



VILNIAUS GEDIMINO TECHNINIS UNIVERSITETAS

Rolandas Oginskas

**PROVĖŽŲ, SUSIJUSIŲ SU ŠLYTIES DEFORMACIJOMIS
AUTOMOBILIŲ KELIŲ ASFALTBETONIO DANGOSE, MAŽINIMAS
NAUDOJANT GEOSINTETINES MEDŽIAGAS**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Vilnius, 2006

Disertacija rengta 2002–2006 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Alfredas Laurinavičius (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T)

TURINYS

IVADAS	5
1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ PROVĖŽOMS ASFALTBETONIO DANGOSE TIRTI, ANALIZĖ ...	8
1.1. Provėžos asfaltbetonio dangose ir jų susidarymo priežastys	8
1.2. Veiksniai, lemiantys provėžų mažinimą	14
1.3. Šlyties deformacijos asfaltbetonyje: atsiradimas ir didėjimas	16
1.4. Asfaltbetonio charakteristikos, nulemiančios atsparumą šlyties deformacijoms	22
1.5. Išvados	25
2. GEOSINTETINIŲ MEDŽIAGŲ ĮTAKOS ŠLYTIES DEFORMACIJOMS TEORINIS TYRIMAS	27
2.1. Geosintetinių medžiagų naudojimas automobilių kelių dangoms stiprinti	27
2.2. Geosintetinių medžiagų įtaka šlyties deformacijoms	30
2.3. Numatomos geosintetinių medžiagų įtakos šlyties deformacijoms ir asfaltbetonio reologinėms charakteristikoms analizė	32
2.4. Išvados	35
3. EKSPERIMENTINIAI GEOSINTETINĖS MEDŽIAGOMIS ARMUOTŲ ASFALTBETONIO DANGŲ TYRIMAI	36
3.1. Tyrimo objektas ir jo charakteristikos	36
3.2. Eksperimentinių tyrimų metodika ir matavimo prietaisai	41
3.3. Eksperimentinių duomenų analizė	43
3.4. Išvados	63
4. PROVĖŽŲ GYLIO MAŽINIMAS NAUDOJANT GEOSINTETINES MEDŽIAGAS	65
4.1. Gautųjų tyrimų duomenų taikymo galimybės Lietuvos Respublikoje	65
4.2. Gautų tyrimų rezultatų diegimas	69
4.3. Ekonominio efekto, panaudojus geosintetines medžiagas, įvertinimas	71
4.4. Išvados	74
BENDROSIOS IŠVADOS	76
LITERATŪROS SĄRAŠAS	78
PRIEDAI	85
1 priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	86
2 priedas. Post hoc testo rezultatai	92
3 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT1	94
4 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT2	95
5 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT3	96
6 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT1	97
7 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT2	98
8 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT3	99

SANTRUMPOS IR APIBRĖŽIMAI

CBR – (Californian Bearing Ratio) Kalifornijos santykinis atsparumo rodiklis

d – liekamosios deformacijos

E – asfaltbetonio dangos tamprumo modulis

GT1...GT6 – skirtingos geosintetinės medžiagos

k_E , k_η – armavimo koeficientai

N/K – naudos ir kaštų santykis

PG – provėžų gylis

r – vertikalusis poslinkis

VB – krovininio eismo rodiklis

VGN – vidinė gražos norma

η – asfaltbetonio klampumas

IVADAS

Lietuva yra tranzito valstybė tarp Vakarų ir Rytų, Šiaurės ir Pietų. Lietuvos transporto sektorius yra transeuropinio transporto dalis [1]. Pasaulinė ekonomikos plėtra ir Lietuvos geografinė padėtis sudarė sąlygas mūsų šaliai Baltijos jūros regione tapti tranzito valstybe. Lietuva, kaip ir kitos kaimyninės ES šalys, turi gerai išplėtotą transporto infrastruktūrą. Lietuvos automobilių kelių tinklas yra vienas labiausiai išplėtotų Baltijos ir Šiaurės Europos šalyse ir pakankamas [2, 3]. Dėl tarptautinės ir vidaus prekybos bei turizmo šalies ekonominiam augimui transportas turi tiesioginę įtaką. Lietuvoje transporto sektorius sukuria apie 10 % viso šalies BVP, o tuo tarpu kitose ES šalyse ši dalis tesiekia 6–8 %.

Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, labiausiai paplitusios asfaltbetonio dangos, dengiančios kelius, kuriuose vyksta intensyvus lengvųjų ir krovininių automobilių eismas. Veikiant automobilių eismo apkrovoms ir aplinkos veiksniams, asfaltbetonio dangose formuojasi įvairios pažaidos, tarp kurių sunkiausiai prognozuojamos ir sudėtingiausiai mažinamos yra provėžos, susijusios su šlyties deformacijomis. Įrengiant ir eksploatuojant asfaltbetonio dangas, provėžų susidarymo problema egzistuoja visuomet, tačiau tik pastaraisiais metais, sparčiai intensyvėjant automobilių eismui, ši problema darosi vis aktualesnė. Provėžos ne tik padidina kelių eksploatavimo bei kelių naudotojų išlaidas, be to, kai yra šlapios dangos, provėžos gali tapti skaudžių eismo įvykių priežastimi.

Provėžų mažinimo galimybes apsunkina tai, kad asfaltbetonis yra medžiaga, keičianti savo savybes ganėtinai plačiame aplinkos temperatūros spektre. Be kita ko, Lietuvos klimatas ypatingas tuo, kad pasižymi karštomis vasaromis ir šaltomis žiemomis. Asfaltbetonis, tinkantis šaltajam metų periodui, visiškai netinka periodui, kai vyrauja aukštos temperatūros. Sukurti bei tobulinti asfaltbetonio mišinius, kurie kelio dangoje patikimai funkcionuotų vyraujant tiek žemoms, tiek aukštomis temperatūroms, stengiamasi keičiant asfaltbetonio mišinio sudėties komponentus ir jų santykį. Tačiau, kaip parodė praktika, šios priemonės ne visada duoda laukiamus rezultatus. Taigi vienas iš papildomų konstrukcinių sprendimų, skirtų provėžoms mažinti, yra asfaltbetonio armavimas geosintetinėmis medžiagomis, jas paklojus tarp asfaltbetonio dangos sluoksnių.

Provėžų mažinimas asfaltbetonio dangose naudojant geosintetines medžiagas yra nenaujas reiškinys: pastaraisiais metais šis būdas dažnai taikomas tiek pasaulyje, tiek Lietuvoje. Tačiau šių medžiagų naudojimo motyvai iki šiol tik teorinio lygmens, nes nebuvo atlikta eksperimentinių tyrimų, kurie būtų išsamesni ir įrodantys geosintetinių medžiagų įtaką provėžoms mažinti asfaltbetonio dangose. Taip pat nebuvo iširta, kaip šios medžiagos veikia reologines asfaltbetonio savybes, nulemiančias šias pažaidas.

Asfaltbetonio reologinių savybių pokyčių, atsirandančių dėl geosintetinių medžiagų poveikio, tyrimas ir šių medžiagų naudojimo provėžoms mažinti tikslingumo nustatymas lemia šio darbo **aktualumą**.

Mokslo darbo tikslas – ištirti pagrindines asfaltbetonio savybes, sąlygojančias šlyties deformacijas, ir provėžų, susijusių su jomis, atsiradimą bei plėtrą, taip pat išanalizuoti geosintetinių medžiagų įtaką asfaltbetonio dangų tvarumui ir pateikti siūlymus šioms medžiagoms naudoti.

Mokslo darbo uždaviniai

- 1) Ištirti jau taikomus metodus provėžoms mažinti ir nustatyti pagrindines asfaltbetonio savybes, nulemiančias šių deformacijų atsiradimą ir plėtrą;
- 2) Apžvelgti geosintetinių medžiagų naudojimą pasaulinėje ir Lietuvos kelių tiesyboje;
- 3) Apibūdinti geosintetinių medžiagų įtaką šlyties deformacijoms ir asfaltbetonio reologinėms savybėms;
- 4) Ištirti geosintetinėmis medžiagomis armuotas asfaltbetonio dangas, pateikti tyrimo duomenų analizę ir vertinimą;
- 5) Pateikti tyrimų rezultatų taikymo galimybes provėžų skaičiavimo metodams ir praktiniam naudojimui;
- 6) Apskaičiuoti šių medžiagų taikymo praktikoje ekonominį efektą.

Tyrimo metodai – teoriniai tyrimo metodai, eksperimentiniai tyrimai, jų rezultatų analizė, taikant matematinės statistikos metodus, eksperimentinių skaičiavimo modelių sudarymas ir jų taikymas geosintetinių medžiagų panaudojimui asfaltbetonio dangose pagrįsti.

Ginamieji disertacijos teiginiai

- Geosintetinės medžiagos gerins asfaltbetonio reologines savybes ir mažins provėžų gylį;
- Šias medžiagas yra tikslinga naudoti Lietuvoje ir šalyse, kuriose klimatinės sąlygos yra panašios.

Asfaltbetonio dangų, armuotų geosintetinėmis medžiagomis, jas paklojus tarp asfaltbetonio sluoksnių, tyrimai ir šių medžiagų įtakos asfaltbetonio reologinėms savybėms nustatymas sudaro **mokslo darbo naujumą ir originalumą**.

Atsižvelgiant į tyrimų rezultatus ir ekonominius skaičiavimus, mokslo darbe išskirtos geosintetinės medžiagos, kurias yra tikslinga naudoti provėžoms asfaltbetonio dangose mažinti.

Šiame mokslo darbe siūlomas geosintetinių medžiagų įdiegimo modelis yra pirmasis, tinkantis Lietuvos sąlygoms.

Mokslo darbo aprobavimas. Disertacijos tema paskelbti 2 straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, 5 straipsniai konferencijų medžiagą publikuojančiuose mokslo leidiniuose, 2 straipsniai kituose mokslo ir technikos leidiniuose (žr. literatūros sąrašą). Tarptautinėse ir respublikinėse mokslo konferencijose disertacijos tema skaityti šie pranešimai:

- 1) „Анализ влияния геосинтетических материалов на формирование и развитие колеи в асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог Литовской Республики“. Tarptautinė konferencija „Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств“ (Rusija: Penza, 2006).

- 2) „Impact of Various Factors on the Elasticity Characteristics of Asphalt Concrete”. Tarptautinė konferencija „Environmental Engineering“ (Lietuva: Vilnius, 2005).
- 3) „Armotų asfaltbetonio dangų tyrimai Lietuvoje“. 8-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ (Lietuva: Vilnius, 2005).
- 4) „Geosintetinių medžiagų panaudojimas kelių dangų konstrukcijų stiprinimui“. Respublikinė konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“ (Lietuva: Vilnius, 2005).
- 5) „Опыт применения геосинтетических материалов в Литве для улучшения качества автомобильных дорог“. Tarptautinė konferencija „Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств“ (Rusija: Penza, 2004).
- 6) „Geosintetinių medžiagų panaudojimas kelių dangų konstrukcijų stiprinimui“. Respublikinė konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“ (Lietuva: Vilnius, 2004).
- 7) „Geosintetinių medžiagų panaudojimo galimybės aplinkos apsaugos inžinerijoje“. 6-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ (Lietuva: Vilnius, 2003).

1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ PROVĖŽOMS ASFALTBETONIO DANGOSE TIRTI, ANALIZĖ

Šio skyriaus medžiaga paskelbta 1a publikacijoje.

1.1. Provėžos asfaltbetonio dangose ir jų susidarymo priežastys

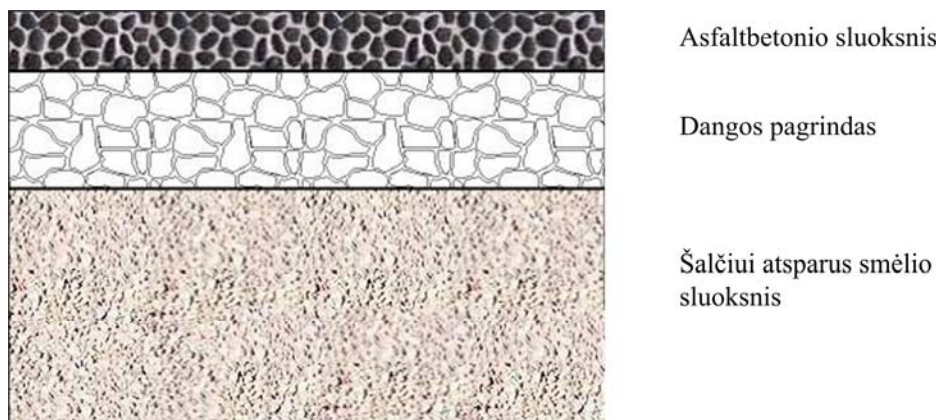
Automobilių keliai yra sudėtingi inžineriniai statiniai, kurių tikslas – sudaryti palankias sąlygas automobilių eismui. Automobilių kelias yra kompleksinis statinys, susidedantis iš daugelio kitų statinių ar konstrukcijų. Pagrindinė konstrukcija, užtikrinanti saugų ir komfortabilų automobilių eismą, yra kelio danga. Skiriami du pagrindiniai dangų tipai:

- 1) standžiosios automobilių kelių dangos,
- 2) nestandžiosios automobilių kelių dangos.

Prie standžiųjų automobilių dangų priskiriamos betono ir grindinio dangos. Nestandžiosios automobilių kelių dangos yra dangos su asfaltbetonio sluoksniu konstrukcijos viršuje. Tiek pasaulyje, tiek Lietuvoje labiausiai paplitusi būtent pastaroji dangų konstrukcija.

Nestandžioji automobilių kelių danga yra sudėtinga struktūra. Dangos konstrukcija nagrinėjama kaip ašiai simetriškas daugiasluoksnis kontinuumas, apribotas spinduliniais bei vertikaliaisiais dydžiais. Automobilių kelių dangos konstrukcija yra daugiasluoksnė struktūra, kurios kiekvienas sluoksnis yra sudarytas ne tik iš skirtingų, pasižyminčių tam tikromis savybėmis medžiagų, bet ir iš geresnes charakteristikas turinčių medžiagų konstrukcijos viršuje [4]. 1943 metais Burmistr'as dviejų sluoksnių sistemoje apibrėžė įtempius ir poslinkius. Pagrindinė šios teorijos išlyga yra ta, kad sistema, sudaryta iš kelių sluoksnių yra neribotai ištęsta [4, 5].

Nestandžiosios automobilių kelių dangos – dangos, sukonstruotos iš bituminės ir mineralinių medžiagų sluoksnių (1.1 pav.) [5].



1.1 pav. Nestandžiosios dangos schema

Nestandžiųjų automobilių kelių dangų konstrukcijų viršutinis sluoksnis yra asfaltbetonio sluoksnis. Būtent šiame sluoksnyje yra didžiausios įtempimų skaitinės vertės ir būtent čia susiformuoja įvairaus pobūdžio deformacijos, be to, šis sluoksnis intensyviausiai yra veikiamas aplinkos veiksnių. Taigi akivaizdu, jog dėl to viršutiniajam asfaltbetonio sluoksniui keliami itin dideli reikalavimai, nes šis sluoksnis turi būti atsparus įtempiams ir apsaugoti žemiau esančius sluoksnius. Kadangi automobilių eismo apkrovos intensyviai veikia asfaltbetonio dangas, dėl to jose atsirandantys įtempiai sukelia įvairaus pobūdžio deformacijas.

Eksplotacijos periodu asfaltbetonio dangų funkcionavimą lemia daug faktorių [6]:

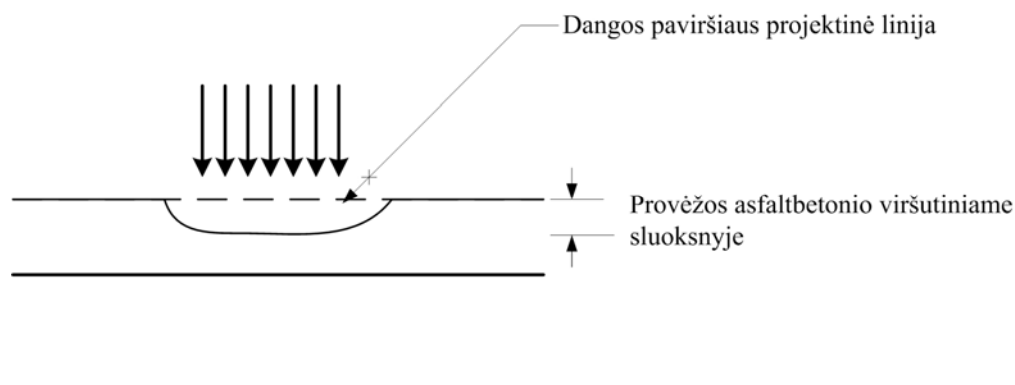
- 1) asfaltbetonio mišinio kintamieji (bitumo markė, bitumo kiekis mišinyje, mišinio mineralinės medžiagos, asfaltbetonio mišinio akytumas, užpildas ir kt.),
- 2) aplinkos kintamieji (aplinkos temperatūra, drėgmė, automobilių eismas),
- 3) apkrovos kintamieji (apkrovos pobūdis, apkrovos laikas, apkrovos kampas, relaksacijos laikas).

Deformacijas, susiformuojančias nestandžiosiose automobilių kelių dangose, galima suskirstyti į kelias grupes [7]:

- 1) dangos paviršiaus suirimai (išaižėjimai, ištrupėjimai),
- 2) temperatūriniai plyšiai,
- 3) išilginiai plyšiai,
- 4) nuovargio plyšiai,
- 5) provėžos.

Asfaltbetonio dangose susiformuoja paviršinės, struktūrinės ir šlyties provėžos.

Paviršinės provėžos – tai asfaltbetonio susitankinimo nuo automobilių eismo išdava (1.2 pav.).

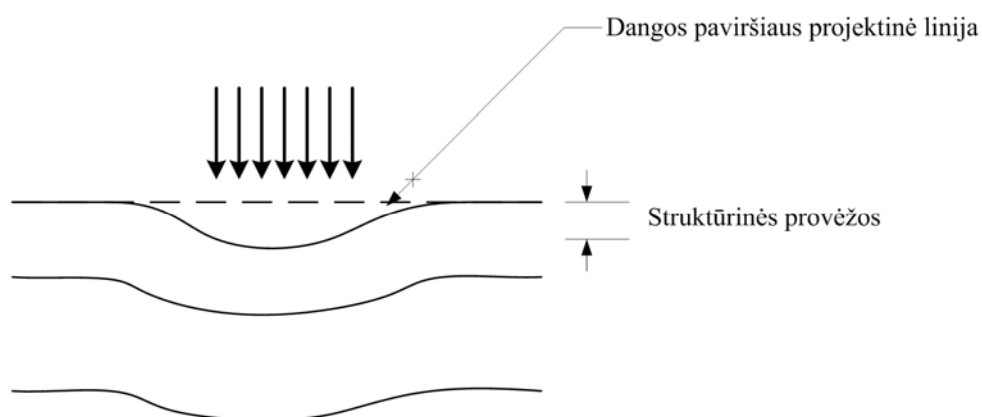


1.2 pav. Provėžos, susidariusios nuo automobilių eismo apkrovų viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje

Tokios provėžos yra neišvengiamos, tačiau jeigu asfaltbetonio dangos viršutiniojo sluoksnio sudedamosios dalys ir dangos įrengimas yra tinkami, šių provėžų dydis yra nedidelis ir todėl tokių

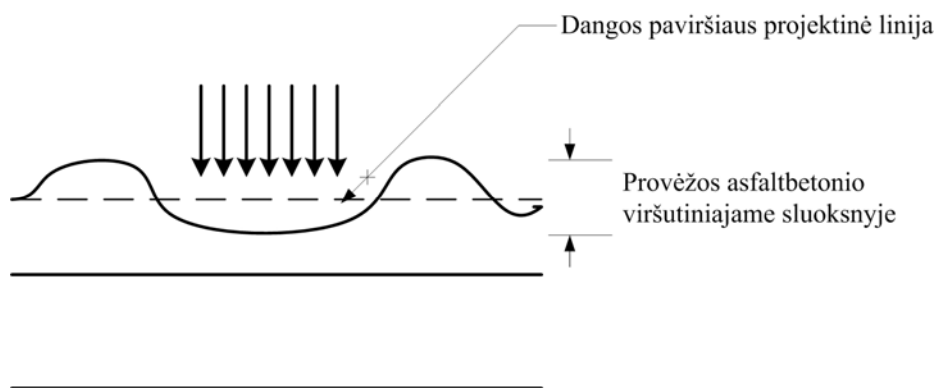
deformacijų susidarymas problemų nekelia.

Struktūrinės provėžos (1.3 pav.) – tai deformacijos, kurios susiformuoja visoje asfaltbetonio dangos konstrukcijoje. Provėžų gylis viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje yra deformacijų, susidariusių žemesniuose dangos sluoksniuose, rezultatas. Tokių deformacijų priežastis yra silpna dangos pagrindo ar šalčiui atsparaus sluoksnio laikomoji galia. Šių provėžų mažinimas siejamas su minėtų konstrukcinių sluoksnių laikomosios galios didinimu.



1.3 pav. Provėžos visame nestandžiosios dangos storyje

Provėžos, susijusios su šlyties deformacijomis viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje (1.4 pav.), yra pačios sudėtingiausios ir pavojingiausios. Pagrindinė šių provėžų susidarymo priežastis yra šlyties įtempiai asfaltbetonyje. Šios provėžos yra liekamųjų deformacijų akumuliacija viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje.



1.4 pav. Šlyties deformacijų sukeltos provėžos

Provėžos, susijusios su šlyties įtempiais, yra sunkiai suskaičiuojamos ir modeliuojamos dėl šių priežasčių [8]:

1) pagrindiniai medžiagų charakteristikų ryšiai yra netiesiški, priklausomi ir sudėtingi. Daug dangos konstrukcijos medžiagų, veikiant pasikartojančioms ir judančioms apkrovoms, yra sunkiai charakterizuojamos,

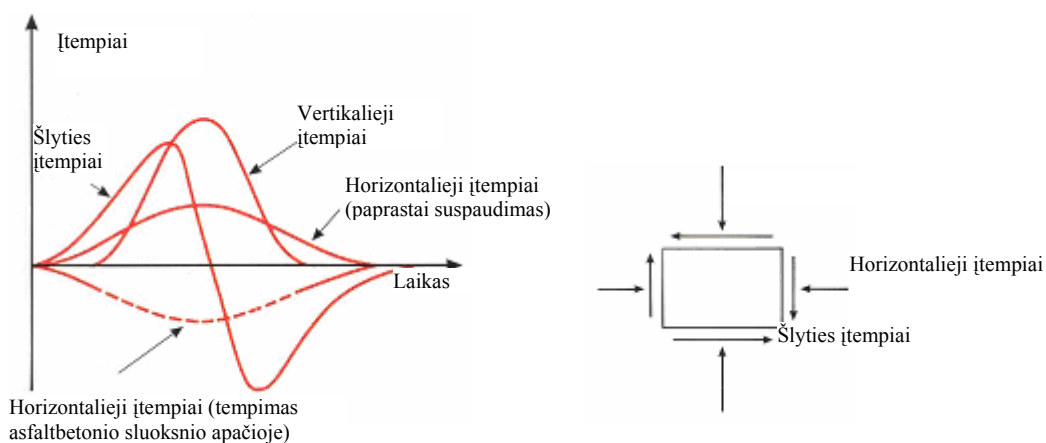
2) medžiagos savybių pokyčiai, veikiant apkrovai bei temperatūrai, sukuria prielaidą asfaltbetonį nagrinėti kaip klampiai tamprią medžiagą. Tuo tarpu medžiagos, kurios sudaro dangos pagrindo ir šalčiui atsparų sluoksnius bei žemės sankasą, yra mažai priklausomos nuo šių kintamųjų,

3) medžiagų temperatūra ir drėgmė su kiekvienu apkrovos pasikartojimo ciklu skiriasi. Dėl šios priežasties būtina numatyti provėžų susidarymo mechanizmus skirtingoms medžiagoms, struktūroms, eismo srautui ir aplinkos sąlygoms.

Pagrindinės tokių deformacijų priežastys yra kelios:

- 1) aukšta aplinkos temperatūra,
- 2) netinkami asfaltbetonio mišinio komponentai,
- 3) automobilių eismo apkrovos.

Veikiant automobilių eismo apkrovoms asfaltbetonio dangose susidaro trijų rūšių įtempiai: vertikalieji, horizontalieji (tangentiniai) bei šlyties (1.5 pav.) [9, 10, 11]:



1.5 pav. Nuo besisukančio automobilio rato asfaltbetonio dangoje atsirandantys įtempiai

Automobilių eismo apkrovos yra pagrindinė priežastis, nes kitos dvi priežastys yra tik pagalbiniai veiksniai, nulemiantys šių deformacijų susidarymo bei plėtros laiką. Nustatyta, kad provėžos asfaltbetonio dangose susidaro dėl tokių apkrovų [8]:

- stovinčiųjų ar stacionariųjų (ilgalaikių ar statinių) apkrovų,
- pasikartojančiųjų eismo apkrovų (didelis pasikartojimų skaičius),
- stabdymo ar greitėjimo apkrovų.

Didžiausios apkrovos tam tikrų įtempimų skaitinės vertės pasireiškia tokiaame gylyje [5]:

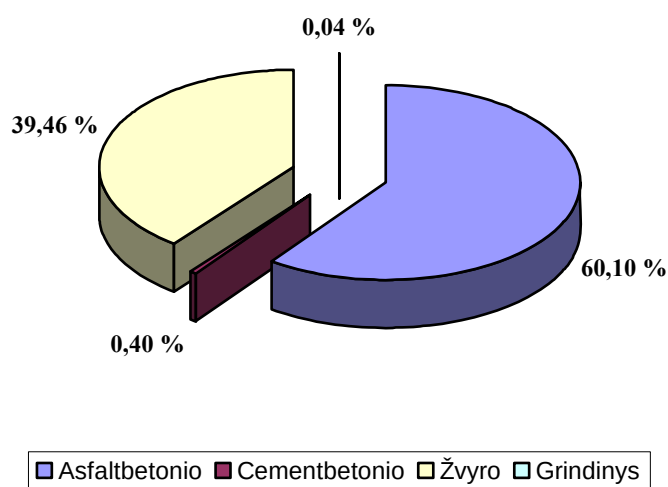
- vertikalūs įtempiai didžiausi yra pačiame dangos paviršiuje, ties apkrovos pridėjimo tašku, tačiau tostant nuo apkrovos centro jų koncentracija persistumia gilyn, kur didžiausią reikšmę jie įgyja 10–15 cm gylyje,
- horizontaliųjų įtempių koncentracija didžiausia dangos paviršiuje bei 5 cm gylyje,

- šlyties įtempių dydis 5–7 cm gylyje.

Skirtingo pobūdžio deformacijų priežastys gali būti susijusios su kai kurių konstrukcinių sluoksnių stiprumo praradimu, tačiau susiformavusios deformacijos didžiausias vertes turi būtent asfaltbetonio sluoksniuose.

