dangos naudojimo metais – kasmet susidaro po 1 temperatūrinį plyšį 1-ame km, likusiais dangos naudojimo metais – kasmet susidaro po 2 temperatūrinius plyšius 1-ame km. Tokia plyšių susidarymo tendencija pasirinkta remiantis užsienio šalių patirtimi temperatūrinių plyšių prognozavimo ir dangos funkcionavimo kriterijų nustatymo tematikoje (Morosiuk, Riley 2004; National... 2004; American... 2008). Atkreiptinas dėmesys, jog skaičiavimuose priimta, kad visi temperatūriniai plyšiai susidaro per visą kelio dangos plotį, t. y. 9,0 m ilgio.

Automobilių keliuose ribinis temperatūrinių plyšių susidarymo kiekis 20 metų eksploatacinio laikotarpio metu priklauso nuo kelio reikšmės ir kinta nuo 95 m/km iki 190 m/km (National... 2004; American... 2008). Kitaip sakant esant 9 m kelio dangos pločiui nagrinėjamame kelyje 20 metų eksploatacinio laikotarpio metu neturi susidaryti daugiau kaip 21 plyšys/km, t. y. temperatūriniais plyšiais neturi būti pažeista daugiau kaip 1 % nagrinėjamo dangos ploto.

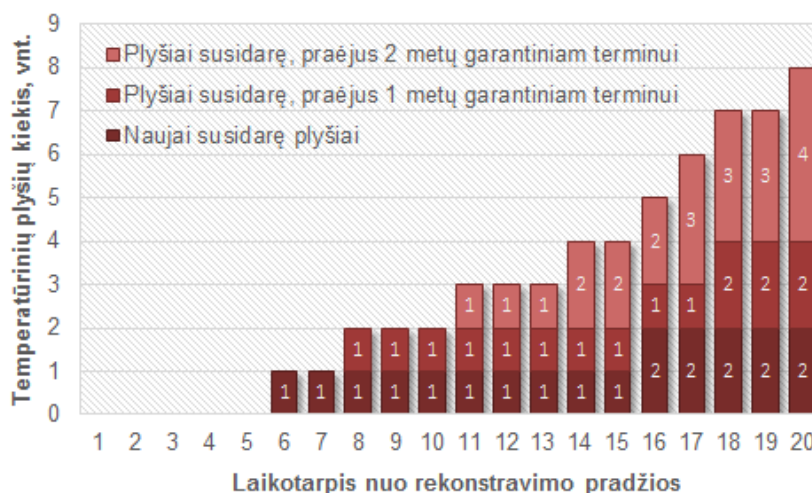
Remiantis *Asfalto dangų plyšių, siūlių ir prijungčių su defektais taisymo rekomendacijomis R PT 11* užtaisyto plyšio garantinis terminas priklauso nuo naudojamo metodo ir yra 1 metai arba 2 metai. Ekonominio efekto skaičiavimuose priimta, kad visiems naujai susidariusiems plyšiams taikomas 1 metų garantinis terminas, o pakartotinai užtaisomiems – 2 metų garantinis terminas. 9 m ilgio plyšio užtaisymo kaina, suteikiant 1 metų garantinį terminą, – 54 Eur, suteikiant 2 metų garantinį terminą – 99 Eur. Atkreiptinas dėmesys, kad priimama jog plyšys susidarys per visą kelio dangos plotį. Magistralinės reikšmės 9 m kelio dangos pločio automobilių kelyje susidarančių plyšių užtaisymo grafikas priklausomai nuo praėjusio laikotarpio nuo dangos rekonstravimo pradžios pateiktas 4.7 pav.

Atliekant dabartinės (esamos) temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų vertės skaičiavimą 20 metų laikotarpyje įvertinta laiko įtaką pinigų srautams priimant diskonto normą lygią 6 % (VĮ Transporto... 2006; Čygas *ir kt.* 2006; European... 2008). Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.3 lentelėje. Pabrėžtina, kad šioje lentelėje pateikti 1-am kilometrui tenkantys temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai priklausomai nuo dangos eksploatavimo laikotarpio po rekonstravimo pradžios. Apskaičiuota, kad 20-ies metų laikotarpyje 1-ame kilometre susidarančių temperatūrinių plyšių užtaisymo dabartinė kaštų vertė yra 2119,84 Eur.

Nustatyta, kad pastaruoju laikotarpiu Lietuvos valstybinės reikšmės kelių asfalto dangų rekonstravimo ir stiprinimo darbų apimtys per metus vidutiniškai sudarė po 230–260 km (Lietuvos... 2015). Todėl apskaičiuojant statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo teikiamą ekonominę naudą priimta, kad per 1-15 metus kasmet bus rekonstruojama po 50 km magistralinių kelių, o likusiais metais po 30 km įrengiant 4.6 pav. pateiktą dangos konstrukciją. Tokiu atveju 20-ies metų laikotarpyje būtų rekonstruota apie 50 % (880 km) magistralinės reikšmės automobilių kelių tinklo.

Tam, kad nustatyti kiek temperatūrinių plyšių reikės užtaisyti per 20-ies metų laikotarpį rekonstruotuose magistraliniuose keliuose sudaryta temperatūrinių plyšių užtaisymo grafiko matrica (4.4 lentelė). Apskaičiuota, kad iš viso reikės užtaisyti 16300 temperatūrinių plyšių.

Ekonominio efekto skaičiavimo rezultatai pateikti 4.5 lentelėje. Apskaičiuota, kad 20-ies metų laikotarpyje rekonstruotinių magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių kelių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštų dabartinė vertė yra 1950345,03 Eur. Vadinasi vietoj polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 asfalto mišinio gamybai naudojant gausiai polimerais modifikuotą bitumą PMB 25/55-80 HiMA rekonstruotų magistralinės reikšmės automobilių kelių priežiūrai kasmet vidutiniškai būtų sutaupoma po 97517,25 Eur. Tai sudaro apie 0,13 % kelių priežiūrai skiriamų KPPP finansavimo lėšų ir apie 11 % magistralinių kelių priežiūrai skiriamų KPPP finansavimo lėšų.



4.7 pav. Plyšių užtaisymo grafikas

**4.3 lentelė.** Magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių kelio temperatūrinių plyšių, susidarančių 1–ame kilometre, užtaisymo kaštai 20-ies metų laikotarpyje

| Metai           | Temperatūrinių plyšių, susidarančių 1-ame km, užtaisymo kaina, Eur |                | Diskontavimo koeficientas |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------|
|                 | Nediskontuota                                                      | Diskontuota    |                           |
| 2016            | 0,00                                                               | 0,00           | 1                         |
| 2017            | 0,00                                                               | 0,00           | 0,9434                    |
| 2018            | 0,00                                                               | 0,00           | 0,8900                    |
| 2019            | 0,00                                                               | 0,00           | 0,8396                    |
| 2020            | 0,00                                                               | 0,00           | 0,7921                    |
| 2021            | 54,00                                                              | 40,35          | 0,7473                    |
| 2022            | 54,00                                                              | 38,07          | 0,7050                    |
| 2023            | 153,00                                                             | 101,75         | 0,6651                    |
| 2024            | 153,00                                                             | 95,99          | 0,6274                    |
| 2025            | 153,00                                                             | 90,56          | 0,5919                    |
| 2026            | 252,00                                                             | 140,72         | 0,5584                    |
| 2027            | 252,00                                                             | 132,75         | 0,5268                    |
| 2028            | 252,00                                                             | 125,24         | 0,4970                    |
| 2029            | 351,00                                                             | 164,56         | 0,4688                    |
| 2030            | 351,00                                                             | 155,25         | 0,4423                    |
| 2031            | 405,00                                                             | 168,99         | 0,4173                    |
| 2032            | 504,00                                                             | 198,40         | 0,3936                    |
| 2033            | 603,00                                                             | 223,93         | 0,3714                    |
| 2034            | 603,00                                                             | 211,26         | 0,3503                    |
| 2035            | 702,00                                                             | 232,02         | 0,3305                    |
| <b>Iš viso:</b> | <b>4842,00</b>                                                     | <b>2119,84</b> |                           |