Pagrindine šlyties deformacijų priežastimi yra laikomi šlyties įtempiai, atsirandantys asfaltbetonyje jo eksploatacijos metu [12]. Šių deformacijų susidarymo asfaltbetonio dangose galimybė yra daug didesnė, kai yra aukšta dangos temperatūra [13].

Šlyties įtempiai tiesiogiai priklauso nuo veikiančios apkrovos dydžio – kuo apkrova didesnė, tuo didesni ir įtempiai. Transporto priemonei judant tiesia kryptimi, minėtieji įtempiai yra gana nedideli ir tesiekia apie 0,1 vertikaliųjų įtempių verčių. Visgi jie yra pakankami, kad asfaltbetonio dangoje susiformuotų šlyties deformacijos. Ženkliai didesnės šių įtempių vertės kelių ir gatvių ruožuose, kur keičiasi judėjimo kryptis (mažo spindulio posūkiai sankryžose, troleibusų ir autobusų sustojimai) ir keičiasi transporto srauto judėjimo greitis (stabdymo ir greitėjimo zonos), siekiantis net iki 0,6 vertikaliųjų įtempių verčių. Šiose zonose ir eismo juostose, kuriose vyksta intensyvus sunkiasvorių transporto priemonių eismas, šlyties deformacijos yra ženkliai didesnės nei kituose ruožuose.

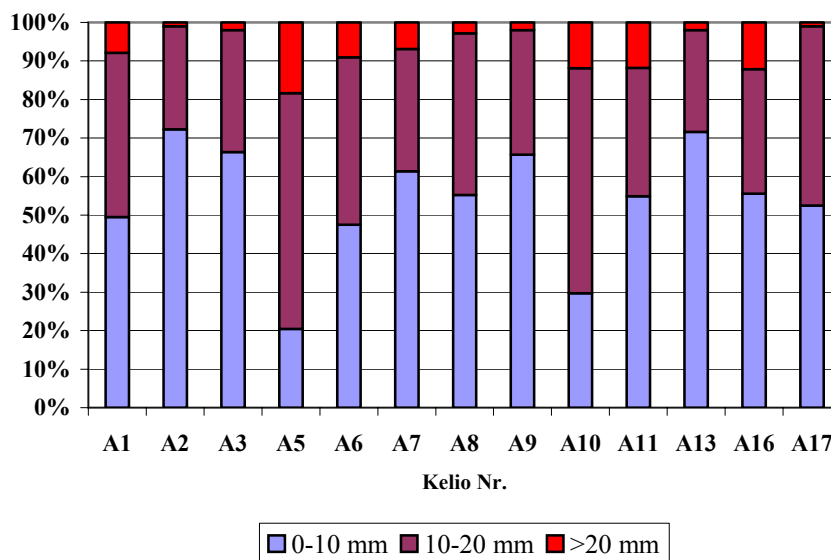


1.6 pav. Valstybinės reikšmės kelių dangų pasiskirstymas

Provėžos, kitaip dar vadinamos ratų taku, yra vienas iš labiausiai paplitusių asfaltbetonio dangų defektų. Provėžų formavimasis, prasidėjęs pradinėje dangos eksploatacijos fazėje, didėja augant sunkiojo krovinio eismo srautui. Šios susiformavusios provėžos ne tik didina kelių tinklo išlaikymo išlaidas, bet veikia ir važiavimo komfortą, kelia papildomą riziką gyvybei. Važiuojant autotransporto priemone į kelio dangos įdubas subėgęs vanduo yra papildoma slydimo priežastis, o žiemos metu įdubose subėgęs vanduo ir susiformavęs ledas pailgina stabdymo kelią. Taigi šios aplinkybės gali būti skaudžių eismo įvykių priežastimi.

Provėžų susidarymo problema aktuali ir Lietuvai, nes didžiausią dalį automobilių dangų Lietuvos Respublikoje sudaro asfaltbetonio dangos (1.6 pav.), ir būtent šiose dangose susidaro provėžos.

Intensyviausias automobilių eismas vyksta magistraliniuose keliuose. Toliau pateiktame paveiksle pavaizduota, kaip magistraliniuose keliuose kinta provėžų gylis.



1.7 pav. Provėžų gylio pasiskirstymas Lietuvos Respublikos magistraliniuose keliuose

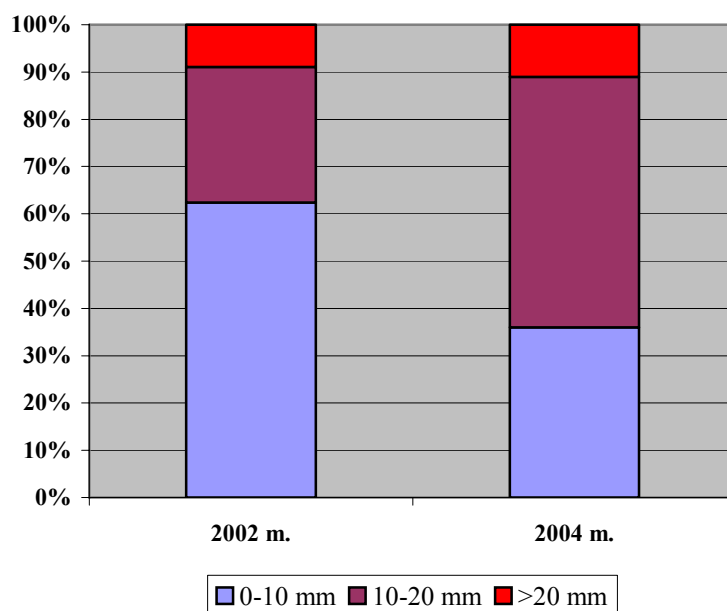
Čia: A1 (Vilnius–Kaunas–Klaipėda), A2 (Vilnius–Panevėžys), A3 (Vilnius–Minskas), A4 (Vilnius–Varėna–Gardinas), A5 (Kaunas–Marijampolė–Suvalkai), A6 (Kaunas–Zarasai–Daugpilis), A7 (Marijampolė–Kybartai–Kaliningradas), A8 (Panevėžys–Aristava–Sitkūnai), A9 (Panevėžys–Šiauliai), A10 (Panevėžys–Pasvalys–Ryga), A11 (Šiauliai–Palanga), A12 (Ryga–Šiauliai–Tauragė–Kaliningradas), A13 (Klaipėda–Liepoja), A14 (Vilnius–Utena), A15 (Vilnius–Lyda), A16 (Vilnius–Prienai–Marijampolė), A17 (Panevėžio aplinkkelis).

Didžiausias krovinių automobilių eismo intensyvumas yra kelyje „Via Baltica“ (A5 Kaunas–Marijampolė–Suvalkai). 1.8 paveiksle matyti, kaip 2002–2004 metais šiame kelyje kito provėžų gylis.

Padidėjus krovinių pervežimams, padidėja automobilio masė, taip pat ir apkrova į ašį [14]. Būtent ši apkrova į ašį ir nulemia provėžų atsiradimą ir jų tolesnį didėjimą asfaltbetonio dangose.

2005 metais magistraliniuose keliuose lengvasis transportas sudarė 83,52 % bendrojo transporto priemonių srauto, krovinis transportas – 16,48 % (2,44 % daugiau nei 2004 m.). Keliuose A1–A2 lengvasis transportas sudarė 85,12 % bendrojo transporto priemonių srauto, krovinis transportas – 14,88 % (1,22 % daugiau nei 2004 m.). Keliuose A3–A17 lengvasis transportas sudarė 83,33 % bendrojo transporto priemonių srauto, krovinis transportas – 16,67 %

(2,31 % daugiau nei 2004 m.).



1.8 pav. Provėžų gylis pasiskirstymas kelyje „Via Baltica“

Maksimalus leistinasis provėžų gylis Lietuvos Respublikoje yra 20 mm. Atliktų provėžų matavimų rezultatai [15] parodė, kad šiuo metu apie 2 % kelių tinklo viršija maksimalią leistinąją provėžų gylis ribą (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Provėžų gylis Lietuvos Respublikos automobilių kelių dangose pasiskirstymas

Provėžų gylis	
mm	%
< 5	52,0
5-10	31,0
10-15	11,3
15-20	3,9
20-30	1,5
>30	0,3

Anksčiau pateikti paveikslai ir didėjantis sunkiasvorio eismo intensyvumas aiškiai rodo, kad Lietuvos Respublikos keliuose provėžų gylis didėja, todėl tikėtina, kad didės ir ateityje.

1.2. Veiksniai, lemiantys provėžų mažinimą

Reikia pasakyti, kad jau seniai dėmesys skiriamas provėžų problemai. Pirmieji žingsniai buvo žengti dar 1950 m. pradžioje. Tačiau visas mokslinis tyrimas buvo sukoncentruotas į

asfaltbetonio savybių gerinimą, keičiant paties asfaltbetonio mišinio rodiklius.

Nemažai bandymų buvo atlikta siekiant išnagrinėti, kaip asfaltbetonio mišinio vidinis trinties kampas bei sukibimas veikia provėžų susidarymą [8, 16]. Šie parametrai kinta, priklausomai nuo asfaltbetonio mišinio granulimetrinės sudėties, bitumo kiekio ir jo sankibos su mineralinėmis medžiagomis. Be abejo, šie parametrai taip pat priklauso ir nuo aplinkos temperatūros. Rezultatai buvo gauti taikant triašį bandymo metodą ir imituojant judančią apkrovą. Atliktieji tyrimai parodė, jog abu šie parametrai turi įtakos asfaltbetonio atsparumui šlyties įtempimams – didesnis sukibimas ir vidinis asfaltbetonio trinties kampas padidina laikomąją asfaltbetonio galią.

Vidinės trinties kampas priklauso nuo asfaltbetonio mineralinės sudėties ir nuo naudojamų medžiagų. Kai asfaltbetonio mišiniam gaminti naudojamos skaldytos medžiagos, asfaltbetonio mišinio vidinis trinties kampas yra didesnis. Kai kuriose Europos šalyse [17] yra privaloma naudoti skaldytas mineralines medžiagas mišiniuose, skirtuose dangoms, veikiamoms ypatingų apkrovų. Lietuvoje atlikti tyrimai parodė, kad skaldytų medžiagų naudojimas padidina asfaltbetonio mišinio atsparumą šlyties deformacijų susidarymui [18]. Lietuvos Respublikoje priimta, kad asfaltbetonio mišiniam naudojamas smėlis yra nuo 0 iki 2 mm skersmens dalelės ir jos išgaunamos natūraliuoju būdu, t.y. jų neskaldant.

Mineralinių medžiagų forma ir prigimtis asfaltbetonio mišinių charakteristikoms turi nemažos įtakos. Šių kintamųjų įtaka nustatoma laboratorinėmis sąlygomis, remiantis susiformavusių asfaltbetonyje provėžų gyliu [19]. Naudojant skaldytas bei geresnės kokybės medžiagas, susiformavusių provėžų gylis yra mažesnis. Taip pat pagerėja tokios charakteristikos: dinaminis standumas, pastovumas, ilgaamžiškumas.

Asfaltbetonio mišinio granulimetrinė sudėtis ir bitumo kiekis veikia asfaltbetonio fizines-mechanines savybes, kurios savo ruožtu lemia šlyties deformacijų asfaltbetonio sluoksniuose susidarymą. Optimaliai parinktas bitumo kiekis ir granulimetrinė sudėtis pagerina fizines-mechanines mišinio savybes, taip pat ir asfaltbetonio sluoksnių atsparumą šlyties įtempimams [20].

Pasaulinėje praktikoje atlikta pakankamai daug ir išsamių tyrimų, kad būtų galima nustatyti kaip bitumo kiekis, markė, netgi skirtingų gamintojų bitumas veikia asfaltbetonio charakteristikas. Pasaulyje ir Lietuvoje naudojamas asfaltbetonio mišinių projektavimas pagal Maršalą. Naudojant šį metodą pagrindiniai rodikliai yra šie: asfaltbetonio tankis, asfaltbetonio mišinio tankis, taip pat pastovumas ir plastiškumas pagal Maršalą. Pastovumo ir plastiškumo santykis yra dydis, pagal kurį sprendžiama, kiek vienas ar kitas asfaltbetonio mišinys yra atsparus šlyties deformacijų susidarymui, nes kuo šis santykis didesnis, tuo laikoma, kad asfaltbetonio mišinys yra atsparesnis [9].

Lietuvoje šiai problemai spręsti buvo skiriamas nemažas dėmesys. Daugelio autorių [16, 18, 21] atlikti tyrimai parodė, kad kai kurių medžiagų naudojimas pagerina asfaltbetonio pastovumą ir plastiškumą pagal Maršalą.

Ypatingas dėmesys skiriamas ir bitumo kiekiui asfaltbetonio mišiniuose. Nustatyta, kad asfaltbetonio mišinys geriausias savo savybes įgyja tada, kai mišinyje yra tinkamas (optimalus) bitumo kiekis. Projektuojant asfaltbetonio mišinius pagal Maršalo metodą, laboratorinėmis sąlygomis optimalus bitumo kiekis nustatomas atliekant skirtingų mišinių su skirtingais bitumo dydžiais tyrimus. Esant mažesniai bitumo kiekiui, gaunamos geresnės savybės, nulemiančios atsparumą šlyties deformacijų susidarymui, o ypač tuo metu, kai dangos temperatūra yra aukšta. Vasarą dienos metu asfaltbetonio dangos įkaista net iki $+60^{\circ}\text{C}$ [13]. Tačiau bitumo kiekio mažinimu nereikia piktnaudžiauti, nes sumažėjęs plastiškumas pagreitina temperatūrinių plyšių susidarymą.

Kai kurių Lietuvos [20] ir kitų šalių autorių [22] sukurta bitumo kiekio skaičiavimo metodika leidžia, remiantis mišinio granulimetrine sudėtimi, apskaičiuoti optimalų bitumo kiekį. Suskaičiavus optimalų bitumo kiekį, gaunamas ne tik ekonominis efektas, bet ir pagerėja asfaltbetonio savybės.

Daug dėmesio skirta ir bitumo asfaltbetonio mišiniuose naudojimui. Tyrimais nustatyta, kad provėžų gylis asfaltbetonyje priklauso nuo asfaltbetonio mišinio standumo, kuris savo ruožtu priklauso nuo bitumo standumo [8, 9].

Tyrimais [18] nustatyta, kad naudojant standesnę bitumą pagerėja asfaltbetonio mišinio fizinės, mechaninės savybės.

Kovai su provėžomis pasaulyje ir Lietuvoje taikomi ir polimerais modifikuotas bitumas. Kai kurie autoriai [16, 23, 24] yra ištyrę kaip polimerais modifikuotas bitumas veikia asfaltbetonio charakteristikas. Jų gauti rezultatai parodė, kad naudojant tokį bitumą pakinta asfaltbetonio savybės. Modifikavimui naudojant skirtingus polimerus, skirtingai pakinta ir asfaltbetonio charakteristikos. Tačiau pagerinus vienas charakteristikas, automatiškai pablogėja kitos. Taigi parenkant polimerus bitumui modifikuoti, būtina įvertinti visų asfaltbetonio charakteristikų pokyčius.

Bitumo sankiba su mineralinėmis dalelėmis taip pat veikia šlyties deformacijas. Esant žemoms temperatūroms, bitumui pasidarius standžiam, sukibimas neturi lemiamos įtakos, tačiau kai dangos temperatūra pakyla, šio parametro įtaka išauga. Bloga sankiba nulemia, kad asfaltbetonyje, veikiant automobilių eismo apkrovoms, mineralinės dalelės gali laisviau judėti. Šio judėjimo pasekmė ir yra šlyties deformacijų asfaltbetonio dangose susiformavimas. Minėtai problemai spręsti gali būti naudojami papildomi priedai, kurie turi būti įterpiami į asfaltbetonio mišinius. Mokslininkų atlikti tyrimai [21] parodė, kad, naudojant tokias medžiagas, bitumo sukibimą su mineralinėmis medžiagomis galima padidinti net iki 20 %.

1.3. Šlyties deformacijos asfaltbetonyje: atsiradimas ir didėjimas

Asfaltbetoniui vadinama medžiaga gaunama sutankinus specialiai pagamintą mišinį, sudarytą

iš skaldos arba žvyro, smėlio arba skaldelės, mineralinių miltelių ir bitumo, parinktų atitinkamu racionalių santykiu. Reikiamas fizinės ir mechaninės savybės asfaltbetonis įgyja tik po atitinkamo sutankinimo. Asfaltbetonis yra sudėtinga statybinė medžiaga. Šis sudėtingumas pasireiškia jo struktūros sudėtingumu ir savybių priklausomybe nuo įvairiapusių faktorių.

Asfaltbetonis yra tampriai-klampis medžiaga. Tai reiškia, kad, veikiant skirtingoms aplinkos sąlygoms, asfaltbetonis gali būti skirtingos fizinės būsenos [5, 22], t.y.:

- klampiosios būsenos,
- tampriai-klampiosios būsenos,
- tampriai-plastinės būsenos,
- tampriosios-trapiosios būsenos.

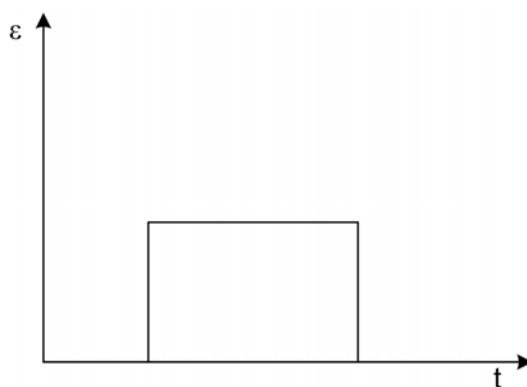
Klampiosios būsenos asfaltbetonio temperatūra yra didesnė nei $+90^{\circ}\text{C}$ ir bent mažiausi įtempiai sukelia visos sistemos deformaciją.

Tampriai-klampiosios būsenos asfaltbetonio temperatūra svyruoja nuo $+50^{\circ}\text{C}$ iki $+90^{\circ}\text{C}$. Įtempiai sukelia medžiagos deformaciją.

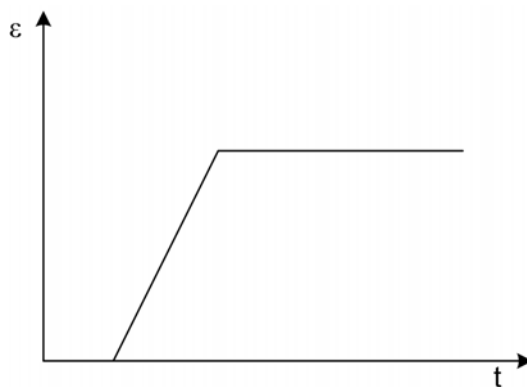
Tampriai-plastinės būsenos asfaltbetonio temperatūra yra nuo -10°C iki $+50^{\circ}\text{C}$. Įtempiams neviršijus takumo ribos, pasireiškia tampriosios savybės, o esant dideliems įtempiams pasireiškia tampriai-klampiosios asfaltbetonio savybės.

Tampriai-trapiosios būsenos asfaltbetonis būna tada, kai temperatūra yra žemesnė nei 0°C .

Toliau esančiuose paveiksluose pateiktas skirtingų medžiagų funkcionavimas.

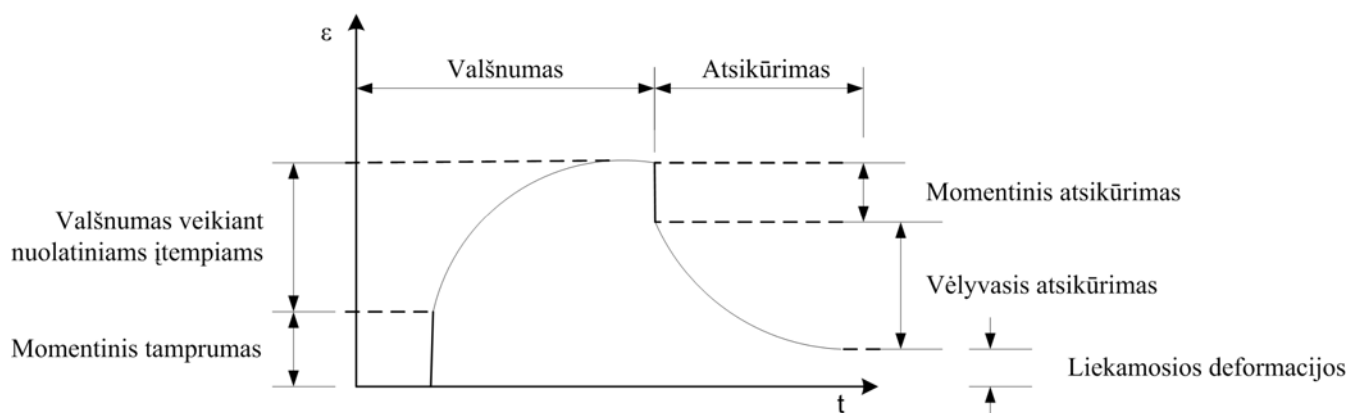


1.9 pav. Tampriosios medžiagos funkcionavimas



1.10 pav. Klampiosios medžiagos funkcionavimas

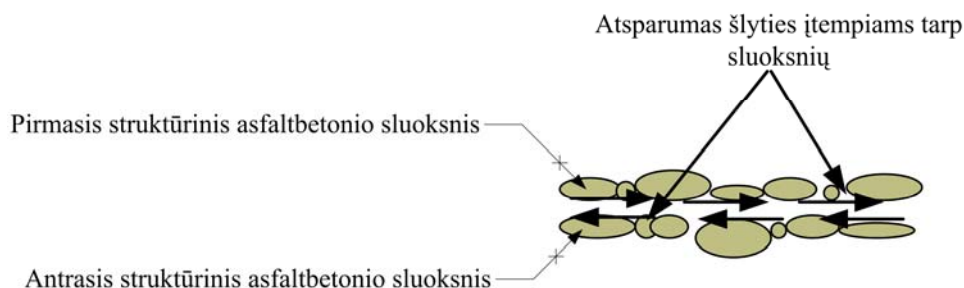
Lietuvos sąlygomis asfaltbetonio dangų funkcionavimas vyksta nuo $+60^{\circ}\text{C}$ iki -30°C temperatūroje, todėl medžiagos savybės keičiasi nuo klampiosios iki tampriai-trapiosios būsenos.



1.11 pav. Tampriai-klampiosios medžiagos funkcionavimas

Provėžos, kurios susijusios su šlyties deformacijomis, susiformuoja periodu, kai yra aukšta asfaltbetonio dangos temperatūra. Šios provėžos yra liekamųjų šlyties deformacijų (1.11 pav.) akumuliacija per tam tikrą dangos eksploatacijos laiką, veikiant automobilių eismo apkrovoms.

Asfaltbetonį veikiant automobilių eismo apkrovoms, dangoje susidaro šlyties įtempiai.



1.12 pav. Asfaltbetonio atsparumas šlyčiai

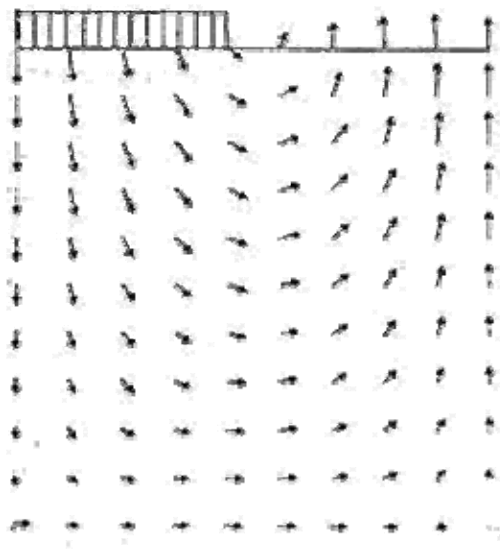
Šie įtempiai verčia asfaltbetonio mineralines daleles judėti viena kitos atžvilgiu. Asfaltbetonio rišamoji medžiaga, t.y. bitumas priešinas šiam judėjimui (1.12 pav.). Tačiau bitumas yra medžiaga, kurios savybės labai priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, mažėja bitumo standumas, taip pat mažėja ir tarp mineralinių dalelių esantis ryšių stiprumas.

Atsparumas šlyties deformacijoms paprastai aprašomas pagal tokią priklausomybę [20, 25, 26]:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1.1)$$

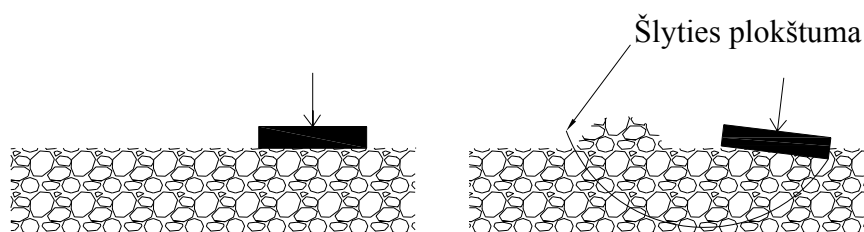
čia: τ – atsparumas šlyčiai, c – sukibimas, σ – įtempiai, ϕ – vidinis trinties kampas.

Kai šlyties įtempiai viršija bitumo standumo ribas, mineralinės dalelės pradeda judėti viena kitos atžvilgiu. Šlyties įtempių skaitinės vertės priklauso nuo veikiamos apkrovos dydžio ir veikiamos apkrovos ploto. Didžiausios skaitinės šlyties įtempių vertės [4] yra 5 cm gylyje ir apie 10 cm nuo apkrovos pridėjimo krašto horizontaliaja kryptimi. Dalelės iš apkrovos poveikio zonos juda į tas asfaltbetonio dangos dalis, kurios nėra taip intensyviai veikiamos apkrovų (1.13 pav.).



1.13 pav. Dalelių judėjimas priklausomai nuo veikiamos apkrovos

Taigi viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje susiformuoja šlyties deformacijos (1.14 pav.).

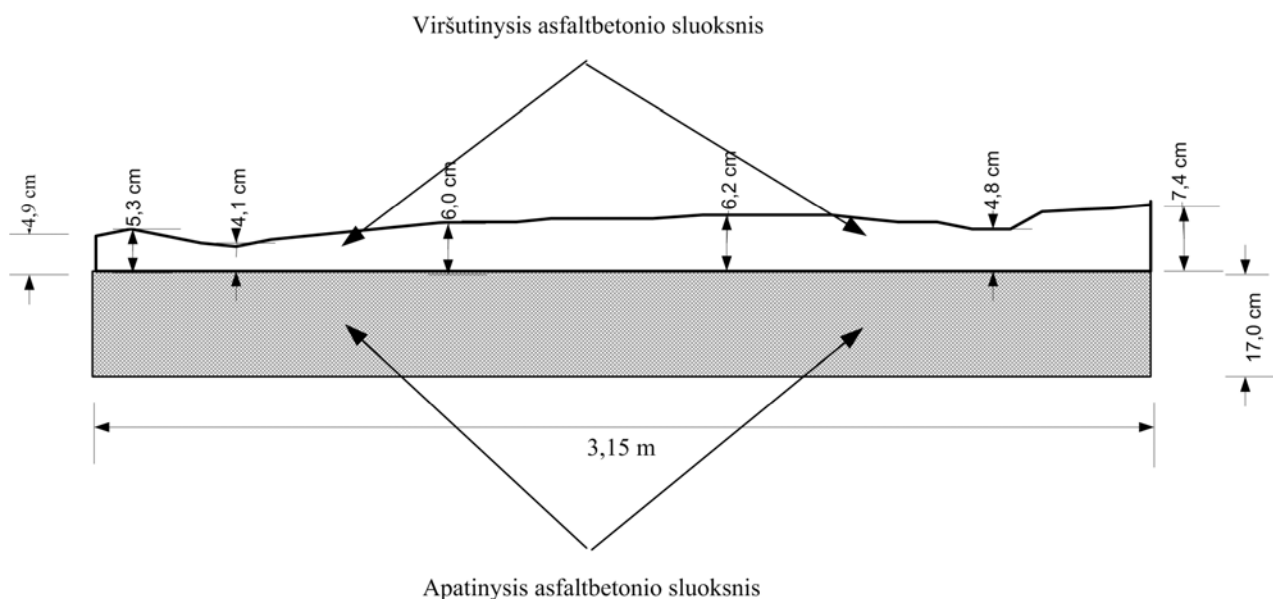


1.14 pav. Šlyties deformacijų susidarymas asfaltbetonyje

Teoriškai provėžos, susijusios su šlyties deformacijomis, turėtų susiformuoti visame asfaltbetonio sluoksnyje, tačiau tyrimai, atlikti Lietuvoje [27], parodė, kad provėžos, susijusios su šlyties deformacijomis, susiformuoja tik viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje. Tai yra sąlygojama kelių priežasčių:

- 1) skirtingais metų periodais dangos temperatūra yra skirtinga,
- 2) skirtingi atskirų sluoksnių fiziniai-mechaniniai rodikliai,
- 3) nepakankamas sukibimas tarp atskirų asfaltbetonio sluoksnių,
- 4) gamybiniai veiksniai: asfaltbetonio mišiniai neatitinka keliamų reikalavimų (gamybinis brokas, netinkamas mišinio projektas).

Karštuoju metų periodu dangos temperatūra Lietuvoje pakyla iki $+60^{\circ}\text{C}$, tačiau žemesniuosiuose asfaltbetonio sluoksniuose temperatūra yra mažesnė – apie 10°C . Lietuvos Respublikoje konstrukciniams asfaltbetonio sluoksniams keliami skirtingi reikalavimai: viršutiniai asfaltbetonio sluoksniai yra intensyviau veikiami temperatūros pokyčių, todėl šiems sluoksniams turi būti naudojamas asfaltbetonis, turintis universalesnių savybių. Tokie mišiniai turi būti ne tik aukšto pastovumo pagal Maršalą, nes tai nulemia atsparumą provėžoms susidaryti karštuoju metų periodu, bet ir pakankamo plastiškumo, kad šaltuoju metų periodu nesusidarytų temperatūrinių plyšių. Apatiniai sluoksniai paprastai pasižymi daug didesniu pastovumu pagal Maršalą. Teoriškai visi asfaltbetonio sluoksniai turėtų funkcionuoti kaip vienas monolitinis sluoksnis. Tačiau tokioje sistemoje silpnosios vietos yra konstrukcinių sluoksnių sujungimai. Akivaizdu, kad pakankamas sukibimas tarp atskirų sluoksnių užtikrintų sistemos monolitiškumą, tačiau dažniausiai sukibimas yra pernelyg mažas. Lietuvoje viršutiniojo asfaltbetonio sluoksnio storis yra 5 cm. Būtent tokioje gylyje ir susiformuoja maksimaliosios šlyties įtempių vertės. Nesant tarp sluoksnių pakankamo sukibimo, viršutiniojo sluoksnio dalelės pradeda šliaužti žemiau esančio sluoksnio paviršiumi ir judėti į viršų.



1.15 pav. Iškarta iš Vilniaus mieste esančio Savanorių prospekto

1998 metais Vilniaus mieste Savanorių prospekte paimta iškarta (1.15 pav.) aiškiai parodo provėžų susidarymo pobūdį. Iš zonos, kuri yra veikiamą apkrovų, asfaltbetonio dalelės migruoja į tas zonas, kurios nėra veikiamos arba yra veikiamos mažesnių apkrovų.

Taip viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje susiformuoja šlyties deformacijos. Tačiau asfaltbetonis yra medžiaga, kuri neveikiama jokių apkrovų atkuria pradines savo charakteristikas, todėl asfaltbetoniui yra svarbus poilsio laikas. Jeigu daugkartiniai apkrovimai pasikartotų ritmingai, t.y. apkrovos laikas ir poilsio laikas būtų proporcingi, tai teoriškai asfaltbetonyje nesisusidarytų provėžų. Tačiau dienos metu asfaltbetonis yra veikiamas dažnai pasikartojančių apkrovų, o poilsio

laikas yra labai trumpas. Per šį laiko tarpą asfaltbetonis nesusigražina savo pradinių charakteristikų. Ilgesnį poilsio laiką asfaltbetonis turi tik nakties metu, kai mažesnis eismo intensyvumas. Tačiau asfaltbetonio relaksacijos laikas priklauso nuo temperatūros. Nakties metu temperatūra būna žemesnė nei dienos metu, todėl ir relaksacijos laikas pailgėja. Esant intensyviu sunkiasvorių automobilių eismui, asfaltbetonis nesugeba grąžinti savo pradinių charakteristikų.

Aprašant šlyties deformacijas asfaltbetonyje matematiškai, yra taikoma tampriai-klampaus kūno teorija [28–34]. Medžiagos, kurioms taikomas šis principas, charakterizuojamos atitinkama reakcija R , proporcinga pradiniam poveikiui I ir apibrėžiamos tiesiniu superpozicijų principu. Šie tiesiniai reikalavimai yra išreiškiami tokiomis išraiškomis:

Homogeniškumo atveju:

$$R\{\alpha I\} = \alpha R\{I\}, \quad (1.2)$$

Superpozicijos atveju:

$$R\{I_1 + I_2 + \dots + I_n\} = R\{I_1\} + R\{I_2\} + \dots + R\{I_n\}, \quad (1.3)$$

čia: α – pasirenkamoji konstanta, $\{\}$ simbolis charakterizuoja, kad medžiagos funkcionavimas R yra pradinio poveikio I funkcija.

Bet kuriuo atveju, kai medžiagos reakcija priklauso nuo laiko ir atitinka anksčiau abu minėtuosius reikalavimus, medžiagos funkcionavimas apibūdinamas tampriąja klampa.

Nagrinėjant asfaltbetonį, gaunamos tokios deformacijų ir įtempimų išraiškos [35]:

$$u_i^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial u_i}{\partial \tau} d\tau, \quad (1.4)$$

$$\sigma_{ij}^R = E_R \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \tau} d\tau, \quad (1.5)$$

čia: σ_{ij} – fizikiniai įtempiai, u_i – fizikinis poslinkis, σ_{ij}^R – pseudo įtempiai, u_i^R – pseudo poslinkiai, E – tampro modulis, D – atsparumas valkšnumui, E_R – etaloninis tampro modulis, įvertintas kaip konstanta.

Šlyties deformacijų atveju [35, 36]:

$$\tau(t) = \int_0^t \frac{1}{E} (t - \xi) \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} d\xi, \quad (1.6)$$

$$\gamma(t) = \int_0^t D(t - \xi) \frac{\partial \tau}{\partial \xi} d\xi, \quad (1.7)$$

čia: τ – laiko požiūriu kintantys įtempiai, γ – laiko požiūriu kintanti deformacija, $E(t)$ – tampros modulis, $D(t)$ – atsparumas valkšnumui, ξ – integravimo kintamasis.

Būtent D yra asfaltbetonio atsparumą valkšnumui charakterizuojantis parametras. Jis apskaičiuojamas remiantis reologinėmis asfaltbetonio charakteristikomis [1a]:

$$D = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{T_1} \right) \right], \quad (1.8)$$

čia: σ – įtempimai, E_0 , E_1 – tamprumo moduliai, T_0 – asfaltbetonio relaksacijos laikas, $T_0 = \eta / E_0$, η – medžiagos klampumas, t – laikas.

Šis parametras taikomas charakterizuojant asfaltbetonio atsparumą šlyties deformacijoms.

1.4. Asfaltbetonio charakteristikos, nulemiančios atsparumą šlyties deformacijoms

Asfaltbetonio funkcionavimą, veikiant automobilių eismo apkrovoms, galima aprašyti keliais principais [37].

Mineralinės medžiagos (skalda, žvyras, smėlis) deformuojasi kaip visiškai tamprūs kūnai. Jų deformacinės savybės nėra susijusios su temperatūros pokyčiais, veikiančiosios apkrovos pobūdžiu ir trukme. Tačiau ir rišamojoje medžiagoje deformacinės savybės veikiant apkrovai pasireiškia labai aiškiai, ypač didėjant temperatūrai ir veikiant ilgalaikiai apkrovai. Mineralinėse medžiagose atsparumas deformacijai yra didesnis tada, kai kietosios dalelės geriau kontaktuoja su užpildo grūdeliais. Vadinasi, rišamojoje medžiagoje įtempiai mažėja, o užpilde didėja. Tačiau toks persiskirstymas vyksta ne iš karto, todėl šiose medžiagose susidaro atitinkamos deformacijos. Įtempių rišamojoje medžiagoje mažėjimas ilgesnis tada, kai yra didesnė rišamosios medžiagos masė ir storesnis rišamosios medžiagos plėvelės storis. Taigi įtempių persiskirstymas priklauso nuo mineralinių medžiagų prigimties, bitumo savybių ir kitų faktorių. Vadinasi, asfaltbetonio mišiniuose akivaizdi šlyties ir deformacijų didėjimo tendencija, nes įtempiams persiskirstant stambiosios mineralinės dalelės nedalyvauja.

Nuėmus apkrovą, tamprieji užpildai stengiasi grįžti į pradinę padėtį, tačiau klampi aplinka stabdo tampriąsias deformacijas. Kuo rišamoji medžiaga plastiškesnė ir kuo didesnis jos

tarpsluoksnis, tuo yra didesnis stabdymas. Kadangi rišamoji medžiaga yra savotiškas mikrobetonas ir turi savo struktūrą – azūrinį erdvinį tinklelį, kuriame kietosios dalelės viena su kita kontaktuoja, šioje medžiagoje vyksta įtempių persiskirstymas. Todėl, nuėmus apkrovą, deformacijos panaikinimas sudaro tam tikrą pirminės deformacijos dalį, įskaitant ir šlyties deformacijas.

Siekiant aprašyti, kaip mechaninis poveikis veikia asfaltbetonyje įtempius ir deformacijas, taikomi reologiniai modeliai. Esant teigiamoms temperatūroms, asfaltbetonis yra modelis su kietuoju (mineralinis užpildas) ir klampiuoju (rišamoji medžiaga) elementais. Atskirai paimti kietieji elementai, veikiami apkrovos, paklūsta Huko dėsnui:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.9)$$

$$\sigma = G\varepsilon, \quad (1.10)$$

Atskirai paimti klampieji elementai paklūsta klampiojo skysčio dėsnui:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1.11)$$

čia: σ – įtempiai, E ir G tampros ir šlyties moduliai eilės tvarka, ε – santykinė tamprioji deformacija, η – klampumas, $\frac{d\varepsilon}{dt}$ – deformacijos didėjimo gradientas.

Kylant asfaltbetonio temperatūrai ar didėjant gelio užpildo kiekiui (mažėjant skaldos procentui mišinyje), asfaltbetonio būseną artėja prie vadinamojo Foigto modelio. Šis modelis yra sudarytas iš kietosios spyruoklės (Huko dėsnis) ir klampiojo pasipriešinimo (Niutono dėsnis). Toks modelis yra pakankamai paprastas ir charakterizuojamas dviem parametrais: tampros moduliu E ir klampumu η .

Tangentiniai suminiai įtempiai asfaltbetonio paviršiuje ir gilesniuosiuose sluoksniuose turi tokią išraišką:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \quad (1.12)$$

Elemento vėlavimo laikas lygus $\frac{\eta}{E}$, kuris savo ruožtu yra labai svarbus relaksacinis asfaltbetonio parametras. Kuo didesni įtempiai ir kuo mažesnė relaksacijos laiko konstanta, tuo didesnės medžiagoje susiformuoja liekamosios deformacijos. Deformacijos didėja sulig kiekvienu nauju apkrovos pridėjimo ciklu, o įtempiai visiškai neatsinaujina nuo anksčiau veikusios apkrovos. Dėl to po daug pasikartojančių apkrovų asfaltbetonyje susiformuoja liekamosios deformacijos,

kurios savo skaitmenine išraiška gali pasidaryti gana didelės.

Asfaltbetonio funkcionavimą, esant žemoms temperatūroms, geriau charakterizuoja Maksvelo mechaninis modelis (1.16 pav.).



1.16 pav. Maksvelo mechaninis modelis

Šio modelio elementus veikia vienodi įtempiai, be to, ir deformacijos juose yra vienodos. Šis modelis aprašomas tokia lygtimi:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (1.13)$$

Klampioji ar tamprioji Foigto ar Maksvelo modelių būklė priklauso ne tik nuo asfaltbetonio struktūros tipo ar asfaltbetonio temperatūros, bet taip pat ir nuo apkrovos pridėjimo greičio ir jos veikimo trukmės. Kuo didesnis apkrovos pridėjimo greitis ir kuo ilgesnis jos poveikio laikas, lyginant su relaksacijos laiku, tuo smarkiau asfaltbetonyje pasireiškia klampiai-plastiškos savybės.

Tokiam kūnui charakterizuoti naudojami reologiniai modeliai, kuriuos sudaro tamprumo ir klampumo elementai [5, 36]. Paprastai yra skiriami trys pagrindiniai reologiniai modeliai, kuriais bandoma paaiškinti asfaltbetonio funkcionavimą:

- 1) Biurgerio reologinis modelis,
- 2) Hueto-Sageto reologinis modelis,
- 3) Boguslavskio reologinis modelis.

Biurgerio reologinis modelis yra bene labiausiai pasaulyje paplitęs reologinis modelis, kuris naudojamas tiek Europos šalių, tiek JAV, tiek Azijos šalių mokslininkų. Šį modelį sudaro du tamprieji ir du klampieji elementai. Kitas gana plačiai naudojamas reologinis modelis yra Hueto-Sageto [38, 39]. Šis reologinis modelis, sudarytas iš dviejų tamprumo ir dviejų klampumo elementų, kurių pirmasis tamprumo elementas atspindi besikeičiančią asfaltbetonio tamprą, o antrasis asfaltbetonio, kaip visiškai tampraus kūno, funkcionavimą.

Trečiasis, taip pat gana plačiai paplitęs, ypač buvusiose Sovietų Sąjungos šalyse, yra Boguslavskio reologinis modelis [40]. Šis modelis labai panašus į anksčiau nagrinėtuosius reologinius modelius: jis sudarytas iš dviejų tampros ir dviejų klampumo elementų, tačiau skiriasi tik jų tarpusavio išsidėstymas. Naujas šio modelio dalykas yra sausoji trintis, kuri įvertina

mineralinių dalelių, nepadengtų bitumu, tarpusavio sąveiką.

Visi šie reologiniai modeliai turi savo pranašumų ir savo trūkumų. Pavyzdžiui, naudojant Biurgerio reologinį modelį, įmanoma modeliuoti asfaltbetonio funkcionavimą veikiant dažnai pasikartojančioms apkrovoms. Hueto- Sageto modelis įvertina asfaltbetonio savybių priklausomybę nuo temperatūros, o Boguslavskio reologinis modelis įvertina sausąją trintį tarp mineralinių dalelių asfaltbetonio viduje. Apibrėžti, kuris modelis geriausiai charakterizuoja asfaltbetonio funkcionavimą, yra labai sunku. Tačiau daugelis autorių [39–43], tyrinėję asfaltbetonio reologiją, atlikę rezultatų, gautų skaičiuojant pagal šiuos modelius tarpusavio palyginimą, ir palyginę su rezultatais, gautais eksperimentinių tyrimų metu, išskiria vieną pagrindinį parametą, kuris nulemia šlyties deformacijų karštuojų metų periodu susidarymą. Šis parametras yra asfaltbetonio klampumas η . Taikant Biurgerio reologinį modelį, pagrindinis klampumas yra η_0 , taikant Hueto-Sageto modelį, – tai yra elementas k , o taikant Boguslavskio modelį – elementas η .

Taigi asfaltbetonio klampumas charakterizuoja asfaltbetonio deformavimosi periodą veikiant šlyties įtempimams ir tai nulemia vienos ar kitos fizinės būklės asfaltbetonio būseną. Didesnis klampumas charakterizuoja asfaltbetonį, kaip tamprųjį kūną, ir atvirkščiai. Reikia pasakyti, kad asfaltbetoniui esant tamprios būsenos, šlyties deformacijos nesusiformuoja.

Asfaltbetonio tampra E taip pat yra charakteristika, nuo kurios priklauso minėtosios deformacijos. Kuo didesnis tampros modulis, tuo kūnas yra atsparesnis įvairiems įtempimams, taip pat ir šlyties. Šis parametras taip pat yra gana reikšminga asfaltbetonio reologijos charakteristika. Padidinus asfaltbetonio tampros modulio skaitines vertes iki tos ribos, kad asfaltbetonis funkcionuotų kaip tamprusis kūnas, jame niekada nesusiformuos jokių deformacijų arba įtempių, susiformuojančių asfaltbetonyje, be to, niekada nebus pasiekta tokių vertės dydžių, kurios galėtų sukelti deformacijas.

1.5. Išvados

Apibendrinant šį skyrių galima daryti tokias išvadas:

- 1) Pagrindinė provėžų, susijusių su šlyties deformacijomis, susidarymo asfaltbetonio dangose priežastis yra šlyties įtempiai, atsirandantys nuo automobilių eismo apkrovų. Šios pažaidos formuojasi viršutiniuosiuose asfaltbetonio dangos sluoksniuose ir dangai įkaitus virš $+35^{\circ}\text{C}$, šiems įtempimams veikiant, pažaidų plėtra tampa ypač intensyvi.
- 2) Teoriniais tyrimais nustatyta, kad provėžų susidarymo problema bus labai aktuali ir ateityje, nes sunkiasvorių transporto priemonių eismas intensyvėja, vis daugiau gabenama krovinių, didėja leistinoji automobilių ašies apkrova.

3) Provėžoms mažinti taikomi būdai yra orientuojami į asfaltbetonio mišinių tobulinimą, keičiant mišinių sudėtinius komponentus, jų santykį, naudojamos įvairios rišamosios medžiagos. Tačiau, kaip rodo praktika, minėtos priemonės ne visada duoda laukiamus rezultatus.

4) Pagrindinės asfaltbetonio savybės, nulemiančios asfaltbetonio atsparumą šlyties deformacijoms, yra asfaltbetonio tampa ir klampumas.

2. GEOSINTETINIŲ MEDŽIAGŲ ĮTAKOS ŠLYTIES DEFORMACIJOMS TEORINIS TYRIMAS

Šio skyriaus medžiaga paskelbta tokiose publikacijose: 2a, 3a, 4a.

2.1. Geosintetinių medžiagų naudojimas automobilių kelių dangoms stiprinti

Pasaulyje, o pastaraisiais metais ir Lietuvoje dangoms stiprinti vis plačiau naudojamos geosintetinės medžiagos.

Geosintetika – bendrasis terminas, vartojamas kalbant apie plonas ir lanksčias, pagamintas iš sintetinių polimerų medžiagas, naudojamas grunte ar aplink gruntą, siekiant sustiprinti ar išplėsti kokybines jo charakteristikas.

Geosintetinės medžiagos – tai iš sintetinių polimerų sukurti gaminiai, kurie gerai sąveikauja su kitomis statybinėmis medžiagomis ir gali būti naudojami kaip skiriantieji, filtruojantieji, drenuojantieji, armuojantieji ir hidroizoliuojantieji (barjero) sluoksniai civilinei statybai.

Skiriamos tokios geosintetinės medžiagos:

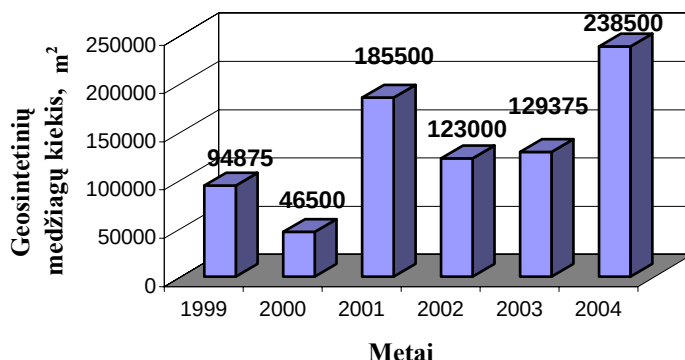
- medžiagos, pagamintos iš polimerų arba su polimeriniais priedais, skirtos naudoti geotechniniams projektams [25],
- plokščiosios medžiagos, pagamintos iš polimerų, naudojamos grunte, skaldoje, uolienoje ar kitose geotechninėse konstrukcijose (Amerikos medžiagų tyrimų asociacija),
- surenkamosios konstrukcijos, naudojamos geotechniniams, hidrauliniams ir transporto konstrukcijoms bei statiniams.

Taigi geosintetinėmis vadinamos tokios medžiagos, kurių bent viena sudedamoji dalis yra pagaminta iš sintetinių ar gamtinių polimerų, naudojamų mechaniskam gruntų sąryšiui su kitu gruntu ar statybinėmis medžiagomis. Savo savybių universalumu geosintetinės medžiagos yra labai paplitusios įvairiose statybos šakose, todėl ne išimtis yra ir kelių tiesyba.

Automobilių kelių dangų konstrukcijos jau nuo seno yra stiprinamos įvairiais audiniais. Pvz., 1920 metais JAV Pietų Karolinos valstijoje keliai buvo stiprinami medvilniniu audiniu. Teigiamos šio eksperimento pusės pasireiškė labai greitai, tačiau buvo ir nemažai trūkumų, kurių pagrindinis – trumpas audinių eksploatacinis laikotarpis. Visgi tai buvo teigiama, nes nuo tada prasidėjo įvairių tyrimų ir ieškojimų epocha. Buvo ieškoma naujų audinių tipų, atliekami įvairūs tyrimai bei stebėjimai. 1960 metais, atsiradus sintetinėms medžiagoms, kelių tiesimo srityje ženkliai padidėjo įvairių audinių naudojimas. Atsirado naujų audinių rūšių, jos buvo pradėtos klasifikuoti pagal gamybos medžiagas, naudojimo sritį ir pan.

Lietuvoje pirmą kartą šios medžiagos buvo panaudotos kelyje A1 (Vilnius–Kaunas–Klaipėda) 1996 metais [44]. Reikia pasakyti, kad pagal panaudojamų geosintetinių medžiagų kiekį šis kelias ir iki šiol išlieka didžiausiu objektu (2.1 pav.). Geosintetinės medžiagos yra naudojamos

norint sumažinti atspindinčius plyšius ir paprastai yra klojamos ant senosios dangos, viršuje užpylus naują asfaltbetonio sluoksnį [2a].



2.1 pav. Geosintetinių medžiagų naudojimas kelyje A1 (Vilnius–Kaunas–Klaipėda)

Taigi, kaip jau buvo minėta, geosintetinių medžiagų naudojimas yra gana dažnas reiškinys automobilių kelių tiesyboje. Šios medžiagos gali būti naudojamos tokiose srityse [45–47, 3a, 4a]:

- transporto statinių statybai (atraminės sienutės, įvairi izoliacija įrengiant pralaidas, pagrindo sustiprinimas po pralaidomis ir kt.),
- aplinkos apsaugai (šlaitų apsauga nuo erozijos, skysčiams nuolaidžių sluoksnių įrengimas degalinėse, plovyklose ir įvairių transporto priemonių remonto teritorijose),
- automobilių kelių dangų konstrukcijoms (skirtingų medžiagų sluoksnių atskyrimas, dangos armavimas, barjero funkcija).

Ankstyvieji armuotųjų kelių dangų konstrukcijų tyrimai buvo pradėti 1980 metais [48, 49]. Tais metais buvo pradėti aukšto tūsumo polimeriniais tinklais armuotų asfaltbetonio dangų tyrimai, kurie tęsėsi iki 1986 metų. 1988–1989 metais buvo atlikti plieniniais tinklais armuotų konstrukcijų tyrimai. 1997–1998 metais taip pat buvo atlikti geosintetinėmis medžiagomis armuotų dangų tyrimai, t.y. tada, kai geosintetinės medžiagos buvo klojamos po asfaltbetonio sluoksniais.

Paprastai asfaltbetonio dangų stiprumo charakteristikų gerinimas yra asocijuojamas su dangų armavimu šiomis medžiagomis. Armuojant asfaltbetonio dangas yra išskiriami du armavimo būdai, kai:

- 1) armuojamas dangos pagrindas (geosintetinės medžiagos klojamos dangos pagrindo sluoksnio zonoje),
- 2) asfaltbetonio armavimas (geosintetinės medžiagos klojamos tarp dviejų asfaltbetonio sluoksnių).

Armavimas nėra naujas dalykas ir yra gana gerai ištirtas. Tačiau didesnioji dalis tyrimų skirta dangos pagrindo armavimui analizuoti. Kaip jau buvo minėta, pagrindinis vykdomų tyrimų tikslas – išnagrinėti mechaninį ir geosintetinėmis medžiagomis armuotų dangų funkcionavimą. Taip

pat buvo vykdomi numatomų gauti rezultatų, taikant baigtinių elementų metodą, palyginimai su eksperimentinių tyrimų rezultatais [50–55]. Šiuose darbuose ištirta, kaip armavimas geosintetinėmis medžiagomis veikia susidariusių provėžų gylį, priklausomai nuo panaudotos geosintetinės medžiagos. Taip pat buvo bandoma nustatyti, kaip susiformavusių provėžų gylis priklauso nuo veikiamos apkrovos ir armavimui panaudotos geosintetinės medžiagos. Be to, gana smulkiai išnagrinėta, kaip skirtinguose dangos sluoksniuose kinta įvairūs įtempiai [56]. Užsienio autoriai yra pateikę pasiūlymų vertinant šių medžiagų panaudojimo efektyvumą nestandžiose asfaltbetonio dangose ir sukūrę metodiką, kaip įvertinti šių medžiagų įtaką konstruojant nestandžiąsias dangas.

Panašūs tyrimai buvo atliekami ir kitų užsienio autorių [57, 58], kurie išanalizavo geosintetinėmis medžiagomis armuotų dangų konstrukcijas. Šalia provėžų gylio matavimų viršutiniuosiuose sluoksniuose buvo išmatuotos deformacijos ir žemiau esančiuose sluoksniuose.