**Dabartinė kaštų vertė: 2119,84 Eur**

Diskonto norma: 6,00%

**4.4 lentelė.** 20-ies metų laikotarpyje rekonstruojamuose magistraliniuose keliuose susidariusių temperatūrinių plyšių užtaisymo grafiko matrica

|                         |      | Laikotarpis kada atlikta rekonstrukcija, metai                                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         |      | 2016                                                                                                 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 |
|                         |      | Kiekvienais metais rekonstruotuose keliuose užtaisomų susidariusių temperatūrinių plyšių kiekis, vnt |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 20-ies metų laikotarpis | 2015 |                                                                                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2016 | 0                                                                                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2017 | 0                                                                                                    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2018 | 0                                                                                                    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2019 | 0                                                                                                    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2020 | 0                                                                                                    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2021 | 50                                                                                                   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2022 | 50                                                                                                   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2023 | 100                                                                                                  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2024 | 100                                                                                                  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2025 | 100                                                                                                  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2026 | 150                                                                                                  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2027 | 150                                                                                                  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2028 | 150                                                                                                  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2029 | 200                                                                                                  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |      |
|                         | 2030 | 200                                                                                                  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |      |
|                         | 2031 | 250                                                                                                  | 200  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |
|                         | 2032 | 300                                                                                                  | 250  | 200  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |      |
|                         | 2033 | 350                                                                                                  | 300  | 250  | 200  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |      |
|                         | 2034 | 350                                                                                                  | 350  | 300  | 250  | 200  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |
|                         | 2035 | 400                                                                                                  | 350  | 350  | 300  | 250  | 200  | 200  | 150  | 150  | 150  | 100  | 100  | 100  | 50   | 50   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

**4.5 lentelė.** Rekonstruotinių magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių kelių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai 20-ies metų laikotarpyje

| Metai           | Temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštai, Eur |                   | Diskontavimo koeficientas |
|-----------------|---------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
|                 | Nediskontuota                               | Diskontuota       |                           |
| 2016            | 0,00                                        | 0,00              | 1                         |
| 2017            | 0,00                                        | 0,00              | 0,9524                    |
| 2018            | 0,00                                        | 0,00              | 0,9070                    |
| 2019            | 0,00                                        | 0,00              | 0,8638                    |
| 2020            | 0,00                                        | 0,00              | 0,8227                    |
| 2021            | 2700,00                                     | 2017,60           | 0,7835                    |
| 2022            | 5400,00                                     | 3806,79           | 0,7462                    |
| 2023            | 20700,00                                    | 13766,68          | 0,7107                    |
| 2024            | 36000,00                                    | 22586,85          | 0,6768                    |
| 2025            | 51300,00                                    | 30364,39          | 0,6446                    |
| 2026            | 89100,00                                    | 49752,97          | 0,6139                    |
| 2027            | 126900,00                                   | 66849,34          | 0,5847                    |
| 2028            | 164700,00                                   | 81850,85          | 0,5568                    |
| 2029            | 234900,00                                   | 110130,29         | 0,5303                    |
| 2030            | 305100,00                                   | 134946,02         | 0,5051                    |
| 2031            | 406350,00                                   | 169555,66         | 0,4810                    |
| 2032            | 557550,00                                   | 219477,49         | 0,4581                    |
| 2033            | 768600,00                                   | 285430,69         | 0,4363                    |
| 2034            | 979650,00                                   | 343214,29         | 0,4155                    |
| 2035            | 1260450,00                                  | 416595,12         | 0,3957                    |
| <b>Iš viso:</b> | <b>5009400,00</b>                           | <b>1950345,03</b> |                           |

**Dabartinė kaštų vertė: 1950345,03 Eur**

Diskonto norma: 6,00%

#### 4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Rekomenduojama bitumo atsparumą šalčiui užtikrinti taikant patikslintą statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelį, kurį sudaro šeši etapai.
2. Rekomenduojama statinių apkrovų zonose naudojamų asfalto mišinių gamybai taikyti polimerais modifikuotus bitumus PMB 25/55–60, PMB 10/40-65 ir PMB 45/80-65 bei gausiai polimerais modifikuotus bitumus PMB 25/55-80 HiMA ir PMB 45/80-80 HiMA atsižvelgiant į nustatytą patikslintą kritinę temperatūrą.
3. Rekomenduojama kelių bitumo 20/30 ir polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/50-55 taikymą statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamybai pagrįsti papildomais tyrimais įrodant, kad aukščiausia dangos temperatūra neviršys +55 °C arba bitumo minkstėjimo temperatūra yra didesnė nei +60 °C.

4. Rekomenduojama asfalto mišinio gamybai naudoti tokį bitumą, kurio žemiausia temperatūra pagal bitumo eksploatacinių charakteristikų (PG) reikalavimus yra ne aukštesnė nei žemiausia dangos (aplinkos) temperatūra statinio teritorijoje.
5. Rekomenduojama atlikti Lietuvos rajonavimą išskiriant kiekvienam rajonui taikytinus bitumus atsparumo šalčiui aspektu pagal naujausius bent 10 metų laikotarpio žemiausios temperatūros duomenis atsižvelgiant į temperatūrų pasikartojamumą. Esant mažesniai nei 0,01 % temperatūros intervalo nuo žemiausios dangos temperatūros iki vienu laipsniu aukštesnės temperatūros nei žemiausia dangos temperatūra pasikartojamumui rekomenduojama į šį intervalą patenkančias temperatūras eliminuoti.
6. Rekomenduojama Lietuvoje taikant Jungtinių Amerikos Valstijų bitumo klasifikavimo sistemą, paremtą bitumo eksploatacinių charakteristikų reikalavimais, naudoti mažesnę žemos temperatūros kitimo intervalą (pvz. 2 °C vietoj 6 °C).
7. Atlikus statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymo ekonominio efekto skaičiavimus nustatyta, kad įvertinus bitumo atsparumą šalčiui 20-ies metų laikotarpyje 5000 m<sup>2</sup> ploto logistikos terminalo dangos priežiūrai būtų sutaupoma 1503,60 Eur, o rekonstruotuose magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių keliuose, kai 1-15 metais kasmet rekonstruojama po 50 km magistralinių kelių, o likusiais metais po 30 km – 1950345,03 Eur.
8. Sudarius 20-ies metų laikotarpyje rekonstruotuose magistralinės reikšmės 9,0 m kelio dangos pločio automobilių keliuose susidariusių temperatūrinių plyšių užtaisymo matricą apskaičiuota, kad iš viso rekonstravus apie 50 % (880 km) Lietuvos magistralinių kelių tinklo būtų reikalinga užtaisyti 16300 temperatūrinių plyšių.
9. Apskaičiavus magistralinės reikšmės automobilių keliuose 20-ies metų laikotarpyje susidarančių temperatūrinių plyšių užtaisymo kaštus, gauta, kad įvertinus asfalto mišinių bitumo atsparumą šalčiui magistralinių kelių priežiūrai kasmet vidutiniškai būtų sutaupoma apie 0,13 % kelių priežiūrai skiriamų KPPP finansavimo lėšų, o tai sudaro apie 11 % magistralinių kelių priežiūrai skiriamų KPPP finansavimo lėšų..

## BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikus užsienio šalyse taikomų metodų, įvertinančių bitumo atsparumą šalčiui, analizę nustatyta, kad bitumas laikomas šalčiui atspariu, jei jo kritinė temperatūra, kurios nustatymo ribinės sąlygos priklauso nuo bitumo atsparumui šalčiui įvertinti taikomo metodo, yra žemesnė nei žemiausia asfalto dangos temperatūra.
2. Nustatyta, kad visi tirtieji bitumai tenkina jiems keliamus reikalavimus pagal *Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašą TRA BITUMAS 08/14* išskyrus kelių bitumą 20/30, kurio minkštėjimo temperatūra (63,6 °C) viršijo 0,95 % reikalaujamą didžiausią vertę (63,0 °C). Statinėms apkrovoms atsparių asfalto mišinių gamyboje bitumo minkštėjimo temperatūros reikalaujamos didžiausios vertės viršijimas laikomas teigiamu reiškiniu.
3. Atlikus tirtųjų bitumų nustatytos kritinės temperatūros, tenkinančios lenkimo standžio  $S(60) \leq 300$  MPa ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60) \geq 0,3$  sąlygas, pasiskirstymo analizę gauta, kad 90,9 % tirtųjų bitumų kritinė temperatūra nustatyta pagal lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60) = 0,3$  sąlygą.
4. Atlikus tirtųjų bitumų patikslintos kritinės temperatūros kitimo analizę nustatytas net iki 12,25 °C temperatūrų skirtumas pagrindžia, asfalto mišinio gamybai taikytino bitumo parinkimo būtinumą įvertinant jo atsparumą šalčiui.
5. Atlikus bitumo atsparumo šalčiui vertinimą pagal patikslintą kritinę temperatūrą nustatyta, kad visi tirtieji bitumai taikytini asfalto mišiniams gaminti, naudojamiems ne žemesnėje nei -16,56 °C temperatūroje. Šalčio poveikiui atspariausi bituminiai rišikliai – gausiai polimerais modifikuoti bitumai PMB 25/55–80 HiMA ir PMB 45/80–80 HiMA, polimerais modifikuotas bitumas PMB 45/80–65 ir kelių bitumas 100/150 – taikytini asfalto mišiniams gaminti, naudojamiems ne žemesnėje nei -28,20 °C temperatūroje.
6. Atlikus bitumo atsparumo šalčiui eksperimentinį tyrimą ir patikslinus teorinį bitumo atsparumo šalčiui modelį, sukurtas Lietuvoje taikytinas modelis asfalto mišinio bitumo parinkimui atsparumo šalčiui atžvilgiu pagal lenkiamo strypelio reometru (tritaškiu lenkimu) taikant įprastus bandinius nustatytas lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  vertes.
7. Atsižvelgus į pasaulyje vyraujančias dangos konstravimo tendencijas numatyta pateiktąjį statinėms apkrovoms atspaus asfalto mišinio bitumo atsparumo šalčiui modelio taikymą ateityje orientuoti ne tik į asfalto viršutinio, bet ir į asfalto apatinio sluoksnio asfalto mišinio bitumo parinkimą atsparumo šalčiui aspektu.

8. Suklasifikavus tirtuosius bitumus pagal Jungtinių Amerikos Valstijų bitumo klasifikavimo sistemą ir priskyrus kiekvieną bitumą tam tikram Lietuvos rajonui remiantis L. Juknevičiūtės–Žilinskienės atliktu Lietuvos rajonavimu gauta, kad Lietuvos pajūrio zonoje taikyti bitumai, kurių patikslinta kritinė temperatūra ne aukštesnė nei -16 °C, vidurio Lietuvoje – ne aukštesnė nei -22 °C, rytinėje Lietuvos dalyje – ne aukštesnė nei -28 °C
9. Eksperimentinio tyrimo rezultatų analizės metu pritaikius Jungtinių Amerikos Valstijų bitumo klasifikavimo sistemą ir priskyrus tirtuosius bitumus skirtingiems Lietuvos rajonams atsižvelgiant į rajonuose vyraujančią žemiausią dangos temperatūrą, nustatyta, kad 6 °C temperatūros kitimo intervalas Lietuvos klimatinėms sąlygoms yra per didelis. Rekomenduojama taikyti 2 °C arba 4 °C kitimo intervalą.
10. Ekonominio efekto skaičiavimais nustatyta, kad tinkamas bitumo parinkimas atsparumo šalčiui aspektu 20–ies metų eksploataciniu laikotarpiu kasmet leistų sutaupyti nuo 75,18 Eur iki 97,52 tūkst. Eur., priklausomai nuo skirtingų statinių rūšies ir asfalto dangos ploto.

## AUTORIAUS PUBLIKACIJOS

*Straipsniai recenzuojamuose „ISI Web of Science“ moksliniuose leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį:*

1. Vaitkus, Audrius; Vorobjovas, Viktoras; Gražulytė, Judita; Kleizienė, Rita; Šernas, Ovidijus; Tumavičė, Aja. Design solutions for pavements structure affected by static and impact load // *The Baltic journal of road and bridge engineering*. Vilnius : Technika. ISSN 1822-427X. Vol. 9, no. 4 (2014), p. 269-275.

*Straipsniai recenzuojamuose „ISI Web of Science“ moksliniuose leidiniuose:*

1. Gražulytė, Judita; Žilionienė, Daiva; Tuminienė, Faustina. Otta seal – the new way to solve problems of maintenance of gravel roads in Lithuania // *9th International Conference "Environmental Engineering"*, May 22-23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius: Technika, 2014. ISSN 2029-7092, ISBN 9786094576409. p. [1-6].
2. Vaitkus, Audrius; Gražulytė, Judita; Kleizienė, Rita. Influence of static and impact load on pavement performance // *9th International Conference "Environmental Engineering"*, May 22-23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius : Technika, 2014. ISSN 2029-7092, ISBN 9786094576409. p. [1-9].
3. Vaitkus, Audrius; Vorobjovas, Viktoras; Gražulytė, Judita; Tumavičė, Aja. Performance of pavements affected by static and impact load // *Applied mechanics and materials. Selected, peer reviewed papers from the International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (ICMECS 2014)*, September 27-28, 2014, Weihai, Shandong Province, China Zurich : Trans Tech Publications. ISSN 1660-9336, ISBN 9783038352105. Vol. 614 (2014), p. 627-630.

*Straipsniai kituose recenzuojamuose moksliniuose leidiniuose:*

1. Vaitkus, Audrius; Vorobjovas, Viktoras; Gražulytė, Judita; Kleizienė, Rita. Design model for static and impact load affected pavements // *CETRA 2014 : proceedings of the 3rd international conference on road and rail infrastructures*, 28–30 April 2014, Split, Croatia. Split : University of Zagreb, 2014. ISSN 1848-9850. p. 301-307.

*Straipsniai nerecenzuojamuose moksliniuose leidiniuose:*

1. Gražulytė, Judita. Šalčio poveikio bitumui vertinimas lenkiamo strypelio reometru // *Mokslinis seminaras „Keliai ir saugus eismas“*, balandžio 30 d. 2015, Vilnius.

## LITERATŪRA

- AASHTO M 320 *Performance-Graded Asphalt Binder*. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC. 2010. 8 p.
- AASHTO R 49 *Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders*. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC. 2013. 19 p.
- AASHTO T 314 *Determination the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)*. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC. 2012. 18 p.
- AASHTO T 315 *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC. 2012. 33 p.
- AASHTO TP 92 *Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device*. American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington, DC. 2014. 14 p.
- Airey, G. D. 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14), 1709–1719. doi:10.1016/S0016-2361(03)00146-7
- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2008. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice*.
- Anderson, D. A. (1999). Superpave Binder Tests and Specification. In *In Workshop Briefing, Performance Related Properties for Bituminous Binders* (p. May). Eurobitume Workshop, Luxembourg.
- Anderson, D. A.; Kennedy, T. 1993. Development of SHRP Binder Specification. In *Association of Asphalt Pavement Technologies (AAPT)*: Vol. 62, 481–507.
- Arasan, S.; Yenera, E.; Hattatoglu, F.; Hınıslioglu, S.; Akbuluta, S. 2011. Correlation between Shape of Aggregate and Mechanical Properties of Asphalt Concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 12(2), 239–262. doi:10.3166/rmpd.12.239-262
- Asfalto dangų plyšių, siūlių ir prijungčių su defektais taisymo rekomendacijos R PT 11*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2011. 45 p.
- Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas TRA ASFALTAS 08*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2008. 61 p.
- Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų apraše TRA BITUMAS 08/14*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2014. 18 p.
- Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės IT ASFALTAS 08*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2008. 62 p.

- Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07.*  
Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2008. 16 p.
- Bahia, H.; Anderson, D. 1995. Strategic highway research program binder rheological parameters: background and comparison with conventional properties. *Transportation Research Record No. 1488*, 32–39.
- Balay, J. M.; Breton, F.; Buytet, S.; Dumont, H.; Dunand, M. 2014. Pavement Design of Logistics Platforms According to Rational Road Approach. *Revue Générale Des Routes et de L'aménagement*. 32–40 p. ISSN 1290–256X.
- Błażejowski, K.; Olszacki, J.; Peciakowski, H. 2014. *Bitumen Handbook*.
- Boutin, G.; Lupien, C. 2000. Thermal Cracking of Asphalt Pavement. In *2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress*: 45–59. Barcelona.
- Christopher, W. J.; Crawford, F. J.; Edward, T. H.; Adock, M.; Delaney, E. P.; Freer, H. 2011. A *Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. NCHRP Report No. 673.
- Collins, R.; Watson, D.; Johnson, A.; Wu, Y. 1997. Effect of Aggregate Degradation on Specimens Compacted by Superpave Gyratory Compactor. *Transportation Research Record*. doi:10.3141/1590-01
- Container Handbook: Cargo loss prevention information from German marine insurers.* [interaktyvus]. 2013. German Insurance Association [žiūrėta 2013-12-05]. Prieiga per internetą: <[http://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/](http://www.containerhandbuch.de/chb_e/)>.
- Cross, S. A.; Brown, E. R. 1992. Selection of Aggregate Properties to Minimize Rutting of Heavy Duty Pavements. In *Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147*: 45–67.
- Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Miškinis, D.; Puodžiukas, V. 2006. *Automobilių kelių investiciniai projektai*. Vilnius: Technika, 2006.
- Dimonie, M.; Dimonie, D.; Vasillevici, G.; Beica, V.; Bombos, D. 2006. Modifying Polymers for the Decrease in Road Bitumen Penetration. *Material Plastice*, 43(4), 312–316.
- Dongré, R. N. 2001. *Informal Presentation on Fracture Mechanics to FHWA Asphalt Binder Expert Task Group*.
- Dongré, R. N.; Button, J. W.; Kluttz, R. Q.; Anderson, D. A. 1991. Evaluation of Superpave binder specification with performance of polymer-modified asphalt pavements. In: *Jester RN (Ed) Progress of Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) Evaluation and Implementation*. ASTM STP 1322, American Society for Testing and Materials, 88–100.
- Erichsen, E.; Ulvik, A.; Sævik, K. 2011. Mechanical Degradation of Aggregate by the Los Angeles-, the Micro-Deval- and the Nordic Test Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3), 333–337. doi:10.1007/s00603-011-0140-y
- European Commission Directorate General Regional Policy. 2008. *Guide to Cost–Benefit Analysis of investment for Pre–Accession*.

- European Commission Directorate General Transport. 2001. *COST 334: Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*. Belgium.
- Fraass, A. 1937. Test Methods for Bitumen and Bituminous Mixture with Specific Reference to Low Temperature. *Bitumen*, 152–155.
- French civil aviation technical center. (2009). *Bituminous Mixtures and surface Dressings for Airport Pavements. Guide to the Application of Standards. Second edition*. Bonneuil-sur-Marne.
- Fwa, T. F.; Choo, Y. S.; Liu, Y. 2003. Effect of Aggregate Spacing on Skid Resistance of Asphalt Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 129(4), 420–426. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(420)
- Gauthier, G. G. 2005. *Low-Temperature Fracture Properties of Asphalt Binders*. Pennsylvania State University.
- Gauthier, G. G.; Anderson, D. A. 2006. Fracture mechanics and asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 7(1), 9–35. doi:10.1080/14680629.2006.9690056
- Ghaly, A. M. 2003. A Mechanistic Analysis of Static and Repeated Loading Effects on Rubberized Asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(4), 209–219. doi:10.1080/1029843042000198577.
- Golalipour, A.; Jamshidi, E.; Niazi, Y.; Afsharikia, Z.; Khadem, M. 2012. Effect of Aggregate Gradation on Rutting of Asphalt Pavements. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 440–449. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.895
- Haas, R.C.G., *A Method of Design Asphalt Pavements to Minimize Low- Temperature Shrinkage Cracking*, The Asphalt Institute, Research Report RR-73-1, College Park, Maryland, 1973.
- Hafeez, I.; Ahmed, M.; Mirza, M. W.; Aziz, A. 2012. Investigating the Effects of Maximum Size of Aggregate on Rutting Potential of Stone Mastic Asphalt. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 89–96.
- Hesp, S. A. M. 2003. *An Improved Low-Temperature Asphalt Binder Specification Method. Final Report, NCHRP-IDEA Contract 84 and Ministry of Transportation*.
- Hesp, S. A. M. 2004. *Development of a Fracture Mechanics-Based Asphalt Binder Test Method for Low Temperature Performance Prediction. Highway IDEA Project 84*.
- Huang, B.; Chen, X., Shu, X.; Masad, E.; Mahmoud, E. 2009. Effects of coarse aggregate angularity and asphalt binder on laboratory-measured permanent deformation properties of HMA. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(1), 19–28. doi:10.1080/10298430802068915
- Huang, Y. H. 1993. *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Huang, Y. H. 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall, ISBN 0-13-142473-4.

- International Civil Aviation Organisation. 1983. *Aerodrome Design Manual. Part 3 – Pavements*. 2<sup>nd</sup> edition. Monmeal, Canada.
- Isacsson, U.; Lu, X. 1995. Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens - State of the Art. *Materials and Structures*, 28(3), 139–159. doi:10.1007/BF02473221.
- Isacsson, U.; Zeng, H. 1998a. Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. *Journal of Materials Science*, 33(8), 2165–2170. doi:10.1023/A:1004383506240.
- Isacsson, U.; Zeng, H. 1998b. Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt. *Materials and Structures*, 31(1), 58–63. doi:10.1007/BF02486415.
- ISO 668 Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings. International Organization for Standardization. Geneva, 2013. 17 p.
- Yeggoni, M.; Button, J. W.; Zollinger, D. G. 1996. Fractals of Aggregates Correlated with Creep in Asphalt Concrete. *Journal of Transportation Engineering*, 122(1), 22–28. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:1(22)
- Juknevičiūtė-Žilinskienė, L. 2009. *Lietuvos klimato įtakos kelių tiesybai vertinimo metodika ir klimatinis rajonavimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika.
- Kandhal, P. S.; Cooley, L. A. 2002. *Coarse Versus Fine-Graded Superpave Mixtures: Comparative Evaluation of Resistance to Rutting*. Report No. 02-02. Auburn, Alabama.
- Kandhal, P. S.; Foo, K. Y.; Mallick, R. B. 1998. *A Critical Review Of VMA Requirements In Superpave*. NCAT Report No. 98-1.
- Kane, M.; Zhao, D.; De-Larrard, F.; Do, M. T. 2012. Laboratory evaluation of aggregate polishing as a function of load and velocity. Application to the prediction of damages on skid resistance of road surfaces due to trucks and passenger cars. *Road Materials and Pavement Design*, 13(2), 312–326. doi:10.1080/14680629.2011.649424
- Kelių priežiūros vadovas II dalis. Automobilių kelių priežiūros darbų atlikimo technologija KPV DT–15*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius. 2015. 103 p.
- Kennedy, T. W.; Anagnos, J. N. 1984. *Wet-dry indirect tensile test for evaluating moisture susceptibility of asphalt mixture*. Report No. 253-8. Texas.
- Kim, S. S. 2005. Direct Measurement of Asphalt Binder Thermal Cracking. *Journal of Materials in Civil Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(632)
- Kim, S. S. 2007. *Development of an Asphalt Binder Cracking Device. Final Report for Highway IDEA Project 99*.
- Kluttz, R. Q.; Dongré, R. N. 1997. Effect of SBS polymer modification on the low- temperature cracking of asphalt pavements. In Usmani A.M. (Ed) *Asphalt Science and Technology*, 217–233.