Atliktaisiais tyrimais nustatyta, kaip dangos pagrindo armavimas veikia provėžų susiformavimą tiek viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje, tiek ir žemiau esančiuose sluoksniuose, taip pat buvo išanalizuotas ir naudojamų geosintetinių medžiagų efektyvumas, priklausomai nuo šalčiui atsparaus sluoksnio stiprio.

Kiti autoriai [59, 60] šalia susiformavusių provėžų gylio yra nustatę ir efektyvų medžiagos paklojimo gylį nestandžiojoje dangos konstrukcijoje. Be kita ko, rusų mokslininkų tyrimai rėmėsi santykinu visos kelio dangos deformacijos modulių bei žemės sankasos stipriu, išreikštu jau minėtuojamu deformacijos modulių.

Kitų literatūros šaltinių autoriai [61, 62] pateikia tyrimus, atliktus armuojant asfaltbetonio dangas, kai geosintetinės medžiagos yra paklotos po asfaltbetonio sluoksniu ant dangos pagrindo paviršiaus. Šių šaltinių duomenimis nustatyta, kaip skirtinguose dangos sluoksniuose kinta įtempiai ir kaip geosintetinės medžiagos veikia įvairias deformacijas. Reikia pasakyti, kad išsamesnių tyrimų sulaukė tik asfaltbetonio armavimas, mažinant atspindinčių plyšių augimą. Atliktieji tyrimai [63, 64] parodė akivaizdžią naudą, kurią gali duoti geosintetinių medžiagų naudojimas šiam tikslui.

Iš aptartosios medžiagos akivaizdu, kad labai mažai atlikta tyrimų, analizuojančių, kaip asfaltbetonio armavimas veikia plastinių bei šlyties deformacijų atsiradimą asfaltbetonyje, nors nemaža dalis šių medžiagų yra naudojama ir kovai su minėtaisiais asfaltbetonio dangos defektais.

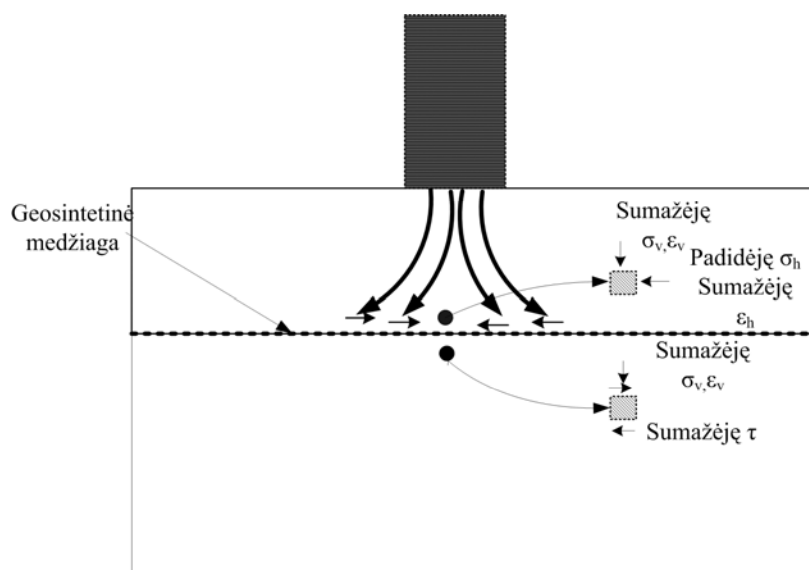
Be kita ko, apžvelgti tyrimai parodė, kad geosintetinės medžiagos veikia provėžų dydį, tačiau tyrimai buvo atliekami esant vienam asfaltbetonio sluoksniui ir armuojant dangos pagrindą. Išlieka neaišku, kaip geosintetinės medžiagos veiks provėžas, jeigu yra keli asfaltbetonio sluoksniai, nes šios medžiagos yra paklotos tarp viršutiniojo ir antrojo sluoksnio. Beje, atkreiptinas dėmesys, kad provėžos, susijusios su šlyties deformacijomis, susiformuoja būtent viršutiniajame asfaltbetonio sluoksnyje.

Lietuvoje iki šiol nebuvo atliekama jokių tyrimų, pagrindžiančių geosintetinių medžiagų naudojimo efektyvumą, mažinant provėžas. Geosintetinės medžiagos buvo naudojamos tik

vadovaujantis firmų gamintojų rekomendacijomis ir nesiekiant jokio mokslinio pagrindimo.

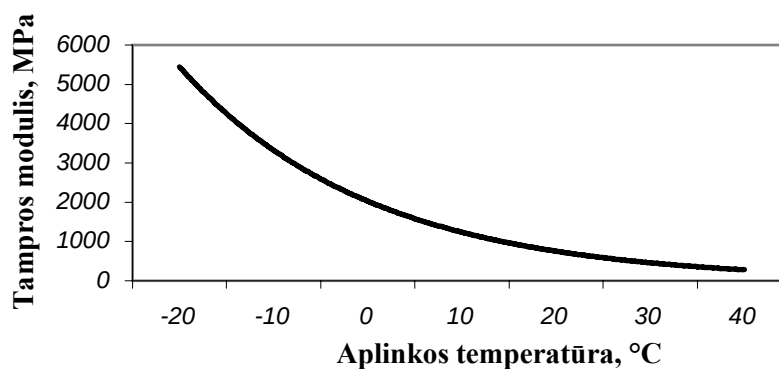
2.2. Geosintetinių medžiagų įtaka šlyties deformacijoms

Asfaltbetonio dangų stiprinimas geosintetinėmis medžiagomis asocijuojasi su armavimo terminu. Armavimas – tai konstrukcinė priemonė, suteikianti papildomo stiprumo. Pats terminas „armavimas“ asocijuojasi su įtempių mobilizacija tam tikruose sluoksniuose, konkrečiai – geosintetinėse medžiagose.



2.2 pav. Armavimo mechanizmas

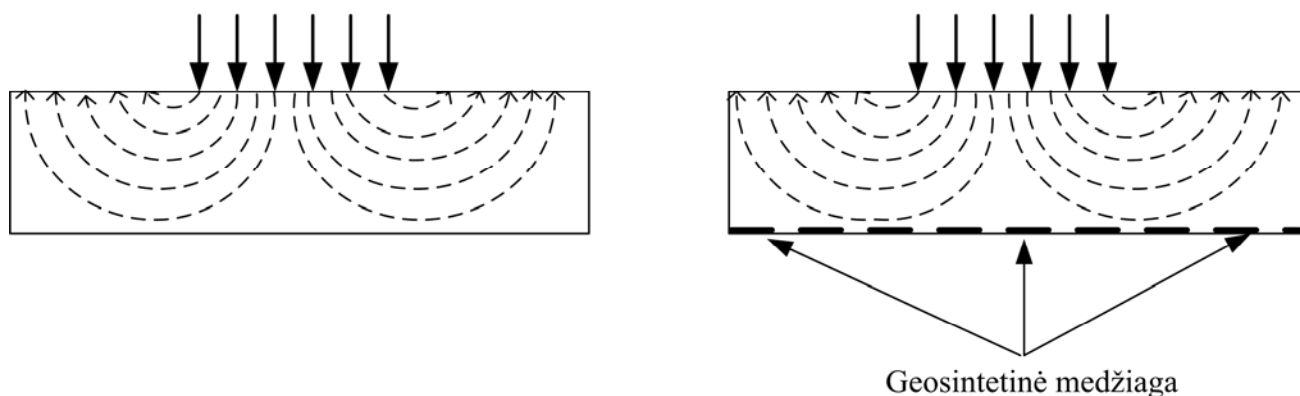
Asfaltbetonis yra medžiaga, pasižyminti tamprumo savybėmis. Tampra yra medžiagos savybė, leidžianti pasipriešinti ją veikiams įtempims. Tačiau, esant skirtingoms aplinkos temperatūroms, asfaltbetonio tampra kinta labai plačiomis ribomis (2.3 pav.) [65].



2.3 pav. Asfaltbetonio tampros modulio priklausomybė nuo aplinkos temperatūros

Karštuoju metų periodu dienos temperatūrai svyruojant nuo $+20^{\circ}\text{C}$ iki $+50^{\circ}\text{C}$ tampros modulis kinta maždaug tris kartus. Panašiai kinta ir asfaltbetonio klampumo reikšmės [40].

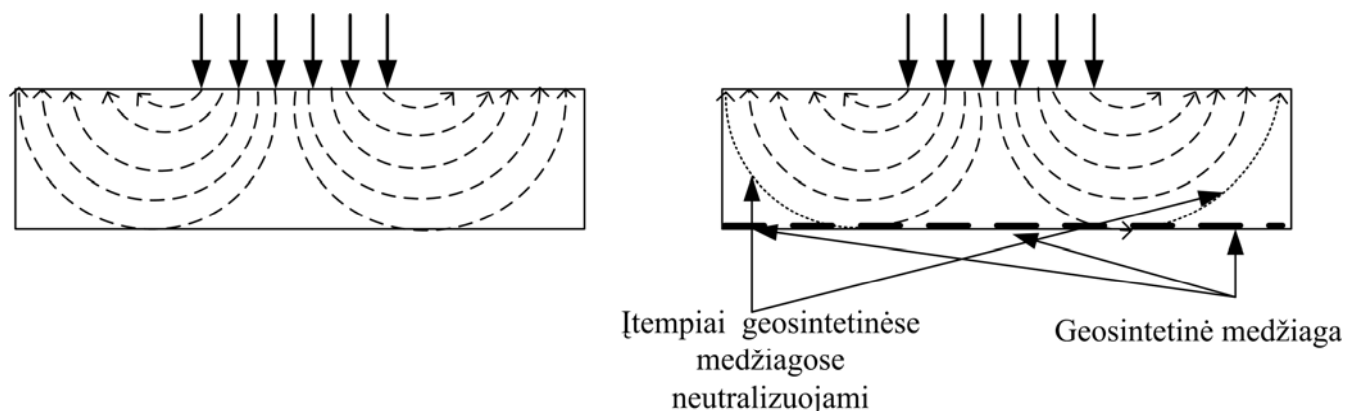
Esant žemoms temperatūroms ir esant aukštam tampros moduliui, asfaltbetonis pats sugeba priešintis jį veikiantiems įtempiams. Tokiu atveju šlyties įtempiai koncentruojasi asfaltbetonio sluoksnio paviršiuje arba užgęsta nepasiekę gilesnių sluoksnių, taigi geosintetinės medžiagos šiems įtempiams įtakos neturi (2.4 pav.).



2.4 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas, kai asfaltbetonis funkcionuoja kaip tamprusis kūnas

Lietuvos Respublikoje kelių dangos vasaros metu įkaista maždaug iki $+60^{\circ}\text{C}$. Esant tokiai temperatūrai asfaltbetonis jau yra paradęs savo gebėjimą priešintis minėtiems įtempiams. Taigi šlyties įtempių vertės išauga ir pasistumia giliau, taip pasiekdamos asfaltbetonio sluoksnio apatiniają dalį. Tyrimais [37] buvo nustatytas santykinis šlyties įtempių dydis, kuris, temperatūrai kintant nuo 0°C iki $+25^{\circ}\text{C}$, pasikeičia nuo 2,5 iki 16 kartų.

Esant tokiai situacijai, į asfaltbetonio funkcionavimą įsitraukia geosintetinės medžiagos (2.5 pav.). Jos perima dalį šlyties įtempių, taip sumažindamos šių įtempių įtaką asfaltbetoniui.



2.5 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas, kai asfaltbetonis funkcionuoja kaip netamprusis kūnas

Geosintetinės medžiagos nėra tokios jautrios temperatūros svyravimams. Asfaltbetoniui armuoti dažniausiai naudojamos medžiagos yra pagamintos iš poliesterio arba polimerinės medžiagos su stiklo pluoštu. Poliesterio tamprumo modulis pradeda mažėti esant $+220^{\circ}\text{C}$, o stiklo pluoštas net $+800^{\circ}\text{C}$. Geosintetinės medžiagos esant tokiai temperatūrai funkcionuoja kaip tamprieji kūnai. Asfaltbetonio sluoksnis deformuojasi iki tos ribos, kol į sistemos darbą įsitraukia ir minėtosios medžiagos. Vėliau deformacijos nustoja augti.

2.3. Numatomos geosintetinių medžiagų įtakos šlyties deformacijoms ir asfaltbetonio reologinėms charakteristikoms analizė

Geosintetinių medžiagų vertinimas nestandžiųjų dangų konstrukcijoms siejamas su atitinkamais armavimo koeficientais. Armuojant dangos pagrindą, šie koeficientai susiejami su dangos pagrindo stiprumu. Kai kurie autoriai [56, 58] atliktų tyrimų pagrindu koeficientus parenka pagal atitinkamas nomogramas, priklausomai nuo esamo dangos pagrindo stiprio, išreikšto CBR %. Kiti autoriai [59, 60] naudoja regresines formules, kurios apima daugelį kitų parametrų [66].

Beje, minėti autoriai yra nustatę geosintetinių medžiagų įtaką struktūrinėms provėžoms, tačiau akivaizdu, kad nėra ištirta, kaip geosintetinės medžiagos nulemia šlyties deformacijas. Be to, skaičiuojant šlyties deformacijas, svarbu įvertinti ir geosintetinių medžiagų įtaką. Reikia pasakyti, kad pasaulyje yra gana daug metodų, kuriais remiantis galima skaičiuoti provėžų gylį, tačiau visus skaičiavimo metodus galima suskirstyti į dvi kryptis:

- 1) įtempių prognozavimą sluoksniuotoje struktūroje,
- 2) klampiai-tampraus kūno modeliavimą.

Įtempių sluoksniuotoje struktūroje prognozavimo metodai remiasi liekamųjų deformacijų charakteristikomis, nustatytomis laboratoriniais tyrimais, kartu analizuojant asfaltbetonio dangas, taikant tiesinio ar netiesinio tampros teorijas, provėžų gylį prognozavimu [67].

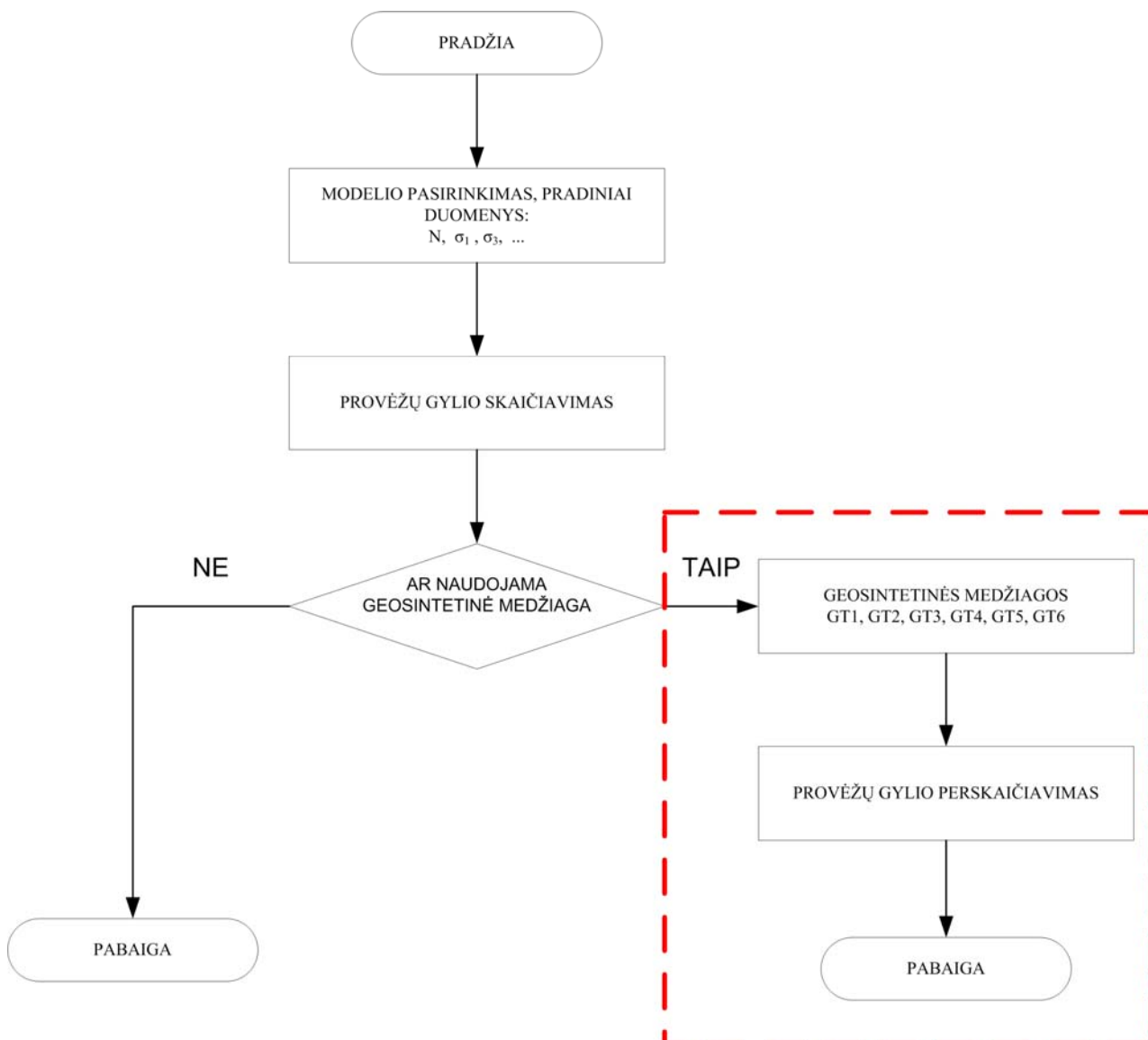
Liekamųjų deformacijų dydžio prognozavimas vyksta po tam tikro apkrovų skaičiaus, kiekvieną dangos struktūros sluoksnį išskaidžius į papildomus sluoksnius ir suskaičiavus įtempius, esančius kiekvieno sluoksnio centre žemiau apkrovos pridėjimo taško, remiantis tampraus kūno principais. Vadinasi, taip surandamos priklausomybės tarp įtempių reikšmių kiekvieno sluoksnio centre ir plastinių deformacijų, gautų atliekant laboratorinius tyrimus. Galutinis provėžų gylis po tam tikro apkrovų skaičiaus yra plastinių deformacijų kiekvieno sluoksnio centre suma, priderinta prie kiekvieno sluoksnio storio.

Ši metodologija yra supaprastintas inžinerinis provėžų gylį skaičiavimas, leidžiantis naudoti dangos lankstumą, nes remiasi tampros teorijomis. Tačiau šio būdo trūkumas yra tas, kad sunku prognozuoti provėžų gylį tose dangos zonose, kurios nėra veikiamos tiesioginės apkrovos. Taigi, siekiant įvertinti šlyties įtempius, medžiagos charakteristikas, būtina atlikti papildomus

skaičiavimus.

Tamprą ir klampumą apimanti metodologija aprašo medžiagų savybes, priklausančias nuo laiko bei įtempių būklės tam tikrame dangos konstrukcijos taške. Medžiagos savybės yra charakterizuojamos baigtiniu skaičiumi reologinių modelių, esant tam tikrai jų konfigūracijai. Šios metodologijos pranašumas yra tas, kad skaičiavimai nepriklauso nuo apkrovos judėjimo krypties. Galutinis rezultatas geriau atspindi deformacijas kiekviename žemesniajame sluoksnyje veikiant judamosioms apkrovoms. Šio metodo taikymas leidžia geriau aprašyti asfaltbetonio dangų funkcionavimą, nors matematinės priklausomybės ir tampa sudėtingesnės.

Norint nustatyti geosintetinių medžiagų įtaką šiems skaičiavimo metodams, svarbu nustatyti, kokioje skaičiavimo stadijoje pasireikš šių medžiagų įtaka. Taikant įtempių prognozavimo teoriją, galima daryti prielaidą, kad geosintetinės medžiagos sąlygos minėtuosius dydžius. Kadangi įtempiai bus geosintetinėse medžiagose neutralizuojami, tikėtina, kad armavimo koeficientai juos sumažins. Tačiau šiuo atveju būtina ištirti įtempius, atsirandančius dangos sluoksniuose.

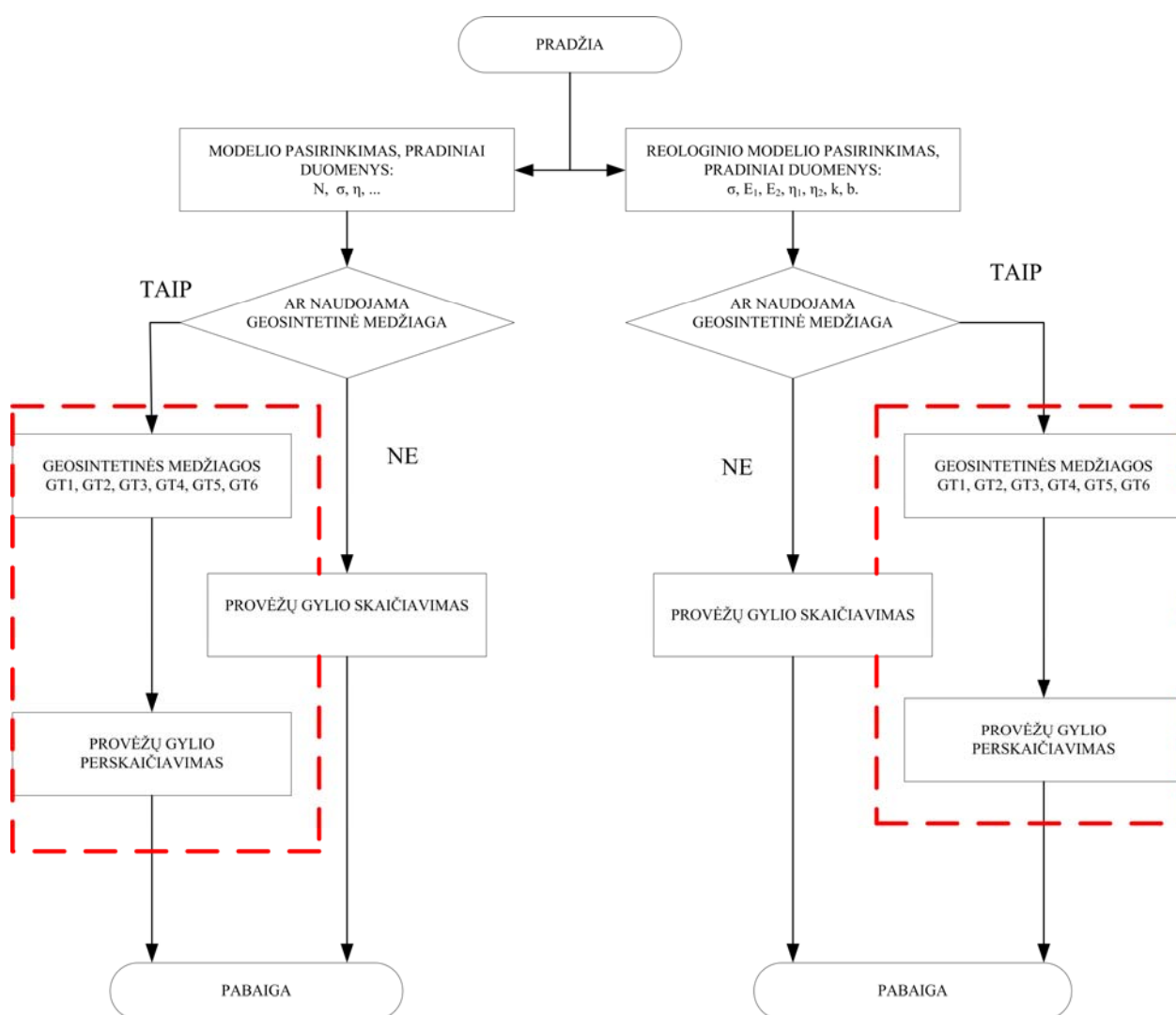


2.6 pav. Numatomos geosintetinių medžiagų įtakos skaičiuojant provėžas įtempių prognozavimo metodu modelis

Eksperimento metu minėtieji dydžiai nebuvo tirti, todėl geosintetinių medžiagų įtaka bus nustatoma galutiniams parametrams, t.y. jau suskaičiuotam provėžų gyliui. Tam tikslui armavimo koeficientai bus naudojami galutiniam rezultatui koreguoti (2.6 pav.).

Taikant tampriai-klampiojo kūno teoriją, geosintetinių medžiagų įtaka įgyja kitokios prasmės. Ištyrus, kaip geosintetinės medžiagos nulemia reologinių asfaltbetonio parametrų skaitines vertes, armavimo koeficientai sąlygoja ne galutinį skaičiavimo rezultatą, bet pačius parametrus, vykstant skaičiavimo procesui (2.7 pav.).

Skaiciuojant tokiu metodu provėžas yra galimi du būdai: kai provėžų gylis skaičiuojamas remiantis tik kai kuriomis reologinėmis asfaltbetonio charakteristikomis ir kitas būdas, kai liekamosios deformacijos apskaičiuojamos naudojant tam tikrą reologinį asfaltbetonio modelį.



2.7 pav. Numatoma geosintetinių medžiagų įtaka skaičiuojant provėžas naudojant klampiai tamprus kūno teoriją

Pastaba: minėtuose modeliuose pažymėti raudona spalva pakeitimai yra siūlomi šio darbo autoriaus.

2.4. Išvados

Apibendrinant šį skyrių galima daryti tokias išvadas:

- 1) Geosintetinių medžiagų naudojimas nerišlių medžiagų sluoksniuose yra pakankamai ištirtas ir pagrįstas moksliskai, eksperimentiniais tyrimais bei kelių eksploatavimo patirtimi. Tolesni eksperimentiniai tyrimai yra siejami daugiau su geosintetinių medžiagų tobulinimu nei jų naudojimu rišlių medžiagų dangos sluoksniuose.
- 2) Asfaltbetonio armavimas geosintetinėmis medžiagomis buvo orientuotas į įvairaus pobūdžio plyšių prevenciją. Mokslo tyrimais išsamiai nustatyta geosintetinių medžiagų įtaka šioms pažaidoms, nustatyti medžiagų naudojimo prioritetai.
- 3) Provėžų mažinimas, naudojant geosintetines medžiagas, buvo sukoncentruotas struktūrinėse provėžose. Tyrimais įrodyta teigiama šių medžiagų įtaka minėtoms deformacijoms. Geosintetinės medžiagos šlyties deformacijų sukeliamoms provėžoms mažinti buvo naudojamos, tačiau, išskyrus pavienius bandymus, nuoseklesni tyrimai nebuvo daromi.
- 4) Provėžoms, susijusioms su šlyties deformacijomis, mažinti būtina organizuoti geosintetinėmis medžiagomis armuotų asfaltbetonio dangų eksperimentinius tyrimus. Tyrimais reikia nustatyti, kurias asfaltbetonio reologines savybes ir kaip jas veikia geosintetinės medžiagos, taip pat, kaip provėžų gylis kinta nuo jų skaitinių verčių.
- 5) Remiantis geosintetinių medžiagų įtakos asfaltbetonio dangų tvarumui mokslo tyrimais, galima teigti, kad geosintetinių medžiagų įtaka dangos savybėms įvertinama armavimo koeficientais, kurie atspindi šių savybių pokytį.

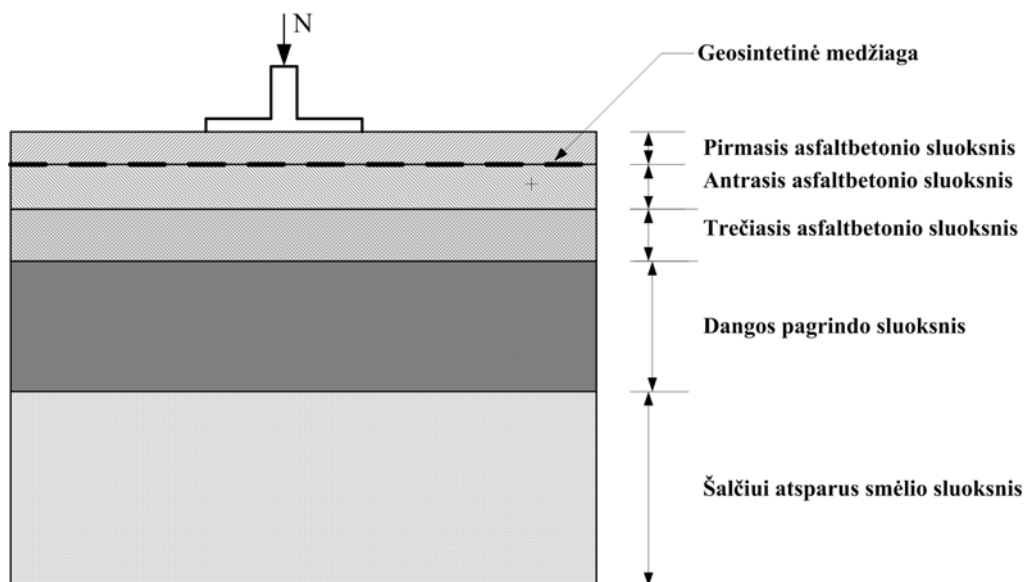
3. EKSPERIMENTINIAI GEOSINTETINĖMIS MEDŽIAGOMIS ARMUOTŲ ASFALTBETONIO DANGŲ TYRIMAI

Šio skyriaus medžiaga paskelbta tokiose publikacijose: 5a, 6a, 7a.

3.1. Tyrimo objektas ir jo charakteristikos

Eksperimentiniais tyrimais siekiama nustatyti, kaip asfaltbetonio armavimas geosintetinėmis medžiagomis veikia šlyties deformacijas ir provėžas asfaltbetonio dangose.

Šiai įtakai nustatyti bandymų ruože buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai. Siekiant išvengti eksperimento paklaidų, pasirinktasis bandymų ruožas buvo naujai įrengta eismo juosta Vilniaus mieste rekonstruojamojoje Ozo gatvėje. Įrengtas bandomasis gatvės ruožas buvo armuotas geosintetinėmis medžiagomis (3.1 pav.). Siekiant nustatyti, kaip armavimas veikia asfaltbetonio reologines charakteristikas ir deformacijas asfaltbetonyje, buvo armuotas asfaltbetonio sluoksnis, t.y. geosintetinės medžiagos paklotos tarp pirmojo ir antrojo asfaltbetonio sluoksnių. Įrengtieji asfaltbetonio sluoksniai visame bandomajame ruože buvo vienodi: vienodas storis, vienoda markė, bei vienodos sudėtinės dalys. Kadangi dangos pagrindo, šalčiui atsparaus sluoksnių ir žemės sankasos medžiagos, taip pat ir tamprumo modulis visame ruože yra vienodas, todėl laikoma, kad jis nebus kintamasis dydis. Atskirų dydžių reikšmių skaitinių išraiškų kitimas bus siejamas tik su asfaltbetonio armavimu [5a, 6a, 7a].



3.1 pav. Eksperimentinio bandymų ruožo schema

Kelio dangos konstrukcija sudaryta iš tokių sluoksnių:

- 4 cm storio viršutinis 0/11 S–V asfaltbetonio sluoksnis,
- 5 cm storio apatinis 0/16 S–A asfaltbetonio sluoksnis,
- 6 cm storio apatinis 0/22 A asfaltbetonis sluoksnis,
- 25 cm storio skaldos sluoksnis (dangos pagrindas),

- 40 cm storio smėlio sluoksnis (šalčiui atsparus smėlio sluoksnis).

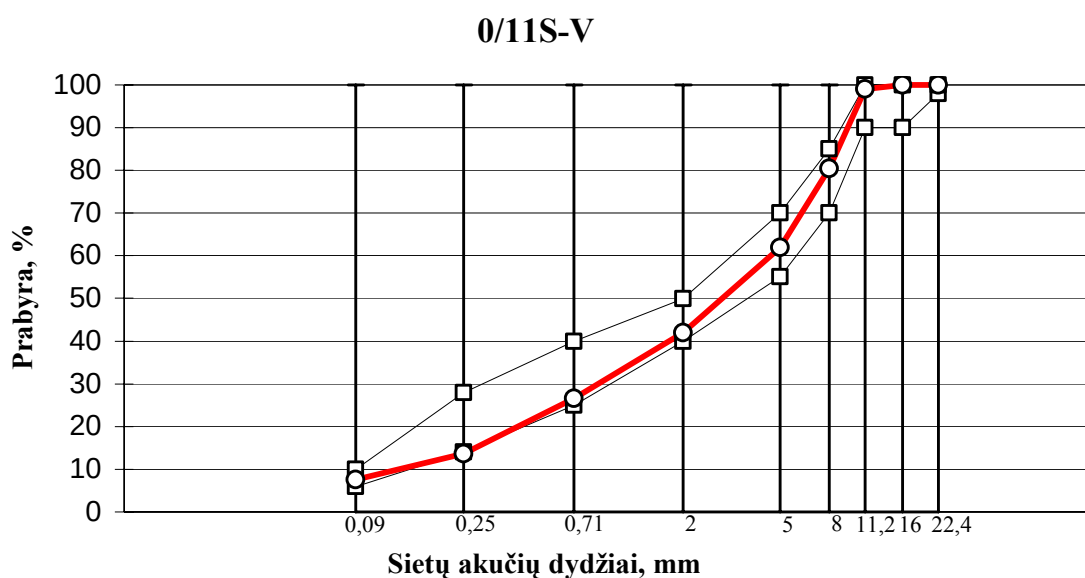
Visa dangos konstrukcija ir asfaltbetonio sluoksniams panaudotų mišinių fiziniai-mechaniniai rodikliai atitinka Lietuvoje galiojančius normatyvinius dokumentus [68, 69] ir yra pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Bandymų ruože panaudotų asfaltbetonio mišinių rodikliai

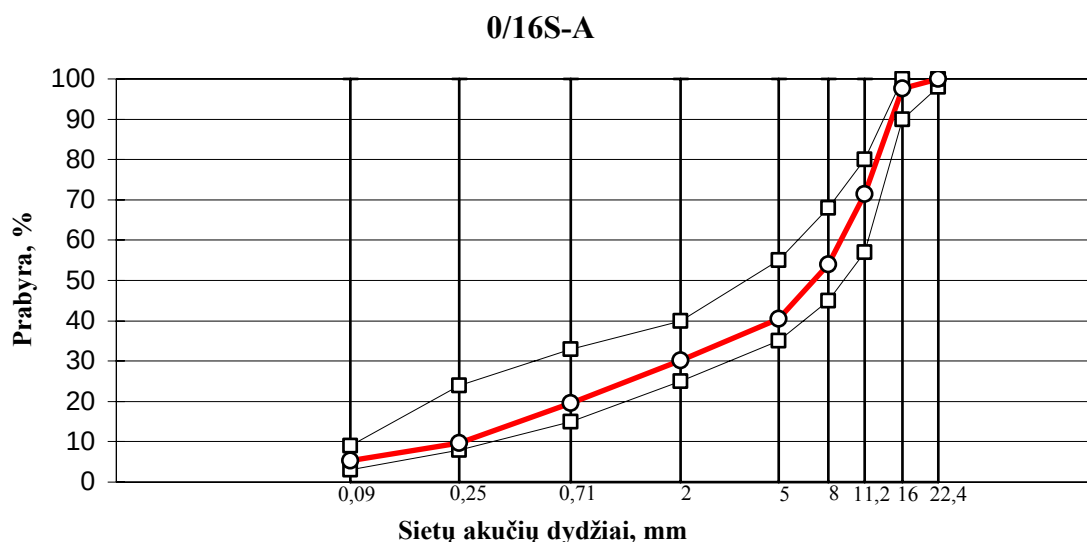
Asfaltbetonio mišinio rodikliai	Asfaltbetonis 0/11 S-V	Asfaltbetonis 0/16 S-A	Asfaltbetonis 0/22 A
Bitumo kiekis, %	5,9	4,9	3,8
Pastovumas pagal Maršalą, kN	8,4	7,9	9,1
Plastiškumas pagal Maršalą, mm	3,4	2,2	2,8
Santykinis standumas, kN/mm	2,5	3,7	3,3
Liekamasis aktyumas, %	2,0	3,1	5,8
Asfaltbetonio vidutinis tankis, g/cm ³	2,486	2,560	2,399
Asfaltbetonio mišinio vidutinis tankis, g/cm ³	2,538	2,481	2,548
Mišinio mineralinės dalies tankis, g/cm ³	2,785	2,766	2,706
Mineralinės dalies aktyumas, %	15,7	14,5	14,6

Minėtų mišinių granulimetrinės sudėtys pateiktos 3.2–3.4 paveiksluose ir atitinka tuos pačius galiojančius reikalavimus [70].

Minėtoji dangos konstrukcija pasirinkta todėl, kad tai yra viena labiausiai paplitusių dangų konstrukcijų, naudojamų tiek automobilių keliams, tiek miestų gatvėms tiesti.

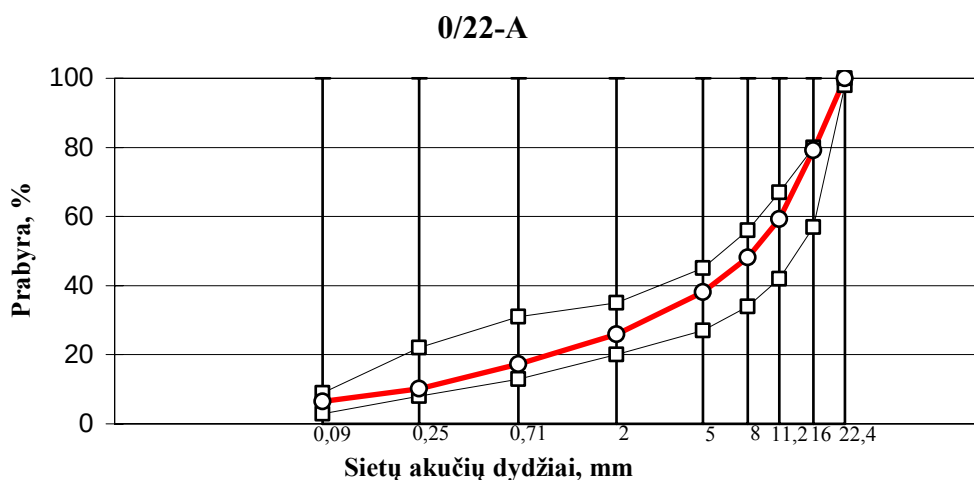


3.2 pav. 0/11 S–V asfaltbetonio mišinio granulimetrinė sudėtis



3.3 pav. 0/16 S–V asfaltbetonio granulimetrinė sudėtis

0/11 S–V mišinys naudojamas viršutiniams asfaltbetonio dangos sluoksniams įrengti, 0/16 S–V mišinys – tai apatiniams asfaltbetonio sluoksniams skirtas mišinys, o 0/22 A – tai mišinys, kuris naudojamas pagrindo asfaltbetonio sluoksniams įrengti.

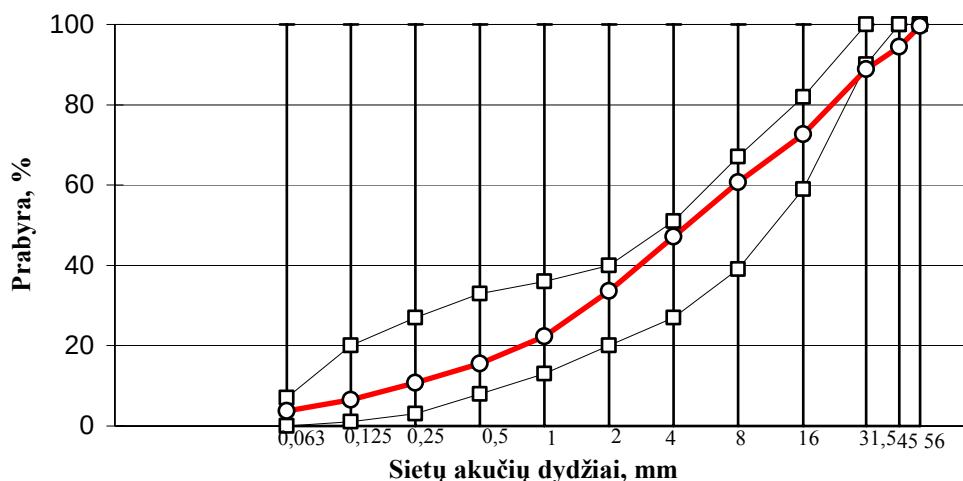


3.4 pav. 0/22-A asfaltbetonio mišinio granulimetrinė sudėtis

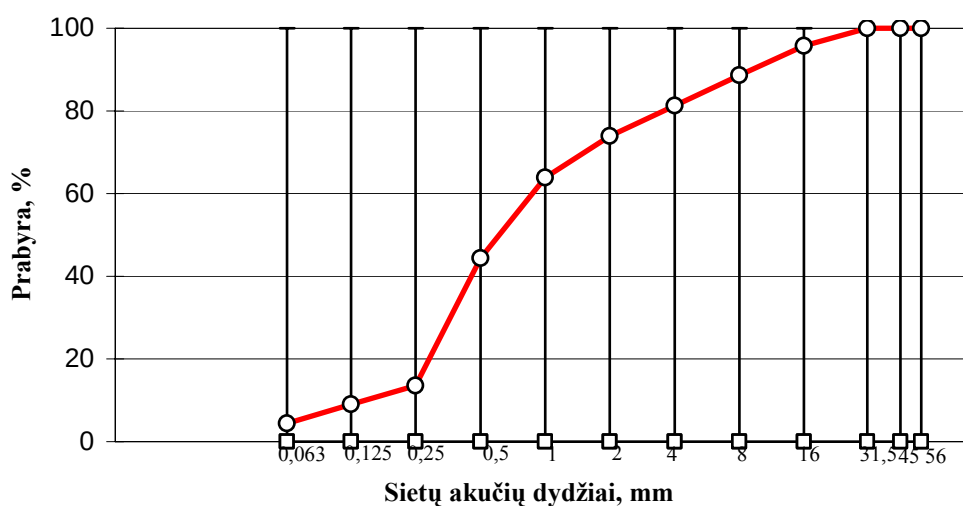
Atlikti kokybės tyrimai patvirtino, kad minėti asfaltbetonio mišiniai tenkina 3.1 lentelėje pateiktus projektinius mišinių rodiklius. Nuokrypiai neviršija leistinųjų reikšmių, kurie apibrėžti normatyviniuose dokumentuose [68].

Toliau esantys konstrukciniai sluoksniai parenkami naudojantis kitais Lietuvos Respublikoje galiojančiais normatyviniais aktais. Dangos pagrindo sluoksnio storis, naudojamos medžiagos, sutankinimas bei granulimetrinė sudėtis atitinka specialiuosius [70] reikalavimus. Šių sluoksnių

granulimetrinės sudėtys pateiktos 3.5 ir 3.6 paveiksluose.



3.5 pav. Žvyro mišinio granulimetrinė sudėtis



3.6 pav. Smėlio žvyro mišinio granulimetrinė sudėtis

Geosintetinėms medžiagoms, naudojamoms provėžoms mažinti Lietuvos Respublikoje, nkeliami jokie reikalavimai. Medžiagos parinktos autoriaus ir firmų gamintojų nuožiūra, remiantis jų techninėmis galimybėmis mažinti asfaltbetonio dangose šlyties deformacijas.

3.2 lentelė. Bandymų ruože panaudotos geosintetinės medžiagos

Panaudota medžiaga	Paklotos medžiagos plotas, m ²
Geotinklai	
HaTelit C 40/17	35
Bitutex Stargrid Glu 50	35
Armapal MP–50	35
Geotekstilės	
Pavemat	70
Pavegrid G–50	70
Fibertex AM–2	70

Bandymų ruože panaudotos geosintetinės medžiagos pateiktos 3.2 lentelėje.

Geotinklas HaTelit C 40/17 – tai iš poliesterio audinio, pynimo būdu pagaminta medžiaga, perpinta tarpusavyje, taip sudarydama tinklo formos struktūrą, kurios lydymosi temperatūra yra $+250^{\circ}\text{C}$. Kad būtų pagerintas sukibimas su asfaltbetonių, ši medžiaga yra padengta bitumu, o tarp atskirų tinklo gardelių patalpinama montavimo geotekstilė.

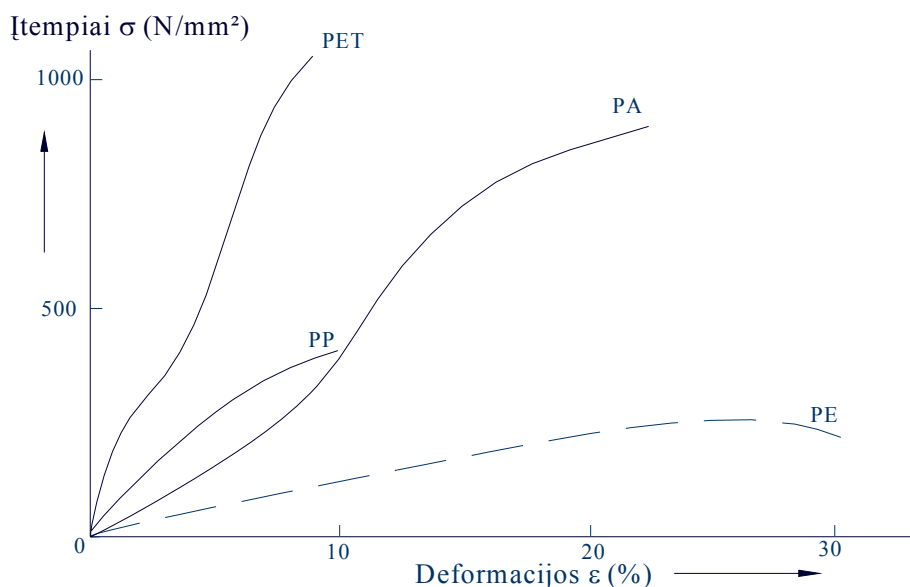
Bitutex Stargrid Glu 50 ir Armapal MP–50 – stiklo audinio pluoštas, padengtas lateksu ir perpinta tarpusavyje, taip sudarydama tinklo formos struktūrą. Šios medžiagos lydymosi temperatūra yra $+800^{\circ}\text{C}$. Tarp atskirų tinklo gardelių patalpinama montavimo geotekstilė.

Pavemat yra neaustinė geotekstilė, pagaminta iš polipropileno pluoštų.

Pavegrid G–50 – poliesterio ir stiklo plaušelių audinys, savo struktūra priskiriamas neaustinei geotekstilei.

Fibertex AM–2 geotekstilė gaminama iš polipropileno pluošto, termiškai apdirbta iš vienos pusės. Pagal savo struktūrą ji yra neaustinė geotekstilė.

3.7 paveiksle pateiktas kai kurių polimerų funkcionavimas.



3.7 pav. Skirtingų polimerų funkcionavimas

Pastaba: PET – poliesteris, PP – polipropilenas, PA – poliaramidas, PE – polietilenas.

Geosintetinių medžiagų funkcionavimas priklauso nuo polimero funkcionavimo. Tačiau parenkant medžiagas būtina atkreipti dėmesį ir į medžiagos struktūrą (tinklai, austinė, neaustinė geotekstilė), gamybos būdą (pynimo, klijavimo, šlampavimo būdai). Visos šios savybės nulemia galutines medžiagos savybes.

3.3 lentelė. Bandymų ruože panaudotų geosintetinių medžiagų pagrindinės savybės

Geosintetinės medžiagos pavadinimas	Medžiagos masė, g/m ²	Stiprumas tempiant, kN/m	Santykinis pailgėjimas esant maksimaliai apkrovai, %
HaTelit C 40/17	270	≥50	≤12
Bitutex Stargrid Glu 50	265	60	3
Armapal MP-50	360	60	3
Pavemat	140	7	50
Pavegrid G-50	340	50	3
Fibertex AM – 2	150	8	60

Tolimesniuose etapuose šios geosintetinės medžiagos naudojamos jas sukodavus atitinkamai GT1, GT2, GT3, GT4, GT5 ir GT6. Kodavimo tvarka neatitinka tos tvarkos, kuria medžiagos pateiktos ankstesniuose aprašymuose.

Bandomasis ruožas buvo įrengtas 2005 m. spalio mėn. Vilniaus mieste esančioje Ozo gatvėje (3.8 pav.).



3.8 pav. Bandymų ruožo įrengimo darbai: a – geotinklo klojimas, b – geotekstilės klojimas

Tarp atskirų bandymo ruožo sekcijų su skirtingomis geosintetinėmis medžiagomis buvo paliktas 1 metro tarpas, siekiant išvengti pašalinių poveikių tyrimams.

Suskaičiuotas krovininio eismo rodiklis VB [68] bandymų ruože yra 136. Tai gana mažas krovininio eismo intensyvumas, nes šia juosta vyksta intensyvus lengvųjų automobilių ir automobilių, kurių keliamoji galia iki 5 tonų, eismas. Pagrindinis sunkiasvoris eismas vyksta antroje eismo juostoje. Pagrindinės transporto priemonės, turinčios įtakos VB šioje eismo juostoje, yra viešas Vilniaus miesto transportas.

3.2. Eksperimentinių tyrimų metodika ir matavimo prietaisai

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti remiantis Lietuvos Respublikoje galiojančiais

normatyviniais aktais – Lietuvos standartais [71, 72].

Pagal pobūdį eksperimentas priskiriamas pasyviajam eksperimentui, t.y., kai procesas vyksta natūraliai, dirbtinai nekeičiant tiriamojo objekto įėjimo parametrų x , o tik pasyviai fiksuojant x ir jį atitinkančias y reikšmes.

Atliekant matavimus buvo fiksuojami tokie dydžiai:

- asfaltbetonio dangos tampros modulis E , MPa,
- vertikalusis poslinkis r , mm,
- liekamosios deformacijos d , mm,
- provėžų gylis PG , mm.

Suskaičiuotos charakteristikos:

- asfaltbetonio klampumas η , MPa×s.

Tampros modulis – medžiagos tampriosios jėgos dydis, išreiškiamas įtempimų ir medžiagos deformacijų santykiu.

Vertikalusis poslinkis r yra bandymų štampos nusėdimas dangos paviršiuje, veikiant tam tikrai apkrovai. Šiuo atveju r yra štampos nusėdimas veikiant 0,6 MPa apkrovai.

Deformacija d – liekamoji deformacija nuėmus apkrovą P ir sustojus deformacijos atsikūrimui.

Provėžų gylis PG – tai liekamosios skirtingose bandymų sekcijose deformacijos, susiformavusios nuo automobilių eismo apkrovų.

Asfaltbetonio tampros modulis, vertikalieji poslinkiai ir liekamosios deformacijos buvo matuojamos statiniu bandymo štampu [71]. Provėžų gylis buvo išmatuotas 3 m ilgio linijoje [72].

Neapibrėžtys matavimams remiantis normatyviniais dokumentais:

- 1) asfaltbetonio tamprumo moduliui neapibrėžtis $U_E=6,34$ MPa,
- 2) provėžų gylio vieno matavimo neapibrėžtis $U_{PR}=0,1$ mm,
- 3) vertikaliam poslinkiui r ir liekamosioms deformacijoms d neapibrėščių reikšmės yra:

$U_r=0,005$ mm ir $U_d=0,005$ mm.

Asfaltbetonio dangos tampros modulio bandymų skaičius buvo apskaičiuotas remiantis specialia metodika [73, 74], kuri įvertina jau anksčiau atliktų tokio pobūdžio matavimų statistinius parametrus ir nustatyta, kad kiekvienoje eksperimentinėje sekcijoje būtina atlikti ne mažiau kaip 10 tampros modulio matavimų, taigi bandymo vietose tai ir buvo padaryta.

Siekiant nustatyti asfaltbetonio klampumą, bandomasis ruožas buvo apkrautas pastoviaja apkrova ir vienodais laiko tarpais buvo matuojamas deformacijos prieaugis. Kai deformacijos didėjimas stabilizavosi, matavimai buvo sustabdyti. Gautieji eksperimentinių tyrimų rezultatai panaudoti tokiai formulei:

$$\eta_0 = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \sigma(t) dt}{\Delta \varepsilon(t_0, t_1)}, \quad (3.1)$$

čia: σ – pastovieji įtempiai, veikiantys asfaltbetonio dangą, t_0, t_1 – apkrovos veikimo laikas kol stabilizuojasi deformacijos prieaugis, ε – deformacija laiko periodu nuo t_0 iki t_1 .



3.9 pav. Bandymų ruože atliekami tyrimai: a – paruošiamieji darbai, b – tampros modulio matavimai, c – provėžų gylio matavimai

Vertikalieji poslinkiai ir liekamosios deformacijos buvo matuojami kiekvienoje bandymų ruožo sekcijoje po 5 kartus atsitiktinai pasirinktose vietose (3.9 pav.).

Galutiniai eksperimentinių tyrimų rezultatai bus šie: priklausomybės tarp tampros modulio E ir asfaltbetonio klampumo η reikšmių atskirose sekcijose, susiformavusių provėžų gylio priklausomybė nuo armuojančios medžiagos bei tampros modulio ir dangos konstrukcijos laikomosios galios priklausomybė nuo armavimo.

3.3. Eksperimentinių duomenų analizė

Atlikus matavimus, gautieji duomenys buvo apdoroti taikant statistinės analizės metodus. Duomenų apdorojimui naudoti statistiniai paketai SPSS ir Statgraphics. Pirmuoju etapu ištirta, ar

gautieji duomenys pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį. Priklausomai nuo to pasirenkami tolimesni testai. Nustatant pasiskirstymo skirstinį formuojamos tokios hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : \text{Imties kintamieji išsidėstę pagal normalųjį skirstinį,} \\ H_1 : \text{Imties kintamieji išsidėstę pagal kitą skirstinį.} \end{cases}$$

Minėtoms statistinėms hipotezėms patikrinti darbe panaudotas Smirnov – Kolmogorovo testas. Šio testo esmė yra tokia: bandymo metu gautųjų duomenų skirstinys yra lyginamas su teoriniu skirstiniu. Šis testas apskaičiuoja didžiausius skirtumus tarp išmatuotų kintamųjų parametrų ir teorinių skirstinių parametrų. Jei tikrinama hipotezė apie normalųjį skirstinį, naudojamas imties vidurkis ir standartinis nuokrypis.