- Knapton, J. 2007. *Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries*. 4<sup>th</sup> Edition. Leicester.
- Knapton, J.; Smith, D. R. 1997. *Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers*. 2<sup>nd</sup> edition. Interlocking Concrete Pavement Institute.
- Lee, H. J.; Lee, J. H.; Park, H. M. 2007. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1079–1087. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.003
- Lee, N.; Hesp, S. A. M. 1994. Low temperature fracture toughness of polyethylene-modified asphalt binders. *Transportation Research Record*, 1436, 54–59.
- Lesueur, D. 2009. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42–82. doi:10.1016/j.cis.2008.08.011
- Li, M. C.; Kett, I. 1967. Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures. *Highway Research Record* 178, 93–106.
- Liang, F.; Jian, L.; Jianming, W.; Yuzhen, Z.; Lin, W. 2014. Viscoelastic Characteristics of Asphalt Binders at Softening Point Temperature, 16(3), 19–25.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2015-05-04]. Prieiga per internetą: < <http://www.lakd.lt/> >.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 2014. *Kelių priežiūros vadovas. I dalis „Automobilių kelių priežiūros normatyvai KPV PN-14“*. Vilnius
- LST EN 13382 *Plokštieji krovinių padėklai. Pagrindiniai matmenys*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2003. 13 p.
- LST EN 14769 *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Pagreitintas ilgalaikis sendinimas naudojant slėginį sendinimo indą (PAV)*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2012. 12 p.
- LST EN ISO 8611–3 *Krovinių padėklai. Plokštieji padėklai. 3 dalis. Didžiausios darbinės apkrovos*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2012. 12 p.
- LST CEN/TS 15963 *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo trūkimui temperatūros nustatymas atliekant įpjauto strypo tritaškio lenkimo bandymą*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2014. 18 p.
- LST EN 12607-1 *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumas kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2015. 15 p.
- LST EN 12591 *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2009. 29 p.
- LST EN 12593 *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Trapumo temperatūros pagal Frasą nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2007. 15 p.

- LST EN 13302 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Bituminio rišiklio dinaminės klampos nustatymas naudojant sukųjį klampomat“.* Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2010. 13 p.
- LST EN 13398 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Modifikuoto bitumo tampriosios atstatos nustatymas.* Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2010. 9 p.
- LST EN 1426 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Penetracijos adatos būdu nustatymas.* Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2007. 14 p.
- LST EN 1427 Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas.* Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2007. 17 p.
- LST EN 14771 „Bitumai ir bituminiai rišikliai. Lenkimo standžio nustatymas. Lenkiamo strypelio reometras (BBR)“.* Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius. 2012. 15 p.
- Lu, X.; Isacsson, U. 1997. Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 11(1), 23–32. doi:10.1016/S0950-0618(96)00033-5
- Lu, X.; Isacsson, U. 2001. Effect of Binder Rheology on the Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 2(1), 29–47. doi:10.1080/14680629.2001.9689893
- Lu, X.; Isacsson, U.; Ekblad, J. 1998. Low-temperature properties of styrene–butadiene–styrene polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 12(8), 405–414. doi:10.1016/S0950-0618(98)00032-4
- Mapoula-Chardonnet, C., Lacides, G., Boisson, F., Harnais, O., Guyot, X., & Polverelli, P. 2014. Pavements for Port Platforms. Projects in the Antilles and the Indian Ocean. *Revue Générale Des Routes et de L'aménagement*, 42–48.
- Marasteanu, M. 2004. Role of Bending Beam Rheometer Parameters in Thermal Stress Calculations. *Transportation Research Record*, 1875(1), 9–13. doi:10.3141/1875-02
- Marasteanu, M. O.; Anderson, D. A. 1998. Rheological tools to evaluate the effect of modifiers on asphalt binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67, 623–643.
- Marker, V. 1981. Problems with Asphalt Pavements. In *Asphalt State of the Art Conference*. Woodbridge, NJ, May 11.
- Miljkovic, M.; Radenberg, M. 2011. Rutting mechanisms and advanced laboratory testing of asphalt mixtures resistance against permanent deformation. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 9(3), 407–417. doi:10.2298/FUACE1103407M
- Miller, J. S.; Bellinger, W. Y. 2003. *Distress Identification Manual: for the Long-Term Pavement Performance Program*. FHWA-RD-03-031.
- Mitchell, M. R.; Link, R. E.; Zofka, A.; Marasteanu, M. 2007. Development of Double Edge Notched Tension (DENT) Test for Asphalt Binders. *Journal of Testing and Evaluation*. doi:10.1520/JTE100678

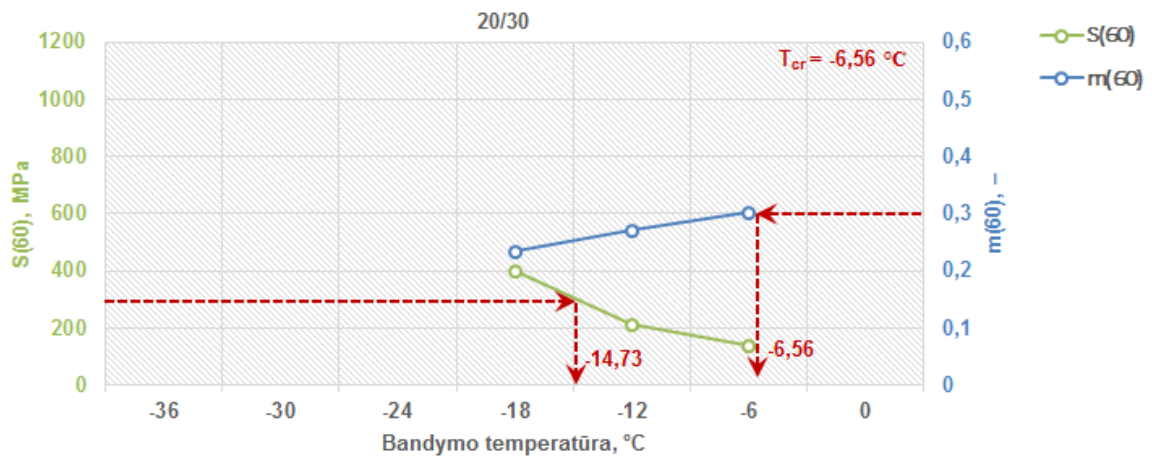
- Moffatt & Nichol. 2009. *Port Pavement Design Guide*. California.
- Morosiuk, G.; Riley, M. 2004. Modelling Road Deterioration and Works Effects. Volume 6. In *Highway development & Management*. World Road Association. 296 p. ISBN: 2-84060-102-8.
- Morosiuk, G.; Riley, M. 2004. Volume 6. Modelling Road Deterioration and Works Effects in HDM-4. In *Highway development & Management*. 296 p. ISBN: 2-84060-102-8.
- Motiejūnas, A., Paliukaitė, M., Vaitkus, A., Čygas, D., & Laurinavičius, A. 2010. Research on the Dependence of Asphalt Pavement Stiffness Upon the Temperature of Pavement Layers. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(1), 50–54.  
doi:10.3846/bjrbe.2010.07
- Nacional Cooperative Highway Research Program; Transportation Research Board; National Research Council. 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. No. 1-37A.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA) and European Asphalt Pavement Association (EAPA). 2011. *The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective*. 2<sup>nd</sup> edition.
- National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* No. 1-37A. Champaign, Illinois, USA.
- Newcomb, D. E.; Hansen, K. R. 2006. Mix Type Selection for Perpetual Pavements. In *International Conference on Perpetual Pavements*, Ohio University, Columbus.
- Nicholls, J. C.; Carswell I. 2001. *The behaviour of asphalt in adverse hot weather conditions*. TR 494. TRL Limited, Crowthorne
- Nunn, M. E.; Smith, T. 1997. Improvements to the indirect tensile stiffness modulus test. In *Proc. of the Second European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials*. Leeds, April 1997.
- Oliver, J. W. H.; Tredrea, P. F. 1998. Relationships Between Asphalt Rut Resistance and Binder Rheological Properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67, 623–643.
- Ongel, A.; Harvey, J. 2004. *Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)*. California.
- Papagiannakis, A. T.; Masad, E. A. 2008. *Pavement Design and Materials*.
- Pavement Interactive*. [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2013-12-05]. Prieiga per internetą: <http://www.pavementinteractive.org/>.
- Pellinen, T. K. 2004. Conceptual Performance Criteria for Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 73, 337–366.