Testo pabaigoje suskaičiuojama p – reikšmė, kuri ir parodo ar tyrimų metu gautieji duomenys pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį. Jeigu p – reikšmė yra mažesnė nei 0,05, tai galima teigti, kad imties pasiskirstymas neatitinka normaliojo skirstinio.

Testo rezultatų p reikšmės pateiktos 3.4 lentelėje.

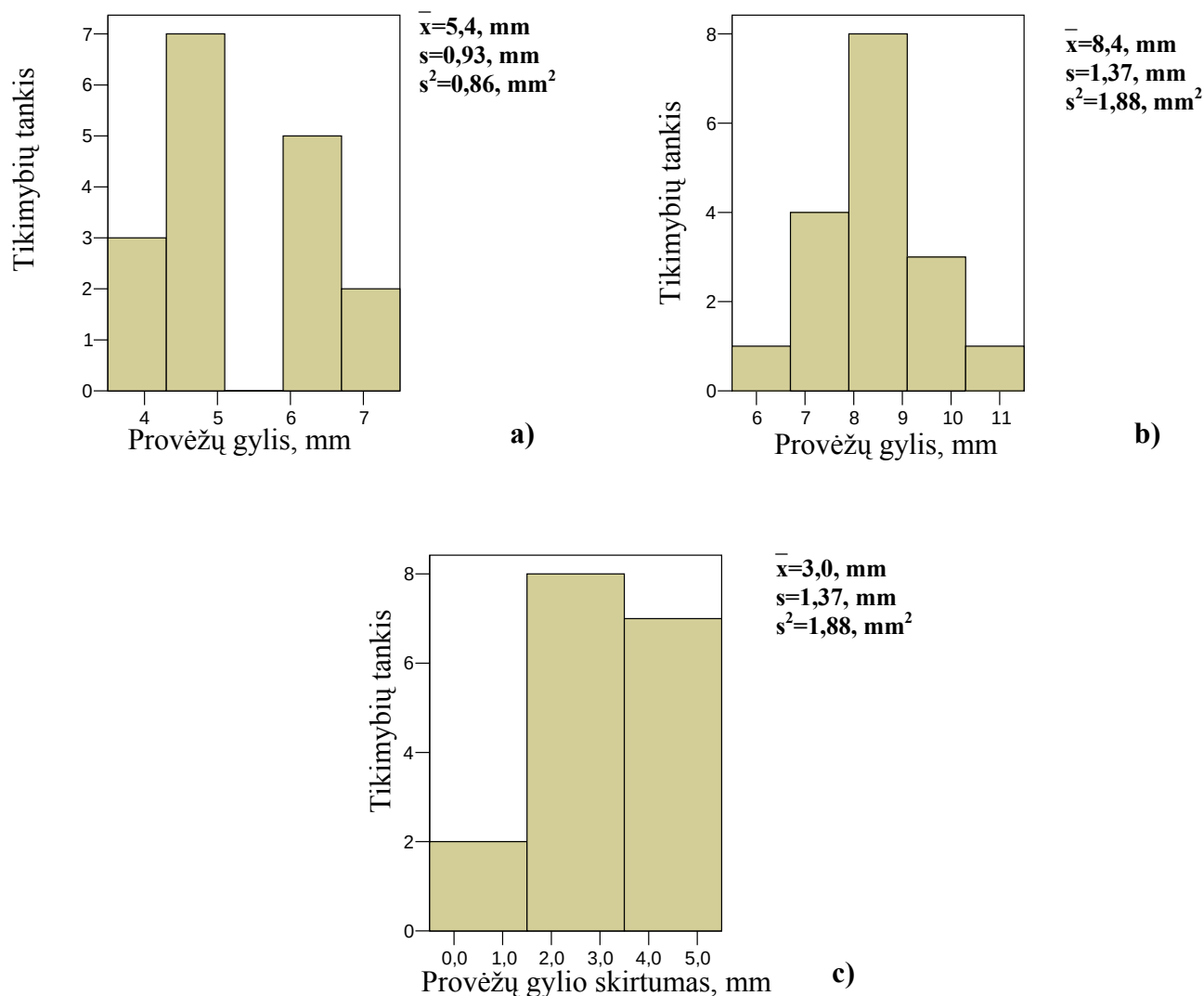
3.4 lentelė. p reikšmių suvestinė lentelė atskiroms imtims

Geosintetinė medžiaga	Provėžų gylis po pirmojo matavimo	Provėžų gylis po antrojo matavimo	Provėžų gylio skirtumas	Tampros modulis
–	0,301	0,570	0,646	0,152
GT1	0,134	0,456	0,100	0,977
GT2	0,863	0,354	0,137	0,590
GT3	0,196	0,284	0,020	0,980
GT4	0,109	0,288	0,536	0,928
GT5	0,064	0,502	0,776	0,951
GT6	0,285	0,215	0,463	0,981

Remiantis gautaisiais testo rezultatais, galima teigti, kad tik vienintelė imtis neatitinka normaliojo skirstinio.

Gautieji rezultatai parodo, kad nulinės hipotezės atmesti negalima. Tačiau duomenų kiekis yra mažas, kad būtų galima užtikrintai teigti, jog pasiskirstymas yra normalusis. Todėl atliekant statistinę analizę, bus atliekami testai, nagrinėjantys tiek normaliojo pasiskirstymo, tiek kitokio pasiskirstymo tendencijas.

Pagrindinės imčių charakteristikos pateiktos 3.10 paveiksle ir 1 priede.



3.10 pav. Provėžų gylis pasiskirstymas kontroliniame bandymų ruože: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų

čia: $\bar{x}$ – imties vidurkis, s – standartinis nuokrypis, s^2 – dispersija.

Kitas statistinės analizės etapas yra nustatyti, ar po karštojo sezono susiformavusios provėžos skiriasi nuo provėžų gylis, susiformavusio po šaltojo sezono, t.y. ar vasaros metu susiformavusių provėžų gylis yra reikšmingas. Tuo tikslu formuojamos statistinės hipotezės, jei priimama, kad duomenys pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį:

$$\begin{cases} H_0: \bar{x}_X = \bar{x}_Y, \\ H_1: \bar{x}_X \neq \bar{x}_Y. \end{cases}$$

Minėtoms hipotezėms tikrinti panaudotas t testas priklausomoms imtims.

H_0 atmetama, jeigu $|t| > t_{\alpha/2}(n-1)$, $t_{\alpha/2}(n-1)$ – yra Stjudento skirstinio su $(n-1)$ laisvės laipsnių $\alpha/2$ lygmens kritinė reikšmė. Jeigu $|t| \leq t_{\alpha/2}(n-1)$, hipotezė H_0 neatmetama. α – reikšmingumo lygmuo, kuris esamu atveju yra lygus 0,05. t ir p reikšmės pateiktos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Parametrų t ir p reikšmės

Dydis	PR _{1K} [–] –PR _{2K}	PR _{1GT1} [–] –PR _{2GT1}	PR _{1GT2} [–] –PR _{2GT2}	PR _{1GT3} [–] –PR _{2GT3}	PR _{1GT4} [–] –PR _{2GT4}	PR _{1GT5} [–] –PR _{2GT5}	PR _{1GT6} [–] –PR _{2GT6}
t	-9,033	-5,870	-5,264	-2,606	-3,878	-5,653	-5,508
p	0,000	0,000	0,000	0,021	0,001	0,000	0,000

Kadangi gaunama, jog visais atvejais $p < \alpha/2$, t.y. $p < 0,025$, o $t_{\alpha/2} = 1,99 < |t|$, tai priimama, kad provėžų gyliai tarpusavyje skiriasi.

Kadangi duomenų kiekis yra nepakankamas, tai papildomai atliekamas Vilkoksono ženklų kriterijaus testas dviem priklausomoms imtims. Formuojamos hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : \text{Provėžų gyliai po pirmojo ir atrojo matavimų yra vienodi,} \\ H_1 : \text{Provėžų gyliai po pirmojo ir atrojo matavimų nėra vienodi.} \end{cases}$$

H_0 atmetama, jeigu $|Z| > z_\alpha$, z_α – kritinis reikšmingumo lygmuo, parenkamas pagal lenteles [75]. Šiuo atveju jis yra: $z_\alpha = 1,96$. Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad bet kuri $|Z| > z_\alpha$. Z ir p reikšmės pateiktos 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Z ir p dydžių reikšmių lentelė

Dydis	PR _{1K} [–] –PR _{2K}	PR _{1GT1} [–] –PR _{2GT1}	PR _{1GT2} [–] –PR _{2GT2}	PR _{1GT3} [–] –PR _{2GT3}	PR _{1GT4} [–] –PR _{2GT4}	PR _{1GT5} [–] –PR _{2GT5}	PR _{1GT6} [–] –PR _{2GT6}
Z	-3,176	-2,972	-2,242	-2,721	-3,209	3,293	-3,541
p	0,001	0,003	0,025	0,007	0,001	0,001	0,000

Statistika $p \leq 0,05$ (visos reikšmės mažesnės už reikšmingumo lygmenį). Todėl hipotezę H_0 galima atmesti. Vadinasi, galima teigti, kad visuose ruožuose karštuoju metų periodu susiformavusios provėžų gylis yra reikšmingas. Tai parodo ir t testo, ir Vilkoksono testo rezultatai.

Kitas analizės etapas yra nustatyti, ar geosintetinės medžiagos turi įtakos provėžoms, susiformavusioms skirtinguose ruožuose ir dangos tampros moduliui. Tuo tikslu reikia palyginti atskiras imtis ir nustatyti, ar jos tarpusavyje skiriasi. Parametras, kuris apsprendžia ar yra skirtumas tarp atskirų imčių vidurkių, yra statistika F . Ji surandama taikant ANOVA (ANalysis Of VAriance) metodą [75].

Formuojamos hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_3 = \bar{x}_4 = \bar{x}_5 = \bar{x}_6 = \bar{x}_7, \\ H_1 : \text{Bent du vidurkiai skiriasi.} \end{cases}$$

Gautoji F statistika yra lyginama su Fišerio skirstinio kritine reikšme $F_\alpha(m,n)$. Ši reikšmė $F(6,98) = 2,2$ [75]. Ši reikšmė yra mažesnė už visas F reikšmes, todėl galima teigti, kad skirtumas

tarp atskirų imčių egzistuoja.

Testo rezultatai pateikti žemiau esančioje lentelėje.

3.7 lentelė. ANOVA rezultatų suvestinė

Parametras		Kvadratų suma	Laisvės laipsniai	Dispersijos įverčiai	Statistika F
PG ₁	Grupių	117,53	6	19,559	6,244
	Vidinė	300,705	96	3,132	
	Visa	418,058	102		
PG ₂	Grupių	109,375	6	18,229	11,195
	Vidinė	156,314	96	1,628	
	Visa	265,689	102		
ΔPG	Grupių	34,645	6	5,774	3,798
	Vidinė	145,957	96	1,520	
	Visa	180,602	102		
E	Grupių	142093,483	6	23682,247	46,699
	Vidinė	49697,903	98	507,121	
	Visa	191791,386	104		

Kadangi nėra aišku ar imčių kintamieji pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, o be to imtys nėra pakankamai didelės, todėl naudojami neparametriniai kriterijai. Kruskalo-Voliso testas nustato ar egzistuoja skirtumas tarp atskirų imčių. Formuojamos hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : \text{kintamųjų skirstiniai yra vienodi,} \\ H_1 : \text{kintamųjų skirstiniai nėra vienodi.} \end{cases}$$

Kintamųjų skirstiniai yra vienodi, jeigu reikšmingumo lygmuo $\alpha > p$. p – reikšmė, gauta atlikus Kruskalo-Voliso testą. Jeigu $\alpha \leq p$, tai priimama, kad skirstiniai yra skirtingi. Šiuo atveju $\alpha = 0,05$, p reikšmės pateiktos 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. p reikšmės dydžiai

	PG ₁	PG ₂	ΔPG	E
p reikšmės dydžiai	0,000	0,000	0,004	0,000

Tiek ANOVA, tiek Kruskalo-Voliso testas parodo, kad egzistuoja skirtumas tarp atskirų imčių, tačiau iš šios analizės neaišku, tarp kurių grupių yra skirtumas, o tarp kurių nėra. Tuo tikslu atliekamas daugialypis palyginimas, taikant tą patį ANOVA ir Mano-Vitnio testus.

Formuojamos statistinės hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : X_i \text{ ir } Y_i \text{ skirstiniai yra vienodi,} \\ H_1 : X_i \text{ ir } Y_i \text{ skirstiniai yra vienodi.} \end{cases}$$

ANOVA testo rezultatai pateikti 1 priede.

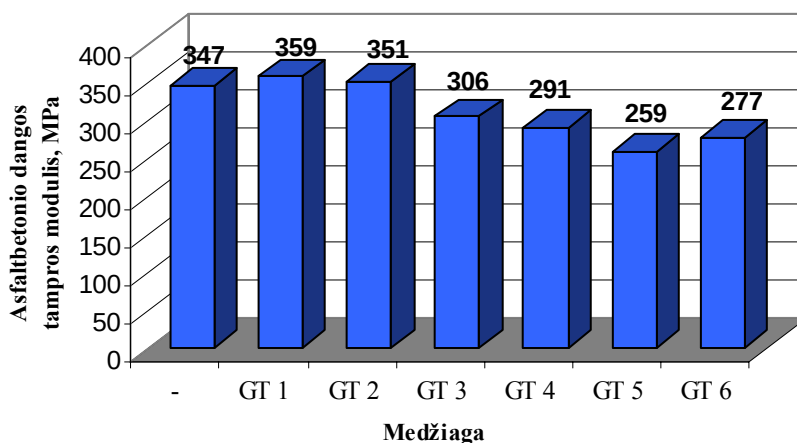
Šis testas naudoja tris kriterijus: Tjukio HSD, LSD, Bonferonio. Kadangi imtys nedidelės šiuo atveju tikslinga atlikti ir neparametrinius testus. Vienas iš tokių yra Mano-Vitnio testas. 3.9 lentelėje pateikti šio testo rezultatai.

3.9 lentelė. p reikšmės, atlikus Mano-Vitnio testą

Sugretinimas	PG_1	PG_2	ΔPG	E
K – GT1	0,744	0,050	0,010	0,074
K – GT2	0,290	0,112	0,561	0,174
K – GT3	0,010	0,539	0,001	0,000
K – GT4	0,030	0,367	0,137	0,000
K – GT5	0,000	0,021	0,056	0,000
K – GT6	0,000	0,002	0,033	0,000
GT1 – GT2	0,018	0,006	0,020	0,250
GT1 – GT3	0,000	0,037	0,345	0,000
GT1 – GT4	0,010	0,000	0,106	0,000
GT1 – GT5	0,000	0,000	0,233	0,000
GT1 – GT6	0,000	0,000	0,252	0,000
GT2 – GT3	0,880	0,063	0,010	0,000
GT2 – GT4	0,780	0,217	0,425	0,000
GT2 – GT5	0,123	0,519	0,252	0,000
GT2 – GT6	0,011	0,734	0,194	0,000
GT3 – GT4	0,461	0,106	0,023	0,003
GT3 – GT5	0,074	0,003	0,106	0,000
GT3 – GT6	0,008	0,000	0,112	0,000
GT4 – GT5	0,015	0,174	0,653	0,000
GT4 – GT6	0,003	0,006	0,591	0,023
GT5 – GT6	0,123	0,112	0,880	0,005

Pastaba: juodai pažymėtos reikšmės parodo statistinį skirtumą.

Remiantis šio testo rezultatais, imtys vienodos, jeigu $p > \alpha$, ir nevienodos, jeigu $p \leq \alpha$. Reikšmingumo lygmuo $\alpha = 0,05$.

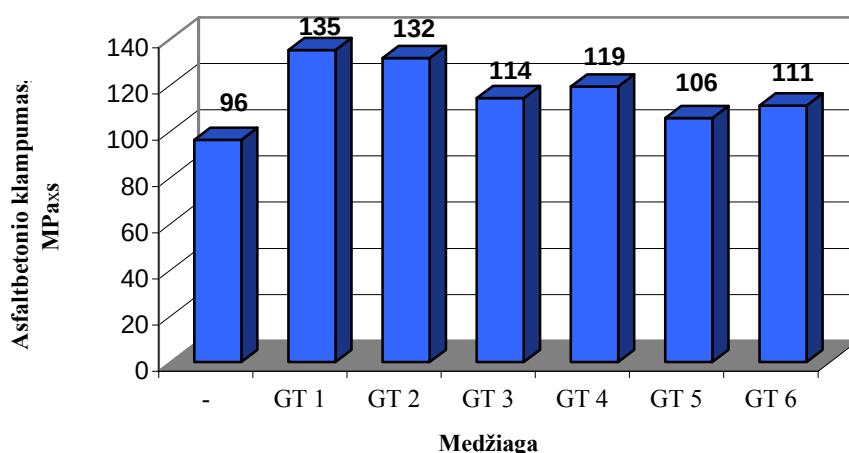


3.11 pav. Asfaltbetonio dangos tampros modulio priklausomybė nuo panaudotos geosintetinės medžiagos

Atliekant duomenų analizę, buvo nustatyta, kaip geosintetinės medžiagos veikia asfaltbetonio dangos tampros modulį. Ši priklausomybė pateikta 3.11 paveiksle.

Iš duomenų analizės matyti, kad geosintetinės medžiagos tampros moduliui turi įtakos. Visgi tam tikrais atvejais tampros modulis yra mažesnis nei armuotoje sekcijoje. Be to, mažesnis tampros modulis yra visose sekcijose, kuriose panaudotos geotekstilės ir vienoje sekcijoje su geotinklu.

Visai kitokia situacija nagrinėjant asfaltbetonio klampumo tyrimo rezultatus. Toliau esančiame paveiksle pateikti asfaltbetonio klampumo skirtingose bandymų sekcijose pokyčiai.



3.12 pav. Asfaltbetonio klampumo priklausomybė nuo panaudotos geosintetinės medžiagos tipo

Asfaltbetonio klampumas buvo apskaičiuotas remiantis gautais matavimų duomenų vidurkiais. Klampumo skaičiavimo duomenys neapdoroti statistiškai. Asfaltbetonio klampumo ir dangos tampros reikšmės pateiktos 3.10 lentelėje. Šioje lentelėje pateikti aritmetiniai gautų ir išmatuotų parametrų vidurkiai.

3.10 lentelė. Dangos tampros modulio ir asfaltbetonio klampumo suvestiniai duomenys

Eksperimentinės sekcijos numeris	Geosintetinės medžiagos kodas	Dangos tampros modulis E, MPa	Asfaltbetonio klampumas η , MPa·s
00	-	347	96
01	GT1	359	135
02	GT2	351	132
03	GT3	306	114
04	GT4	291	119
05	GT5	259	106
06	GT6	277	111

Naudojantis šiais dydžiais bus atliekama tolesnė statistinė analizė. Iš pateiktų 3.11 ir 3.12 paveikslų matyti, kad geosintetinių medžiagų įtaka asfaltbetonio klampumui yra gana ženkli, o klampumas visose armuotose sekcijose yra didesnis nei kontrolinėje sekcijoje.

Dėl mažo tyrimų rezultatų skaičiaus statistiniai testai su asfaltbetonio klampumu atlikti nebuvo. Asfaltbetonio klampumas buvo apskaičiuotas remiantis trimis matavimais, tačiau atlikti matavimai tarpusavyje buvo identiški.

3.11 lentelė. Skirtumų tarp atskirų imčių suvestinė lentelė

Sugretinimas	Skirtumas tarp atskirų imčių			
	PG_1	PG_2	ΔPG	E
K – GT1	-/-	+/+	+/+	-/-
K – GT2	-/-	-/-	-/-	-/-
K – GT3	+/+	-/-	+/+	+/+
K – GT4	+/+	-/-	-/-	+/+
K – GT5	+/+	-/+	-/-	+/+
K – GT6	+/+	-/+	-/+	+/+
GT1 – GT2	-/+	+/+	-/+	-/-
GT1 – GT3	+/+	-/+	-/-	+/+
GT1 – GT4	+/+	+/+	-/-	+/+
GT1 – GT5	+/+	+/+	-/-	+/+
GT1 – GT6	+/+	+/+	-/-	+/+
GT2 – GT3	-/-	-/-	+/+	+/+
GT2 – GT4	-/-	-/-	-/-	+/+
GT2 – GT5	-/-	-/-	-/-	+/+
GT2 – GT6	-/+	-/-	-/-	+/+
GT3 – GT4	-/-	-/-	-/+	-/+
GT3 – GT5	+/+	-/+	-/-	+/+
GT3 – GT6	-/+	+/+	-/-	+/+
GT4 – GT5	-/+	-/-	-/-	-/+
GT4 – GT6	+/+	-/+	-/-	-/+
GT5 – GT6	-/-	-/-	-/-	-/+

Pastaba: „+“ reiškia, kad egzistuoja skirtumas tarp atskirų imčių, „-“ reiškia, jog nėra skirtumo tarp atskirų imčių.

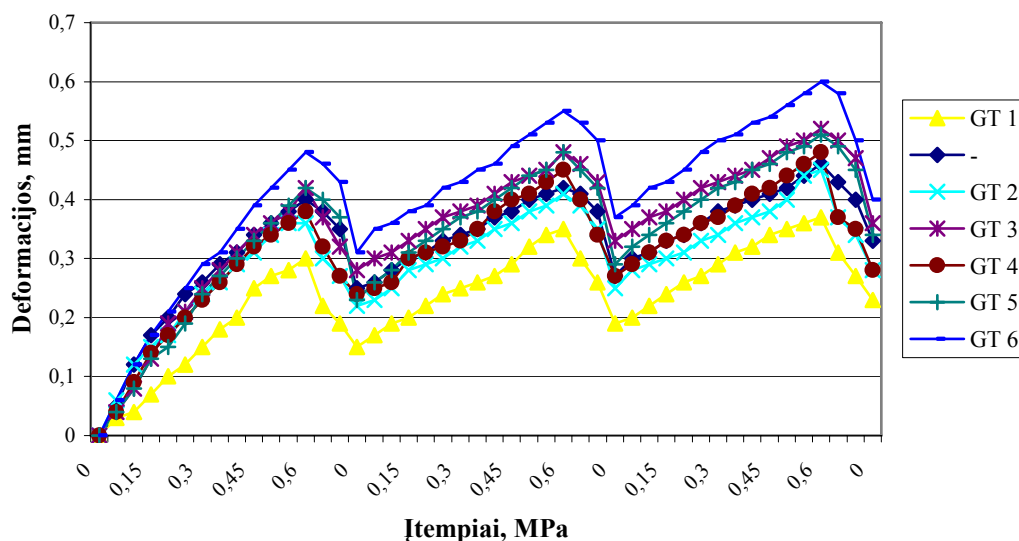
3.11 lentelėje pateikti duomenys, rodantys ar egzistuoja skirtumas tarp atskirų imčių taikant parametrinius ir neparametrinius imčių lyginimo metodus. Pirmasis ženklas byloja apie skirtumo buvimą ar nebuvimą taikant parametrinius metodus, antrasis ženklas byloja apie skirtumo buvimą ar nebuvimą taikant neparametrinius metodus.

Nors parametų vidutinės reikšmės skiriasi atskiruose ruožuose, tačiau kaip rodo statistinė analizė, kai kuriuose ruožuose reikšmingo skirtumo nėra.

Tyrimų metu buvo nustatyta ir asfaltbetonio dangos laikomoji galia. Deformacijos buvo matuojamos asfaltbetonio dangą veikiant skirtingoms apkrovoms. Asfaltbetonio dangos laikomoji galia pateikta 3.13 paveiksle.

Iš pateiktų duomenų aiškiai matyti, kad geosintetinės medžiagos turi įtakos asfaltbetonio dangų laikomajai galiai.

Gautieji duomenys yra labai panašūs į asfaltbetonio dangos tampros tyrimus.



3.13 pav. Asfaltbetonio dangos laikomoji galia skirtingose bandymo sekcijose

Kai kuriuose ruožuose vertikalieji sėdimai yra mažesni nei kontroliniame, o kai kuriuose ruožuose atvirkščiai. Taigi galima teigti, kad ne visos medžiagos teigiamai veikia asfaltbetonio dangų laikomąją galią.

Kitas duomenų analizės etapas yra nustatyti, kurių iš minėtųjų parametrų – dangos tampros modulio ar asfaltbetonio klampumo – įtaka yra didesnė deformacijoms asfaltbetonio dangoje. Tam tikslui taikomas metodas yra regresinė analizė.

Taikant regresines priklausomybes siekiama nustatyti, kurio kintamojo įtaka tiriamajam dydžiui yra didžiausia. Regresinės analizės modelis aprašomas lygtimi:

$$y_n = a + b x_n + \varepsilon_n, \quad (3.2)$$

čia: b – nežinomas koeficientas, įvertinantis priklausomybę tarp tiriamųjų dydžių,
 ε – populiacijos paklaida.

Regresinio modelio sudarymo principai:

- 1) atliekami matavimai, sukaupiami duomenys,
- 2) apskaičiuojami regresijos koeficientai,
- 3) patikrinamas regresijos koeficientų reikšmingumas.

Statistinės analizės parametras, nusakantis, kiek patikimos regresinės priklausomybės, yra

determinacijos koeficientas R^2 . Determinacijos koeficientas atspindi, koku dydžiu kintamųjų galima paaiškinti ieškomojo dydžio pokyčius, remiantis pasirinktuoju modeliu [76, 77]. Jis yra lygus koreliacijos koeficiento kvadratu ir parodo, kiek procentų nagrinėjamojo veiksnio išsibastymo paaiškina regresijos lygtis ir apskaičiuojamas taip:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.4)$$

čia: y_i – išmatuota ieškomojo dydžio reikšmė, $\hat{y}_i$ – numatoma ieškomojo dydžio reikšmė pagal pasirinktą modelį.

Tačiau praktikoje yra naudojamas pataisytais determinacijos koeficientas. Šis koeficientas įvertina vienodą reikšmę turinčių kintamųjų skaičių pasirinktajame modelyje. Jis yra mažesnis nei paprastasis determinacijos koeficientas ir apskaičiuojamas taip:

$$R_{pat}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.5)$$

čia: y_i – išmatuota ieškomojo dydžio reikšmė, $\hat{y}_i$ – numatoma ieškomojo dydžio reikšmė pagal pasirinktą modelį, p – vienodą reikšmę turinčių kintamųjų skaičius modelyje, n – kintamųjų skaičius.

Nustatomas dydis kinta nuo 0 iki 1. Kuo reikšmė artimesnė 1, tuo regresinė kreivė tiksliau atspindi tyrimų duomenis. Praktiškai taikant tiesinę regresiją laikoma, kad modelis tinka, jeigu determinacijos koeficientas didesnis nei 0,25 [75].

Regresinės analizės metu yra parenkami ir suskaičiuojami tokie dydžiai:

- 1) regresinis modelis,
- 2) koreliacijos koeficientas k_{kr} ,
- 3) determinacijos koeficientas R^2 ,
- 4) statistika p .