- Petersen, J. C.; Robertson, R. E.; Branthaver, J. F.; Harnsberger, P. M.; Duvall, J. J.; Kim, S. S.; Dongre, R. 1994. *Binder characterisation and evaluation, vol 4: test methods*. SHRP-A-370. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program. National Research Council.
- Picoux, B.; El Ayadi, A.; Petit, C. 2009. Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 845–854. doi:10.1016/j.soildyn.2008.09.001.
- Planche, J.; Hines, M. L.; Lesueur, F. D.; King, G. N. 1996. Evaluation of Elastomer Modified Bitumens Using SHRP Binder Specifications. In *Road Safety in Europe and Strategic Highway Research Program (SHRP)*, Prague. 1–17.
- Quintus, H. L. Von; Scherocman, J. A.; Hughes, C. S.; Kennedy, T. W. 1991. *Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. Report No. 338*. Washington.
- Quintus, H. Von; Killingsworth, B. 1998. *Analyses Relating to Pavement Material Characterizations and Their Effects on Pavement Performance*.
- Read, J.; Whiteoak, D. 2003. *The Shell Bitumen Handbook*. 5<sup>th</sup> edition.
- Readshaw, E. E. 1972. Asphalt Specifications in British Columbia for low Temperature Performance. In *Association of Asphalt Paving Technologists*. 562–581.
- Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D. Y. 1996. *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. 2<sup>nd</sup> edition. Lanham (MD): NAPA Education Foundation.
- Sengoz, B.; Topal, A. 2007. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness. *Building and Environment*, 42(10), 3629–3635. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.005
- Siddharthan, R. V.; Krishnamenon, N.; El-Mously, M.; Sebaaly, P. E. 2002. Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 136–144. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(136)
- Singh, D.; Zaman, M.; Commuri, S. 2012. Inclusion of aggregate angularity, texture, and form in estimating dynamic modulus of asphalt mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 13(2), 327–344. doi:10.1080/14680629.2011.650088
- Sybilski, D. 1994. Relationship between absolute viscosity of polymer-modified bitumens and rutting resistance of pavement. *Materials and Structures*, 27(2), 110–120. doi:10.1007/BF02472829
- Skerys, K.; Christauskas, J. 2010. *Transporto statiniai: uostai*. Vilnius: Technika.
- Smith, R. E.; Darter, M. I.; Herrin, M. 1979. *Highway Pavement Distress Identification Manual for Highway Condition and Quality of Highway Construction Survey*. Contract DOTFH-11-9175/NCHRP 1-19.
- Stephens, J. E.; Sinha, K. C. 1978. Influence of Aggregate Shape on Bituminous Mix Character. *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists*, 47, 434–456.

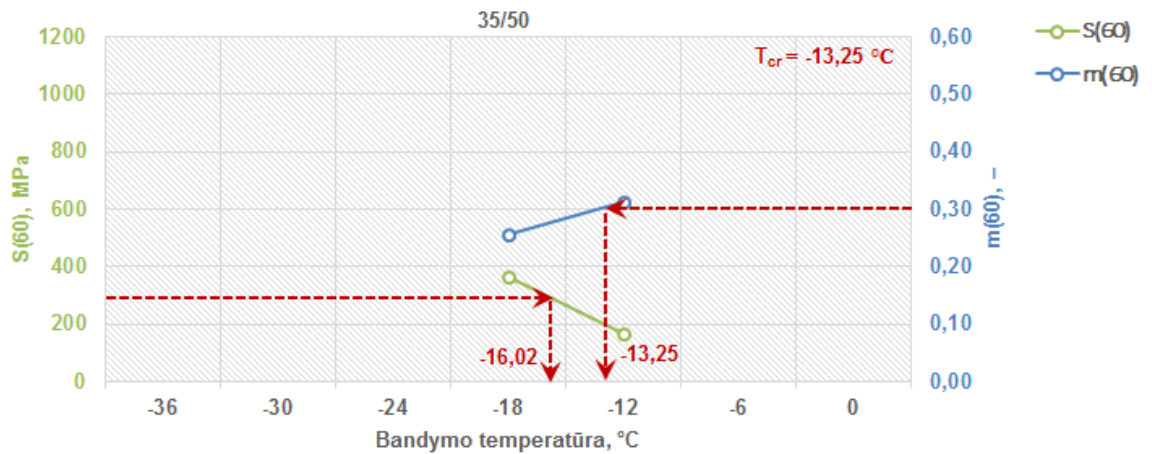
- Sui, C.; Farrar, M. J.; Harnsberger, P. M.; Tuminello, W. H.; Turner, T. F. 2011) New Low-Temperature Performance-Grading Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. doi:10.3141/2207-06
- Sui, C.; Farrar, M. J.; Tuminello, W. H.; Turner, T. F. 2010. New Technique for Measuring Low-Temperature Properties of Asphalt Binders with Small Amounts of Material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2179.
- Tabatabaee, H. A.; Velasquez, R.; Puchalski, S.; Bahia, H. U. 2012. Task 3 - Develop Low Temperature Specification for Asphalt Mixtures. Subtask 3 - Development of the Single - Edge Notched Beam ( SENB ) Test. In *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements. National Pooled Fund Study. Phase II* University of Wisconsin-Madison. 23 p.
- Taunk, G. S. 1998. Rigid Pavement vs. Flexible Pavement. *Indian Highways*, 6(2), 5–11.
- The World Bank Group [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2013-11-26]. Prieiga per internetą: <<http://www.worldbank.org/>>.
- Thom, N. 2008. *Principles of Pavement Engineering*. Institution of Civil Engineers.
- Timm, D. H.; Newcomb, D. E. 2006. Perpetual pavement design for flexible pavements in the US. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(2), 111–119. doi:10.1080/10298430600619182
- Topal, A.; Sengoz, B. 2005. Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19(2), 155–163. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.004
- Velasquez, R.; Tabatabaee, H.; Bahia, H. 2011. Low Temperature Cracking Characterization of Asphalt Binders by means of the Single-Edge Notch Bending (SENB) Test. *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists*, 80, 583–614.
- VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas. 2006. *Automobilių kelių investicijų vadovas*. Kaunas. 2006.
- Wisconsin Transportation Information Center. 2002. *Asphalt Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER) Manual*. Madison, Wisconsin. 28 p.
- Žiliūtė, L. 2012. *Transporto apkrovų įtaka plastinių deformacijų formavimuisi ir vystymuisi automobilių kelių asfalto dangose*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