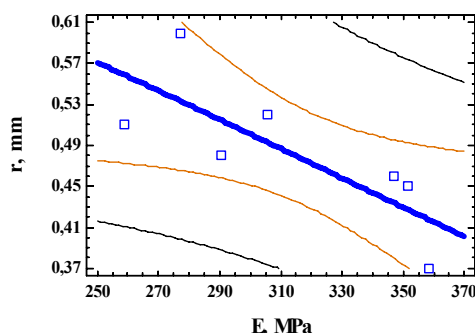
Tam kad nustatyti, ar gautasis regresinis modelis yra tinkamas, naudojama statistika p . Ši statistika atspindi, ar regresinio modelio aiškinantysis b turi įtakos kintamiesiems.

Formuojamos hipotezės:

$$\begin{cases} H_0 : b=0, \\ H_1 : b \neq 0. \end{cases}$$

Jeigu $b=0$, tai laikoma, kad minėtasis aiškinantysis neturi įtakos kintamiesiems, todėl jį galima pašalinti iš regresinio modelio. Tokiu atveju, modelis praranda savo prasmę. Jeigu $b \neq 0$, tai šio koeficiento įtaka yra ženkli ir šis modelis gali būti taikomas paaiškinant kintamuosius. Hipotezė H_0 atmetama jei statistika $p < \alpha$, α – pasirinktasis reikšmingumo lygmuo, kuris yra lygus 0,05.

Iš pradžių buvo nustatyta, kaip asfaltbetonio klampumas ir dangos tampra įtakoja vertikaliuosius bandymų štampos nusėdimus. Duomenų analizei buvo naudojami vertikalieji bandymų štampos nusėdimai veikiant 0,6 MPa įtempiams po trečiojo apkrovos ciklo.



3.14 pav. Vertikalaus nusėdimo priklausomybė nuo dangos tampros modulio

3.14 paveiksle pateikta regresinė priklausomybė tarp dangos tampros modulio ir bandymų štampos nusėdimo.

Taikomas regresinis modelis:

$$Y = \exp(a + b \times X^2).$$

Statistiniai parametrai: $k_{kr} = -0,789$, $R^2 = 0,62$, $R^2_{pat} = 0,55$, $p=0,035$.

Matematinė regresinio modelio išraiška: $r = \exp(-0,263 - 0,00000475 \times E^2)$.

Regresinis modelis pasirenkamas iš kelių modelių, remiantis aukščiausia R^2 reikšme. Toliau pateiktoje lentelėje pavaizduoti modeliai, kurie gaunami atliekant statistinę analizę.

Iš visų gautų regresinių modelių pasirenkamas toks modelis, kuris geriausiai atspindi priklausomybę tarp kintamojo ir pastovaus dydžio [78]. Pagrindinis kriterijus, kuriuo remiantis pasirenkamas modelis, yra determinacijos koeficientas. Pasirenkamas toks regresinis modelis, kurio minėtasis koeficientas turi didžiausią reikšmę.

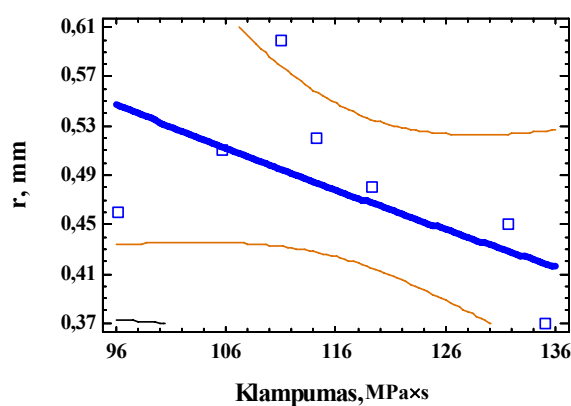
3.12 lentelė. Statistinės analizės metu gauti regresiniai modeliai

Eil. Nr.	Modelio parametrai	Eil. Nr.	Modelio parametrai
1.	$Y = \exp(a + b \times X^2)$ $k_{kr} = -0,789$ $R^2 = 0,62$ $r = \exp(-0,263 - 0,00000475 \times E^2)$	2.	$Y = (a + b \times X^2)^2$ $k_{kr} = -0,787$ $R^2 = 0,62$ $r = (0,856 - 0,00000163 \times E^2)^2$
3.	$Y = 1/(a + b \times X^2)$ $k_{kr} = 0,786$ $R^2 = 0,62$ $r = 1/(1,0917 + 0,0000102 \times E^2)$	4.	$Y = a + b \times X^2$ $k_{kr} = -0,783$ $R^2 = 0,61$ $r = 0,707 - 0,00000224 \times E^2$
5.	$Y = \exp(a + b \times X)$ $k_{kr} = -0,777$ $R^2 = 0,6$ $r = \exp(0,178 - 0,00292 \times E)$	6.	$Y = (a + b \times X)^2$ $k_{kr} = -0,776$ $R^2 = 0,6$ $r = (1,00736 - 0,001 \times E)^2$
7.	$Y = 1/(a + b \times X)$ $k_{kr} = 0,774$ $R^2 = 0,59$ $r = 1/(0,141 + 0,00627 \times E)$	8.	$Y = a + b \times X$ $k_{kr} = -0,772$ $R^2 = 0,59$ $r = 0,915 - 0,00138 \times E$
9.	$Y = \text{normal}(a + b \times \ln(X))$ $k_{kr} = -0,771$ $R^2 = 0,59$ $r = \text{normal}(1,053 - 0,0035 \times \ln(E))$	10.	$Y = \exp(a + b \times X)/(1 + \exp(a + b \times X))$ $k_{kr} = -0,77$ $R^2 = 0,594$ $r = \exp(1,686 - 0,0056 \times E)/(1 + \exp(1,686 - 0,0056 \times E))$
11.	$Y = \exp(a + b \times \sqrt{X})$ $k_{kr} = -0,77$ $R^2 = 0,594$ $r = \exp(1,065 - 0,102 \times \sqrt{E})$	12.	$Y = (a + b \times \sqrt{X})^2$ $k_{kr} = -0,769$ $R^2 = 0,592$ $r = (1,311 - 0,035 \times \sqrt{E})^2$
13.	$Y = \sqrt{a + b \times X^2}$ $k_{kr} = -0,769$ $R^2 = 0,591$ $r = \sqrt{0,451 - 0,00000214 \times E^2}$	14.	$Y = 1/(a + b \times \sqrt{X})$ $k_{kr} = 0,767$ $R^2 = 0,588$ $r = 1/(-1,76 + 0,219 \times \sqrt{E})$
15.	$Y = a + b \times \sqrt{X}$ $k_{kr} = -0,766$ $R^2 = 0,586$ $r = 1,334 - 0,0481 \times \sqrt{E}$	16.	$Y = a \times X^b$ $k_{kr} = -0,763$ $R^2 = 0,583$ $r = \exp(4,358 - 0,887 \times \ln(E))$

3.6 lentelės tęsinys

17.	$Y = (a + b \times \ln(X))^2$ $k_{kr} = -0,762$ $R^2 = 0,581$ $r = (2,441 - 0,304 \times \ln(E))^2$	18.	$Y = 1/(a + b \times \ln(X))$ $k_{kr} = 0,759$ $R^2 = 0,577$ $r = 1/(-8,827 + 1,905 \times \ln(E))$
19.	$Y = a + b \times \ln(X)$ $k_{kr} = -0,759$ $R^2 = 0,576$ $r = 2,89 - 0,419 \times \ln(E)$	20.	$Y = \sqrt{a + b \times X}$ $k_{kr} = -0,759$ $R^2 = 0,575$ $r = \sqrt{0,652 - 0,00132 \times E}$

Nustatant, kaip asfaltbetonio klampumas veikia minėtąsias deformacijas, gaunamos priklausomybės, pavaizduotos 3.15 paveiksle.



3.15 pav. Vertikalaus nusėdimo priklausomybė nuo asfaltbetonio klampumo

Taikomas regresinis modelis:

$$Y = 1/(a + b \times X^2).$$

Statistiniai parametrai: $k_{kr} = 0,76$, $R^2 = 0,578$, $R^2_{pat} = 0,494$, $p = 0,05$.

Matematinė regresinio modelio išraiška: $r = 1/(1,309 + 0,0000933 \times \eta^2)$.

Iš regresinių priklausomybių ir iš determinacijos koeficiento matyti, kad dangos tampros modulio įtaka vertikaliesiems bandymo štampos sėdimams yra didesnė nei asfaltbetonio klampumo. Norint detaliau ištirti, kuris iš parametrų daugiau veikia minėtąsias deformacijas, naudojamas daugialypės regresijos metodas.

Taikomas regresinis modelis, įvertinantis abiejų faktorių įtaką:

$$r = 0,998 - 0,00119 \times E - 0,00122 \times \eta.$$

Statistiniai parametrai: $R^2 = 0,641$.

Nustatant, kurio kintamojo įtaka nagrinėjamam dydžiui yra didesnė, tenka remtis papildomais parametrais, pateiktais 3.13 lentelėje.

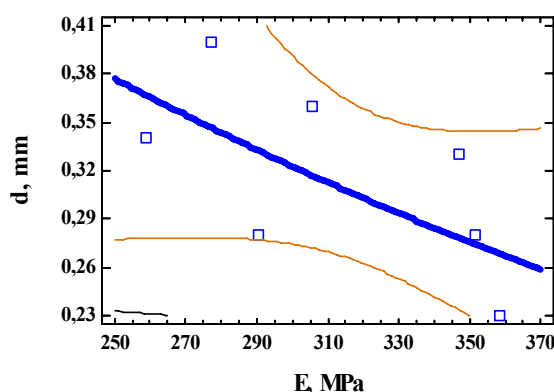
3.13 lentelė. Regresinio modelio statistiniai parametrai

Kintamasis	p reikšmės dydis
Tampros modulis	0,0615
Asfaltbetonio klampumas	0,5153

Iš 3.13 lentelėje pateiktų duomenų matyti, asfaltbetonio klampumo p reikšmė yra didesnė nei tampros modulio ir ženkliai didesnė nei 0,05 (p reikšmė $\leq 0,05$ parodo stiprų kintamojo ir nagrinėjamojo dydžių ryšį). Remiantis minėtosiomis reikšmėmis galima teigti, kad bandymų štampos vertikaliosioms deformacijoms didesnės įtakos turi tampros modulis. Esant tokioms reikšmėms asfaltbetonio klampumą galima iš nagrinėjamojo regresinio modelio išmesti.

Tolesnis tyrimų rezultatų analizės etapas yra nustatyti, kaip tampros modulis ir asfaltbetonio klampumas veikia liekamąsias deformacijas. Liekamosios deformacijos šiuo atveju yra deformacijos, kurios susidarė nuėmus apkrovą ir išmatuotos, kai deformacijų atsikūrimas asfaltbetonio dangoje stabilizavosi. 3.13 paveiksle matyti, kad geosintetinės medžiagos turi įtakos šioms deformacijoms. Su kai kuriomis medžiagomis jos yra mažesnės nei kontrolinėje sekcijoje, tačiau su kai kuriomis medžiagomis didesnės.

Atlikus regresinę analizę, gautos tokios priklausomybės (3.16 pav.).



3.16 pav. Liekamųjų deformacijų priklausomybė nuo asfaltbetonio dangos tampros

Regresinis modelis pasirinktas tokiu pačiu principu, kuris buvo aprašytas anksčiau.

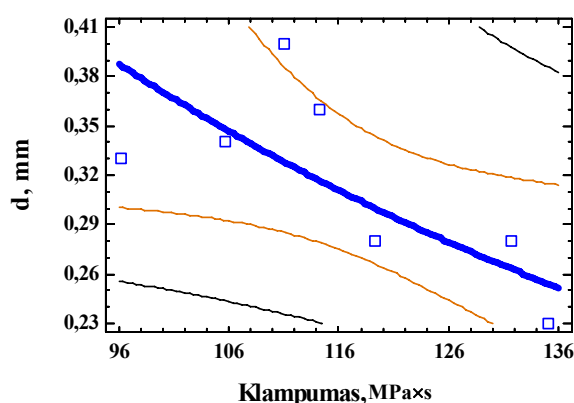
Taikomas regresinis modelis: $Y = 1/(a + b \times X^2)$.

Statistiniai parametrai: $k_{kr} = 0,675$, $R^2 = 0,456$, $R^2_{pat} = 0,301$, $p = 0,117$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $d = 1/(1,198 + 0,0000197 \times E^2)$.

Minėto modelio determinacijos koeficientas yra gana mažas, o $p > 0,05$, todėl šis kintamasis neturi lemiamos įtakos imties kintamiesiems.

Liekamųjų deformacijų priklausomybė nuo asfaltbetonio klampumo pateikta 3.17 paveiksle.



3.17 pav. Liekamųjų deformacijų priklausomybė nuo asfaltbetonio klampumo

Taikomas regresinis modelis: $Y = 1/(a + b \times X^2)$.

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,778$, $R^2=0,605$, $R^2_{pat}=0,526$, $p=0,0395$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $d = 1/(1,192 + 0,00015 \times \eta^2)$.

Šiuo atveju regresinio modelio patikimumas yra didesnis nei regresinio modelio su tampros moduliu. Tai parodo, kad asfaltbetonio klampumas turi didesnės įtakos liekamosioms deformacijoms nei tampros modulis.

Siekiant nustatyti, kuris kintamasis daugiau veikia liekamasias deformacijas, atlikta daugialypė regresinė analizė. Jos modelis yra:

$$d = 0,75 - 0,000576 \times E - 0,00218 \times \eta.$$

Statistiniai parametrai: $R^2=0,62$.

Papildomi statistiniai parametrai (3.14 lentelė) parodo, kad tiek tampros modulio, tiek asfaltbetonio klampumo įtaka liekamosioms deformacijoms asfaltbetonio dangoje yra vienoda. Tačiau tampros modulio įtaka yra didesnė nei klampumo, todėl klampumą galima išmesti iš modelio.

3.14 lentelė. Regresinio modelio statistiniai parametrai

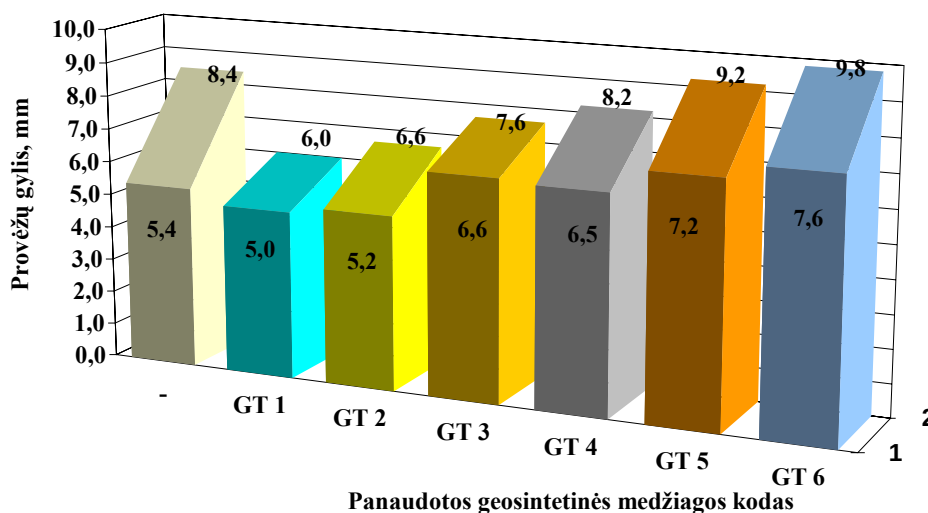
Kintamasis	p reikšmės dydis
Tampros modulis	0,1096
Asfaltbetonio klampumas	0,2026

Nesant didelio skirtumo tarp p reikšmių dydžių, šiuos du parametrus skaičiuojant minėtąsias deformacijas galima naudoti.

Atliekant eksperimentinio bandymo ruožo tyrimus, buvo išmatuoti provėžų gyliai. Pirmasis provėžų gylio matavimas atliktas 2005 m. balandžio mėn., antrasis – kartu su asfaltbetonio tampros modulio matavimais – 2005 m. rugsėjo mėn. Matavimų rezultatai pateikti 3.18 paveiksle.

Analizuojant provėžų gylį pavasarį, matyti, kad provėžų gylis nepriklauso nuo geosintetinės medžiagos. Kai kuriose sekcijose gylis yra mažesnis nei kontrolinėje, o kai kuriose – netgi didesnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad asfaltbetonio dangos funkcionavimas buvo veikiamas žemų temperatūrų, o susidariusios provėžos yra ne šlyties įtemimų pasekmė. Šios provėžos yra susijusios su asfaltbetonio sluoksnio susitankinimu, veikiant automobilių eismo apkrovoms.

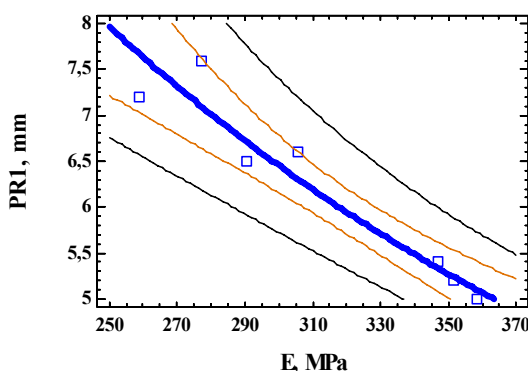
Analizuojant provėžų gylį rudenį, po karštojo sezono, vaizdas yra skirtingas. Pastebima ryški geosintetinių medžiagų minėtoms deformacijoms įtaka. Ypač ryški geosintetinių medžiagų įtaka, jeigu nagrinėtume ne galutinį rezultatą, o provėžų gylį prieaugį karštuoju metų periodu.



3.18 pav. Provėžų gylio matavimai

Pastaba: skaičiai 1 ir 2 atspindi provėžų matavimus pavasarį ir rudenį iš eilės.

Sekcijose su geosintetinėmis medžiagomis provėžų gylio padidėjimas yra nuo 1,3 iki 3 kartų mažesnis nei kontrolinėje sekcijoje. Vadinasi, galima drąsiai teigti, kad geosintetinės medžiagos, kokios jos bebūtų, veikia provėžų formavimąsi karštuoju metų periodu.



3.19 pav. Provėžų gylio po pirmojo matavimo priklausomybė nuo tampros modulio

Siekiant nustatyti, kuris parametras – tampros modulis ar asfaltbetonio klampumas ir kuriuo metų periodu įtakoja provėžų vystimąsi, atlikta regresinė duomenų analizė.

3.19 paveiksle pateikta priklausomybė tarp provėžų, susidariusių šaltuoju metų periodu ir tampros modulio.

Pasirinktas regresinis modelis:

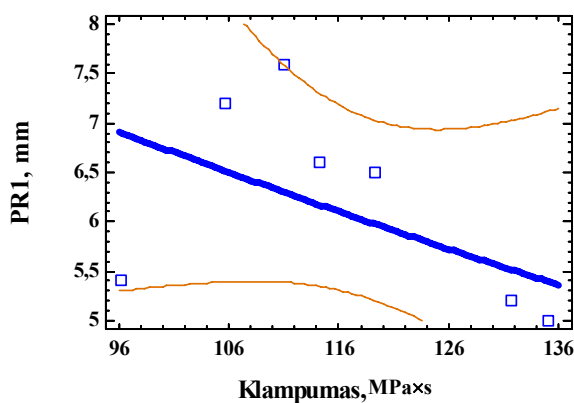
$$Y = 1 / (a + b \times X^2).$$

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,971$, $R^2=0,943$, $R^2_{pat}=0,932$, $p=0,003$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $PR_1 = 1 / (0,0585 + 0,00000107 \times E^2)$.

Gautos išraiškos rodo labai stiprią tarp provėžų gylio po pirmojo matavimo ir tampros modulio statistinę priklausomybę.

Analizuojant, kaip asfaltbetonio klampumas veikia provėžų gylį, susidariusį šaltuoju metų periodu, gaunamos tokios priklausomybės:



3.20 pav. Priklausomybė tarp provėžų gylio po pirmojo matavimo ir asfaltbetonio klampumo

Pasirinktas regresinis modelis:

$$Y = 1 / (a + b \times X^2).$$

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,533$, $R^2=0,285$, $R^2_{pat}=0,141$, $p=0,2176$.

Matematinė regresinio modelio išraiška: $PR_1 = 1 / (0,103 + 0,00000452 \times \eta^2)$.

Iš gautų priklausomybių matyti, kad asfaltbetonio klampumo įtaka šioms deformacijoms yra daug mažesnė nei tampros modulio. Kad būtų galima ištirti, kuris parametras smarkiau veikia susiformavusias deformacijas, taikomas daugialypės regresijos metodas.

Regresinis modelis, įvertinantis abu kintamuosius:

$$PR_1 = 14,191 - 0,0242 \times E - 0,00358 \times \eta.$$

Statistiniai parametrai: $R^2=0,922$.

Gautieji statistiniai parametrai leidžia teigti, jog šis modelis tikslus ir yra tinkamas naudoti skaičiuojant provėžas, susidarančias šaltuoju metų periodu.

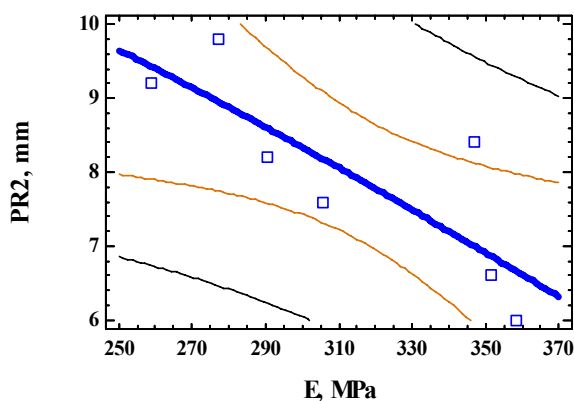
Papildomi statistiniai parametrai (3.15 lentelė) leidžia daryti išvadą, jog asfaltbetonio klampumo įtaka šioms deformacijoms yra labai maža.

3.15 lentelė. Regresinio modelio statistiniai parametrai

Kintamasis	p reikšmės dydis
Tampros modulis	0,0023
Asfaltbetonio klampumas	0,7719

Todėl tolesniems skaičiavimams yra tikslinga iš šio modelio išimti asfaltbetonio klampumą.

Kitame analizės etape analizuojama, kaip tampros modulis ir asfaltbetonio klampumas veikia provėžų gylį, pasibaigus karštajam metų sezonui.



3.21 pav. Priklausomybė tarp provėžų gylio po antrojo matavimo ir tampros modulio

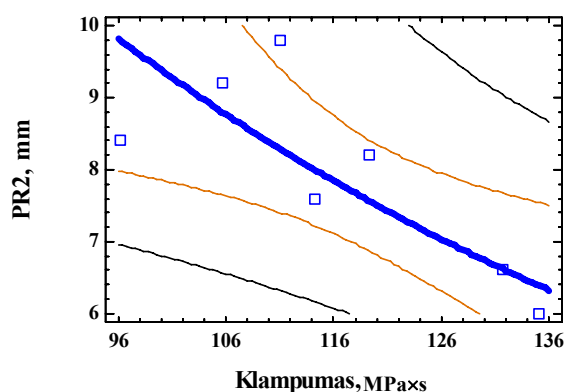
Pasirinktas regresinis modelis: $Y = (a + b \times X^2)^2$.

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,813$, $R^2=0,662$, $R^2_{pat}=0,594$, $p=0,0261$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $PR_2 = (3,605 - 0,00000797 \times E^2)^2$.

Iš gautų analizės duomenų matyti, kad tampros modulio įtaka provėžoms po karštojo metų laikotarpio yra gana didelė, tačiau gerokai mažesnė, lyginant su įtaka provėžoms, susiformavusioms šaltuoju metų periodu.

Asfaltbetonio klampumo įtakos provėžoms po karštojo metų laikotarpio regresinis modelis pavaizduotas 3.22 paveiksle.



3.22 pav. Priklausomybė tarp provėžų gylio po antrojo matavimo ir asfaltbetonio klampumo

Pasirinktas regresinis modelis: $Y = 1/(a + b \times X^2)$.

Statiniai parametrai: $k_{kr}=0,846$, $R^2=0,716$, $R^2_{pat}=0,659$, $p=0,0163$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $PR_2 = 1/(0,0458 + 0,00000607 \times \eta^2)$.

Matyti, kad asfaltbetonio klampumo įtaka provėžų gyliui, susidariusiam po karštojo metų sezono, yra gerokai išaugusi, nei provėžoms iki šio metų periodo.

Daugialypis regresinis modelis, įvertinantis abu kintamuosius:

$$PR_2 = 20,116 - 0,0197 \times E - 0,00514 \times \eta.$$

Statistiniai parametrai: $R^2=0,881$.

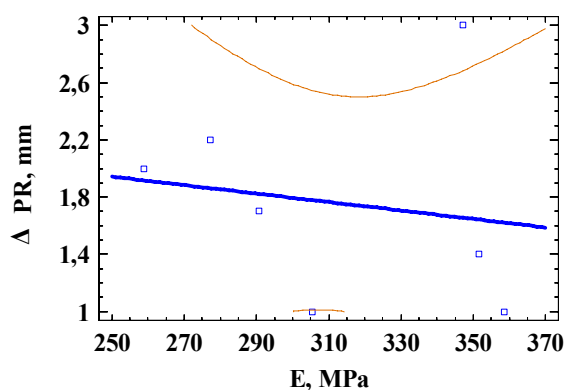
Iš pateiktų statistinių parametų (3.16 lentelė) galima daryti išvadą, kad tampros modulis visgi turi lemiamos įtakos, tačiau asfaltbetonio klampumo įtaka nors ir mažesnė, tačiau gali būti gana didelė. Todėl tolesniems skaičiavimams tikslinga naudoti abu kintamuosius.

3.16 lentelė. Regresinio modelio statistiniai parametrai

Kintamasis	p reikšmės dydis
Tampros modulis	0,0093
Asfaltbetonio klampumas	0,0530

Iš šios priklausomybės nėra pakankamai aišku, kuris kintamasis – tampros modulis ar asfaltbetonio klampumas – turi lemiamos įtakos provėžų karštuoju metų laikotarpiu gyliui. Tam tikslui atlikta provėžų gylio padidėjimo šiuo periodu ir abiejų kintamųjų statistinė analizė.

Pirma buvo nustatyta, kaip tampros modulis veikia provėžų gylio padidėjimą karštuoju metų periodu.



3.23 pav. Priklausomybė tarp provėžų gylio prieaugio karštuoju metų periodu ir tampros modulio

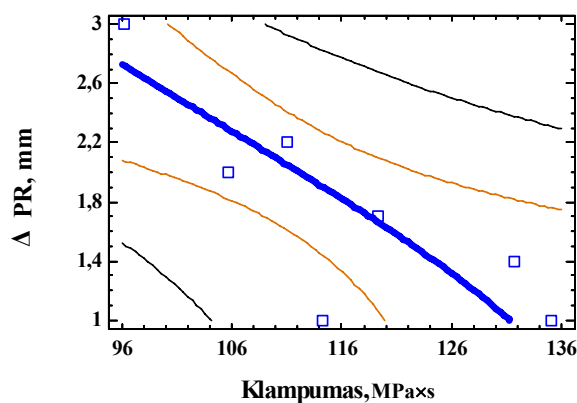
Pasirinktasis regresinis modelis: $Y = 1/(a + b/X)$.