## **PRIEDAI**

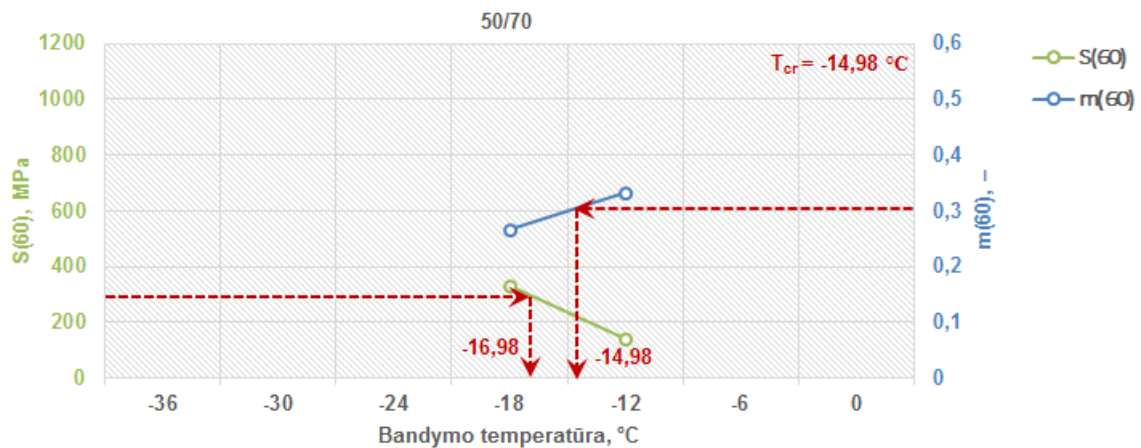
## A priedas. Kritinės temperatūros nustatymas



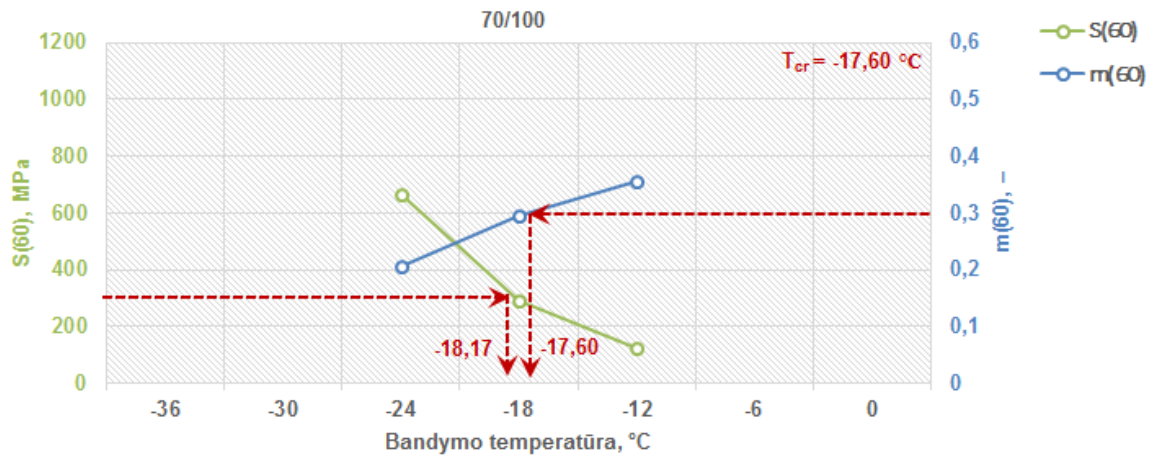
A.1. Kelių bitumo 20/30 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



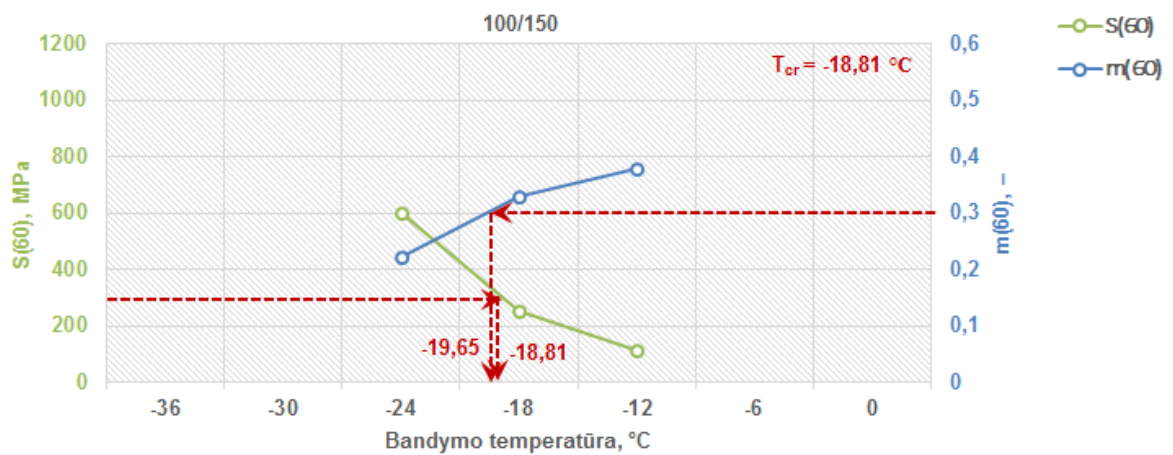
A.2. Kelių bitumo 35/50 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



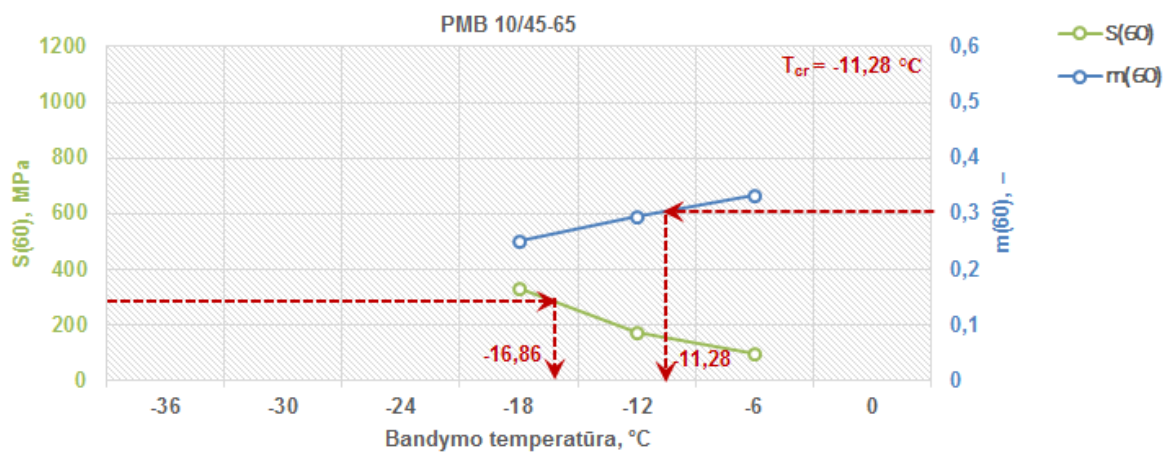
A.3. Kelių bitumo 50/70 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



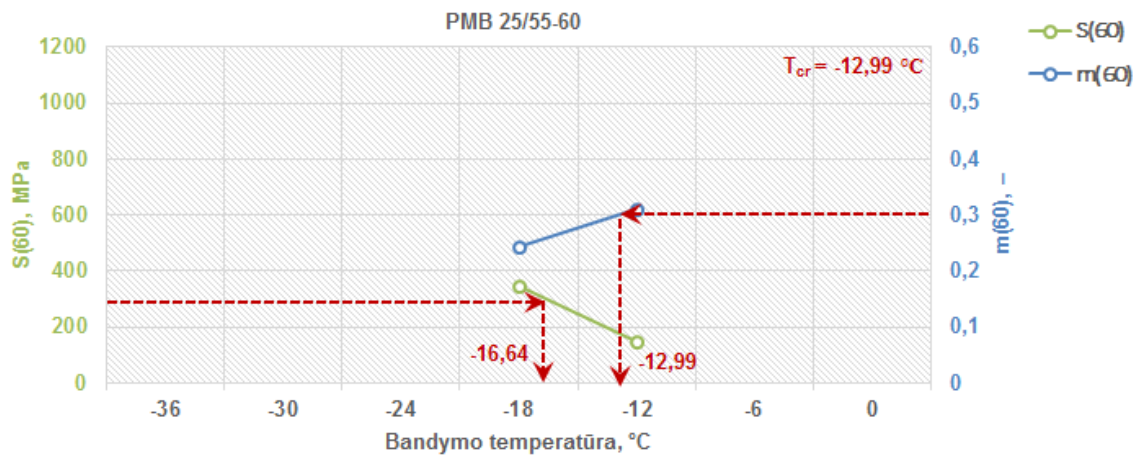
A.4. Kelių bitumo 70/100 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



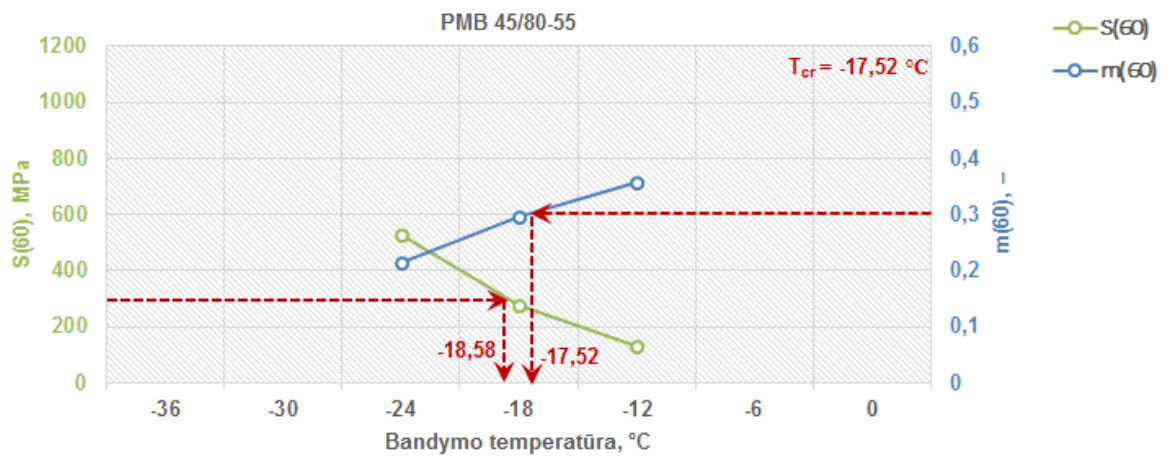
A.5. Kelių bitumo 100/150 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



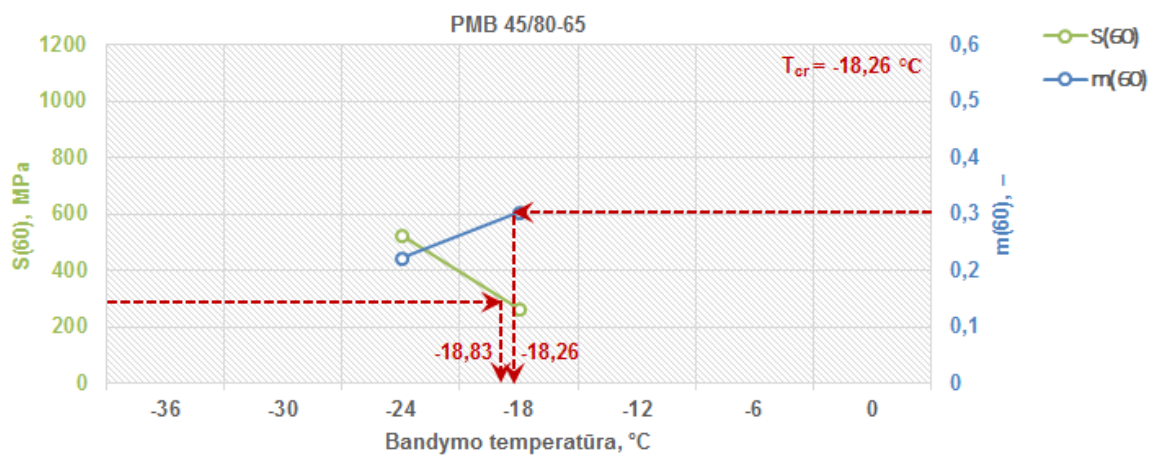
A.6. Kelių bitumo PMB 10/45-65 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



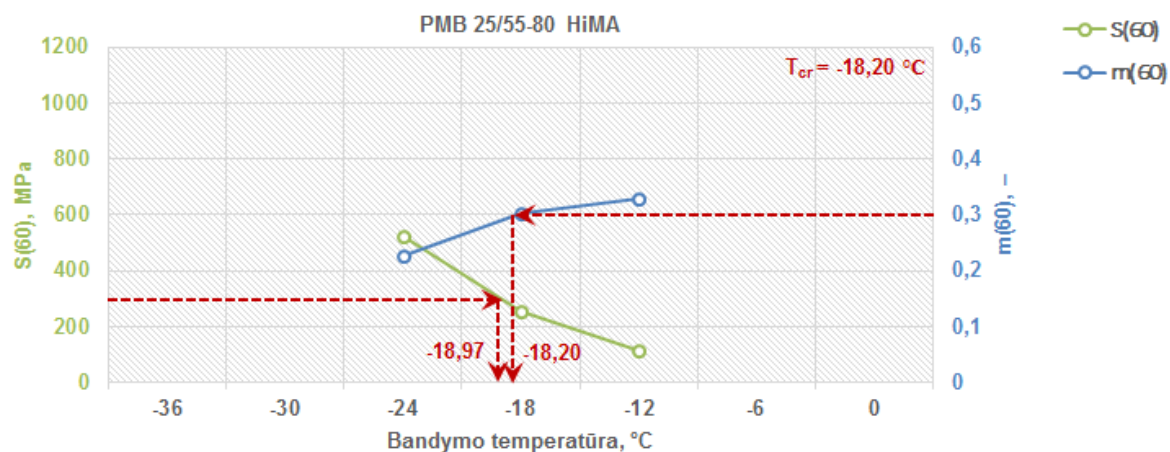
**A.7.** Kelių bitumo PMB 25/55-60 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



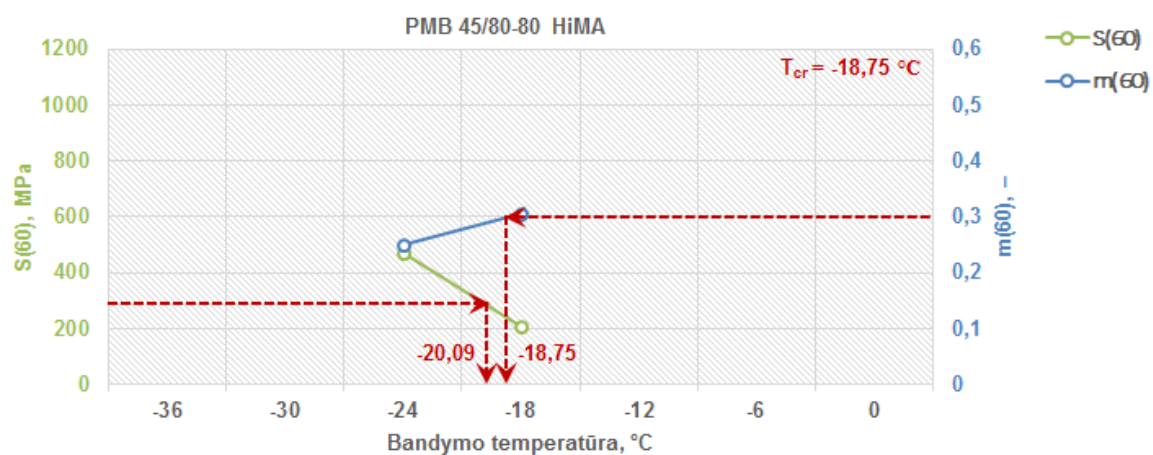
**A.8.** Kelių bitumo PMB 45/80-55 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



**A.9.** Kelių bitumo PMB 45/80-65 kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



**A.10.** Kelių bitumo PMB 25/55-80 HiMA kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą



**A.11.** Kelių bitumo PMB 45/80-80 HiMA kritinės temperatūros nustatymas pagal lenkimo standžio  $S(60)$  ir lenkimo standžio kitimo rodiklio  $m(60)$  kitimą