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,358$, $R^2=0,128$, $R^2_{pat}=-0,046$, $p=0,430$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $\Delta PR = 1/(1,384 - 224,695/E)$.

Gautosios statistinės priklausomybės ir statistiniai parametrai leidžia teigti, kad tampros modulio įtaka karštuoju metų periodu yra labai maža.

Atliekant analizę su asfaltbetonio klampumu, gautos tokios priklausomybės (3.24 pav.).



3.24 pav. Priklausomybė tarp provėžų gylio prieaugio karštuoju metų periodu ir asfaltbetonio klampumo

Pasirinktasis regresinis modelis: $Y = SQRT(a + b/X)$.

Statistiniai parametrai: $k_{kr}=0,857$, $R^2=0,735$, $R^2_{pat}=0,682$, $p=0,0137$.

Regresinio modelio matematinė išraiška: $\Delta PR = \sqrt{(-16,604 + 2310,58/\eta)}$.

Šie parametrai rodo, kad asfaltbetonio klampumas yra ta charakteristika, kuri nulemia

provėžų didėjimą tuo metų periodu, kai vyrauja aukštos temperatūros ir dangos temperatūra yra aukšta.

Daugialypis regresinis modelis, įvertinantis abudu kintamuosius:

$$\Delta PR = 5,925 + 0,00446 \times E - 0,0479 \times \eta.$$

Statistiniai parametrai: $R^2=0,709$.

3.17 lentelė. Regresinio modelio statistiniai parametrai

Kintamasis	p reikšmės dydis
Tampros modulis	0,5754
Asfaltbetonio klampumas	0,0375

Gautieji statistiniai parametrai patvirtinta hipotezę, kad karštuojų metų periodu provėžoms lemiamos įtakos daro asfaltbetonio klampumas.

3.4. Išvados

Tyrimų pagrindinės išvados yra šios:

- 1) Geosintetinės medžiagos turi didelę įtaką asfaltbetonio klampumui. Naudojant šias medžiagas asfaltbetonio klampumas yra nuo 1,1 iki 1,4 karto didesnis nei kontrolinėje sekcijoje (3.12 pav.). Asfaltbetonio dangos tampros modulio vidurkio reikšmės yra skirtingos skirtingose sekcijose (3.11 pav.), tačiau atlikta analizė neleidžia jas įvertinti kaip skirtingas kai kuriose sekcijose.
- 2) Asfaltbetonio dangos laikomoji galia yra didesnė tik sekcijose, kur naudojamos geosintetinės medžiagos GT1 ir GT2. Kitose sekcijose dangos laikomoji galia yra prarandama.
- 3) Atlikus statistinę analizę nustatyta, kad asfaltbetonio tampros modulis turi didesnės įtakos bandymo štampos vertikalaus sėdimo gyliui nei asfaltbetonio klampumas (3.14 ir 3.15 pav.), tačiau liekamosioms deformacijoms klampumo įtaka yra didesnė nei dangos tampros modulis (3.16 ir 3.17 pav.).
- 4) Geosintetinės medžiagos neturi įtakos provėžų, susidariusių per žiemą, gyliui, tačiau matavimais po karštojo metų sezono nustatyta, kad šių medžiagų įtaka yra ganėtinai ryški (3.18 pav.). Karštuojų metų sezonu pastebima ypač ryški geosintetinių medžiagų įtaka provėžų gyliui didėti. Armuotose sekcijose vasaros metu provėžos susiformavo nuo 1,4 iki 3,0 karto mažesnės nei kontrolinėje sekcijoje.
- 5) Nustatyta, kad asfaltbetonio dangos tampros modulis turi didelę įtaką provėžoms šaltuoju metų periodu, o asfaltbetonio klampumo įtaka yra ganėtinai maža (3.19 ir 3.20 pav.). Nagrinėjant provėžų gylį po karštojo metų sezono, nustatyta, kad asfaltbetonio klampumo įtaka provėžų gyliui padidėja, tačiau asfaltbetonio dangos tampros įtaka išlieka ženkli (3.21 ir 3.22 pav.).

Tačiau karštuoju metų periodu provėžų gylis priaugiu įtakos turi tik asfaltbetonio klampumas (3.23 ir 3.24 pav.).

6) Geosintetinės medžiagos turi teigiamos įtakos kelio dangai – tiek mažina provėžų gylį, tiek gerina asfaltbetonio reologines savybes, tačiau provėžoms ir šlyties deformacijoms mažinti siūlau naudoti tik geotinklus, atsisakant geotekstilių.

4. PROVĖŽŲ GYLIO MAŽINIMAS NAUDOJANT GEOSINTETINES MEDŽIAGAS

Šio skyriaus medžiaga paskelbta publikacijoje 8a.

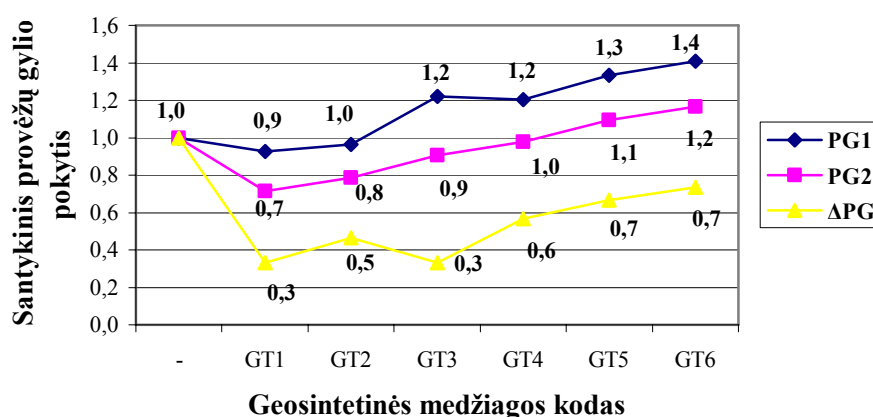
4.1. Gautųjų tyrimų duomenų taikymo galimybės Lietuvos Respublikoje

Provėžų skaičiavimo metodai asfaltbetonyje aprašyti 2.3 skyriuje. Lietuvos Respublikoje iki šiol nėra taikomas nė vienas provėžų skaičiavimo metodas. Didėjant provėžoms Lietuvos keliuose tai yra opi problema. Remtis patirtimi, įgyjama eksploatuojant automobilių kelius, yra netikslinga, nes tai gali užtrukti ilgus metus. Pasirenkant provėžų skaičiavimo metodus, matyt, reikėtų remtis užsienio šalių patirtimi ir turimomis galimybėmis. Tikslinga būtų naudoti tuos skaičiavimo metodus, kuriuos taiko šalys, turinčios klimatinės sąlygas, labai artimas Lietuvos klimatui ir kurių dangos konstrukcijos ir naudojamos medžiagos yra panašios.

Geosintetinių medžiagų įtaką provėžoms mažinti galima nagrinėti dviem aspektais:

- 1) geosintetinėmis medžiagomis siekiama paveikti įtempius, kurie nulemia šias deformacijas,
- 2) geosintetinėmis medžiagomis siekiama pagerinti medžiagų savybes, nulemiančias atsparumą įtempimams, lemiantiems provėžų susidarymą.

Šiame darbe didžiausias dėmesys buvo skiriamas asfaltbetonio savybėms gerinti. Atliktų tyrimų ir gautų rezultatų pagrindu gauti armavimo koeficientai, kurie atspindi tam tikrų asfaltbetonio savybių pokytį.



4.1 pav. Santykinė provėžų gylis priklausomybė nuo armuojančiosios medžiagos

Jeigu skaičiavimams yra taikomi metodai, besiremiantys daugiasluoksnės struktūros įtempiais, tokiu atveju armavimo koeficientai veikia galutinį, jau apskaičiuotą rezultatą. Remiantis

provėžų matavimais, skirtingose sekcijose gauti armavimo koeficientai pateikti 4.1 paveiksle.

Šiame paveiksle pateikti koeficientai atspindi provėžų gylio pokytį po šaltojo bei karštojo metų laiko ir provėžų padidėjimą karštuoju metų periodu. Esant būtinybei, skaičiuojant provėžas skirtingiems metų periodams, gali būti taikomi gautieji koeficientai.

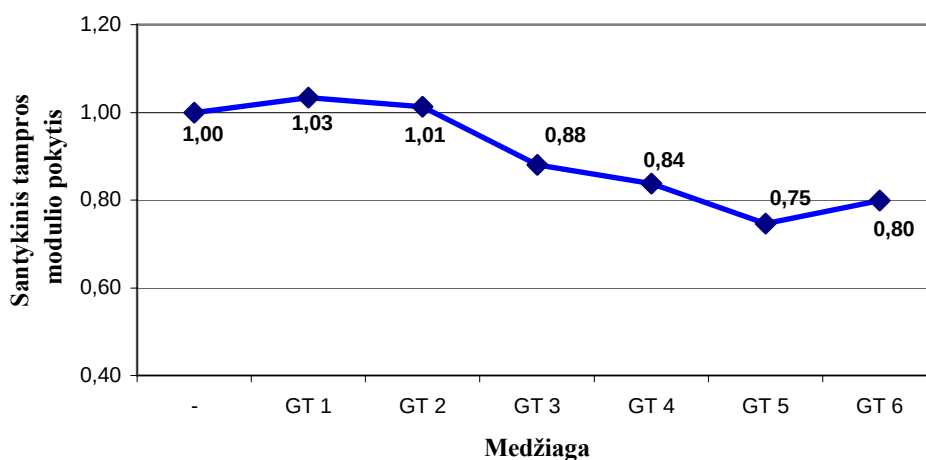
Jeigu provėžų gyliui apskaičiuoti taikomi modeliai, kuriuose yra reologiniai asfaltbetonio parametrai, tai armavimo koeficientai veikia šiuos parametrus, o ne galutinį rezultatą. Bandymų rezultatai ir jų pagrindu gauti armavimo koeficientai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Tyrimų duomenų ir armavimo koeficientų lentelė

Eksperimentinės sekcijos numeris	Geosintetinės medžiagos kodas	Dangos tampros modulis		Asfaltbetonio klampumas	
		E, MPa	k_E	η , MPa×s	k_η
00	-	347	1,00	96	1,00
01	GT1	359	1,03	135	1,40
02	GT2	351	1,02	132	1,37
03	GT3	306	0,89	114	1,19
04	GT4	291	0,83	119	1,24
05	GT5	259	0,75	106	1,10
06	GT6	277	0,80	111	1,15

k_E , k_η – asfaltbetonio dangos tampros modulio bei asfaltbetonio klampumo pokyčius įvertinantys koeficientai iš eilės

3.3 skyriuje atlikta statistinė duomenų analizė parodė, kad tarp atskirų bandymų sekcijų asfaltbetonio tampros reikšmių nėra esminio skirtumo, o sekcijose, kuriose šios reikšmės skiriasi, yra mažesnės nei kontrolinėje sekcijoje, todėl provėžų skaičiavimo modeliuose asfaltbetonio tampros modulį taikyti yra netikslinga.

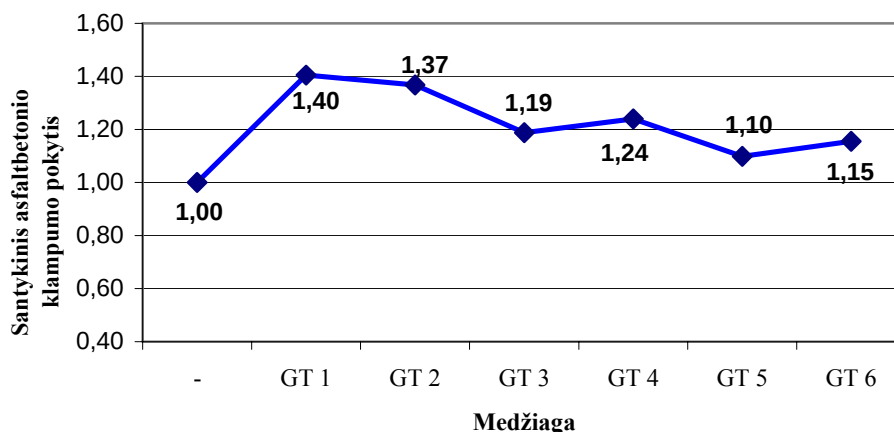


4.2 pav. Santykinis asfaltbetonio dangos tampros modulio pokytis

4.2 paveiksle pateiktas visos dangos tampros modulis, o skaičiuojant provėžų gylius yra

reikalingas tik asfaltbetonio tampros modulis. Lietuvoje nėra metodikos ir prietaisų, leidžiančių nustatyti asfaltbetonio tamprą, turint visos dangos tampros modulį.

Koeficientai, įvertinantys asfaltbetonio klampumą, pateikti 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Santykinis asfaltbetonio klampumo pokytis

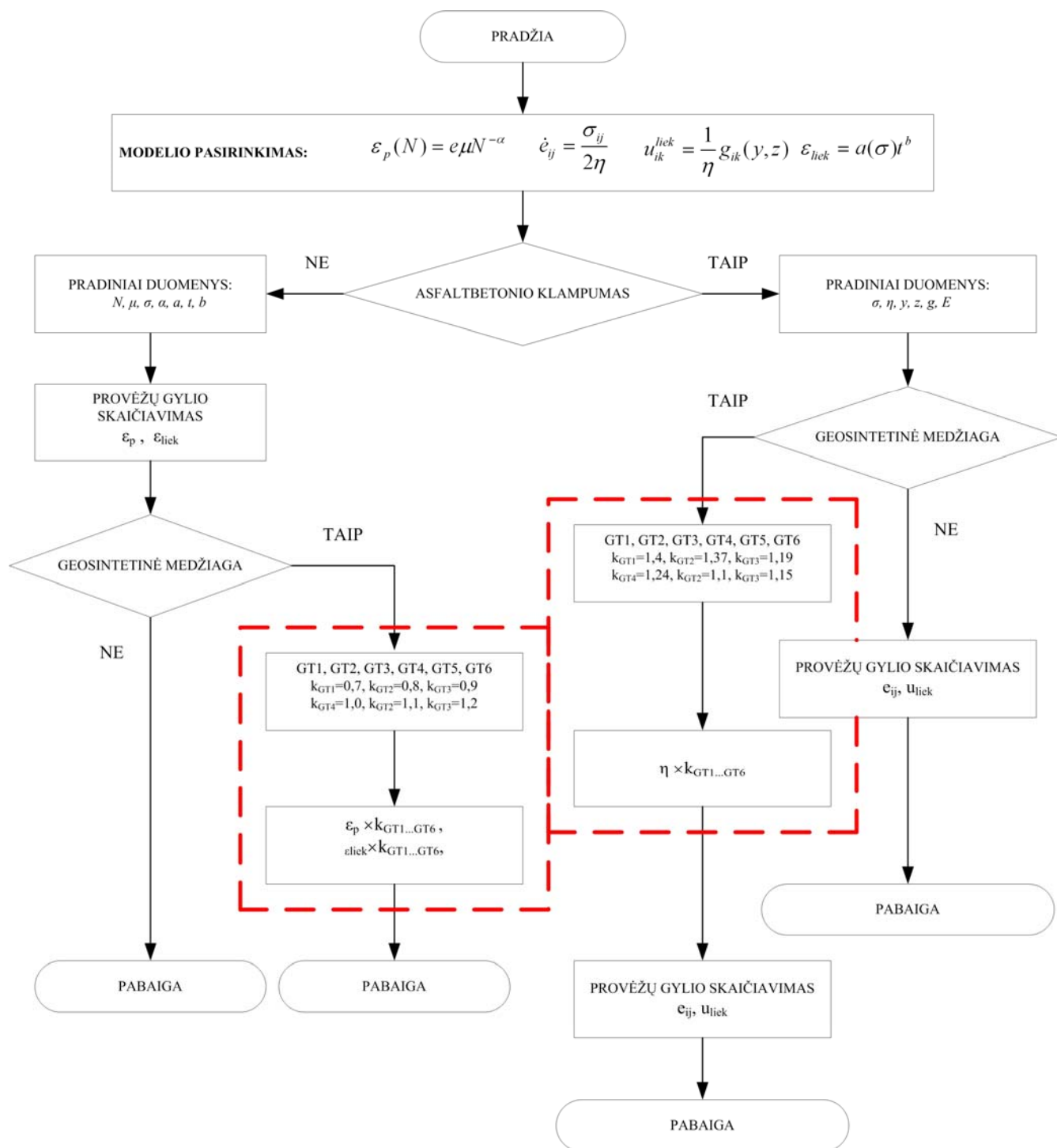
Tyrimais gautų armavimo koeficientų taikymo modelis provėžų skaičiavimo metoduose pateiktas 4.4 paveiksle.

Eksperimento metu gauti armavimo koeficientai pritaikyti provėžų gylis skaičiavimo metoduose. Išvesti koeficientai yra įvesti į skaičiavimo algoritmus. Pirmuoju atveju naudojami koeficientai, kurie atspindi provėžų gylis pokytį. Šie koeficientai gali būti naudojami tokiuose metoduose, kuriuose skaičiuojant neregistruoja asfaltbetonio klampumas. Tokiu atveju geosintetinės medžiagos nulemia galutinį skaičiavimo rezultatą.

Jeigu provėžų skaičiavimo metoduose naudojamas asfaltbetonio klampumas, tai armavimo koeficientai keičia šio parametro reikšmės skaičiavimo eigoje. 4.4 paveiksle naujai įvesti koeficientai apibrėžti raudona spalva dešinėje pusėje.

Praktiškai šie tyrimai gali būti taikomi apibrėžiant, ar tikslinga šias medžiagas naudoti provėžoms mažinti, o jeigu tikslinga, – tai konkrečiai kurias medžiagas. Atskirų parametrų tyrimai (3.13 pav. ir 4.1 lentelė) ir provėžų tyrimai (3.18 pav.) parodė, kad kai kurias medžiagas naudoti ne tik netikslinga, bet netgi žalinga.

Kovai su provėžomis autorius rekomenduoja nenaudoti geotekstilių. Gauti tyrimų rezultatai parodė, kad provėžų gylis, dangos laikomoji galia ir dangos tampros modulis yra žemesni tose sekcijose, kur naudojamos geotekstilės [8a].



4.4 pav. Loginė schema, įvertinanti asfaltbetonio klampumo pokytį, provėžų skaičiavimo metoduose

Pastaba: raudona spalva pažymėti duomenys yra autoriaus, juose pateikiami eksperimentinių tyrimų metu nustatyti armavimo koeficientai.

Labai svarbus yra vykdomų tyrimų tęstinumas. Būtina ir toliau atlikti jau įrengto bandomojo ruožo priežiūrą, fiksuojant ne tik šlyties deformacijas, bet ir kitas atsirandančias deformacijas. Provėžų gylis neturi būti vienintelis veiksnys, nulemiantis geosintetinių medžiagų naudojimo tikslingumą.

Turint tikslą pagrįsti, kokiuose ruožuose yra tikslinga naudoti geosintetines medžiagas, reikėtų įrengti kelis bandomuosius ruožus, kuriuose būtų naudojamos tokios geosintetinės medžiagos, kurių poveikis minėtoms deformacijoms yra teigiamas, t.y. naudoti tik geotinklus. Naujus bandomuosius ruožus reikėtų įrengti skirtingo eismo intensyvumo vietose.

4.2. Gautų tyrimų rezultatų diegimas

Geosintetinių medžiagų naudojimas pačiose dangų konstrukcijose, o ypač mažinant šlyties deformacijas, Lietuvos Respublikoje yra nereglamentuotas. Šios medžiagos naudojamos remiantis pačių firmų gamintojų rekomendacijomis, taip pat atsižvelgus į užsienio šalių patirtį. Lietuvos Respublikos Susisiekimo ministerijos parengtuose nurodymuose [79] aprašytas tik geotekstilės naudojimas automobilių kelių dangų konstrukcijose.

Tam tikslui būtina sukurti modelį, pagal kurį būtų galima apibrėžti šių medžiagų naudojimo Lietuvos Respublikoje tikslingumą, mažinant šlyties deformacijas.

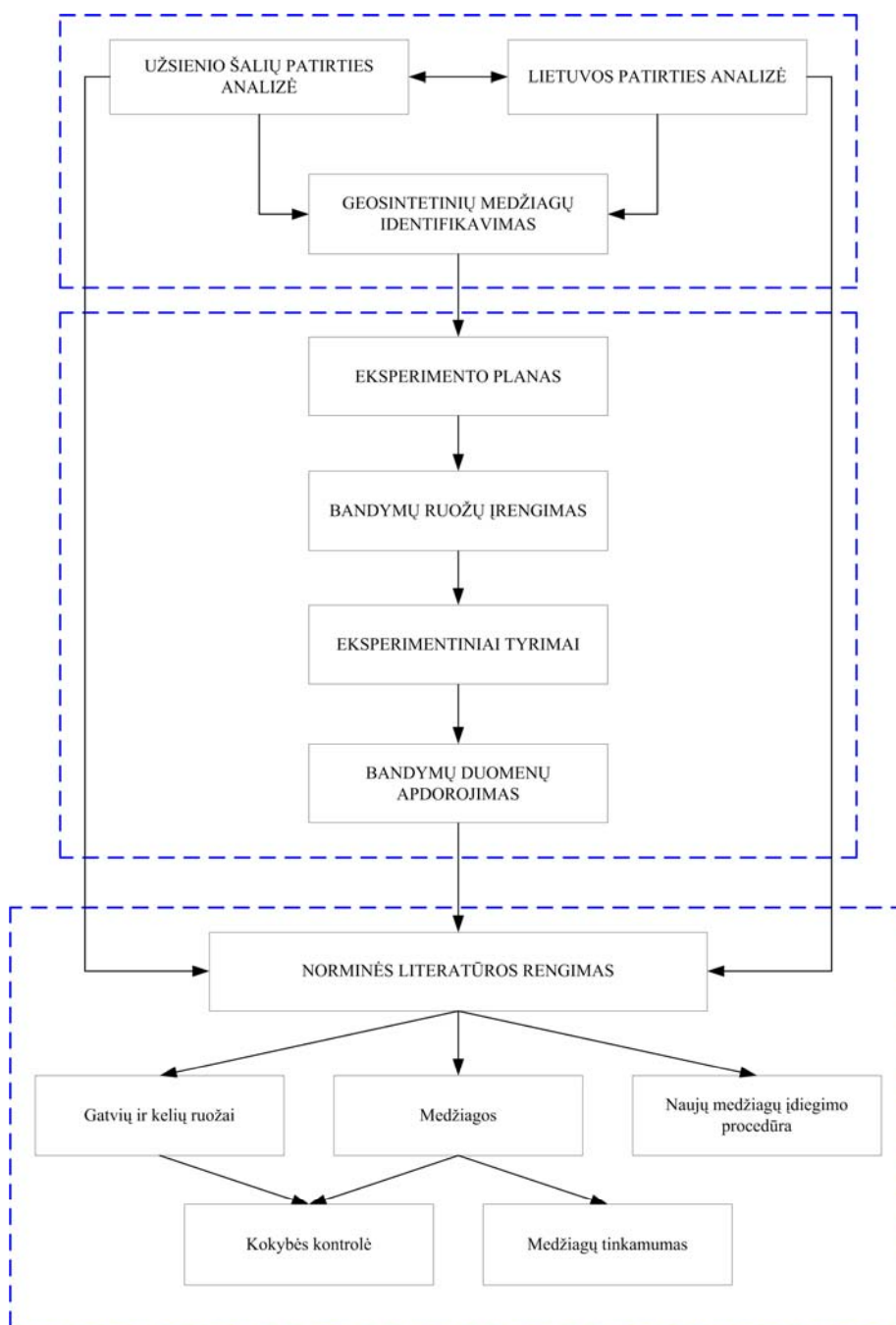
Įdiegimo modelis turėtų būti kelių etapų:

- duomenų apie Lietuvoje naudojamas geosintetines medžiagas, skirtas provėžoms mažinti, surinkimo,
- kitų šalių norminės literatūros analizės,
- eksperimentinių, armuotų asfaltbetonio dangų tyrimų atlikimo,
- gautų tyrimų rezultatų apdorojimo ir geosintetinių medžiagų naudojimo tikslingumo pagrindimo,
- ekonominės naudos skaičiavimo,
- norminių dokumentų rengimo ir įteisinimo.

4.5 paveiksle pateiktas autoriaus siūlomas geosintetinių medžiagų diegimo į praktiką modelis.

Pirmuoju etapu būtina surinkti duomenis apie visas įmanomas geosintetines medžiagas, kurios gali būti naudojamos provėžoms mažinti. Klasifikuoti minėtąsias medžiagas į grupes yra netikslinga, nes kiekviena medžiaga yra individuali tiek savo geometriniu struktūra, tiek savo sudėtimi, tiek papildomomis savybėmis.

Todėl šiuo atveju būtina identifikuoti kiekvieną medžiagą atskirai, aprašant jos savybes, gamybai naudojamas medžiagas, geometrijos ypatybes. Remiantis kitų šalių patirtimi reikia pašalinti tas medžiagas, kurių naudojimas yra netikslingas.



4.5 pav. Geosintetinių medžiagų diegimo Lietuvoje modelis

Autoriaus siūlymu reikia išskirti šias pagrindines savybes, kurios turi būti svarbiausios parenkant geosintetines medžiagas šlyties deformacijoms mažinti:

- medžiagos stiprumas tempiant, kN,
- maksimalus pailgėjimas trūkio metu, %,
- medžiagos lydymosi temperatūra, °C.

Remdamasis jau atliktais eksperimentiniais tyrimais, autorius rekomenduoja naudoti tokias geosintetines medžiagas, kurių stiprumas tempiant yra ne mažesnis nei 50 kN. Bandymų sekcijoje, kur medžiagos pailgėjimas 12 %, laikomoji galia yra didesnė, o provėžų gyliai yra mažesni nei sekcijose, kur medžiagos pailgėjimas 4 %. Tai prieštarauja teorijai, kad asfaltbetonio dangų

stiprinimui yra tikslinga naudoti medžiagas, kurių pailgėjimas ne didesnis nei 4 %. Būtent esant tokiai pailgėjimo reikšmei asfaltbetonis suyra. Tam tikslui reikia tęsti jau pradėtus tyrimus bei įrengti naujus bandomuosius ruožus. Medžiagos lydimosi temperatūra turi būti aukštesnė nei asfaltbetonio klojimo temperatūra.

Busimieji eksperimentiniai tyrimai turi būti atliekami bandymų ruožuose ištiriant, kaip kiekviena geosintetinė medžiaga veikia šlyties deformacijų atsiradimą bei jų plėtrą. Tikslinga įrengti kelis bandomuosius ruožus su skirtingomis dangos konstrukcijomis ir su skirtingais eismo intensyvumais.

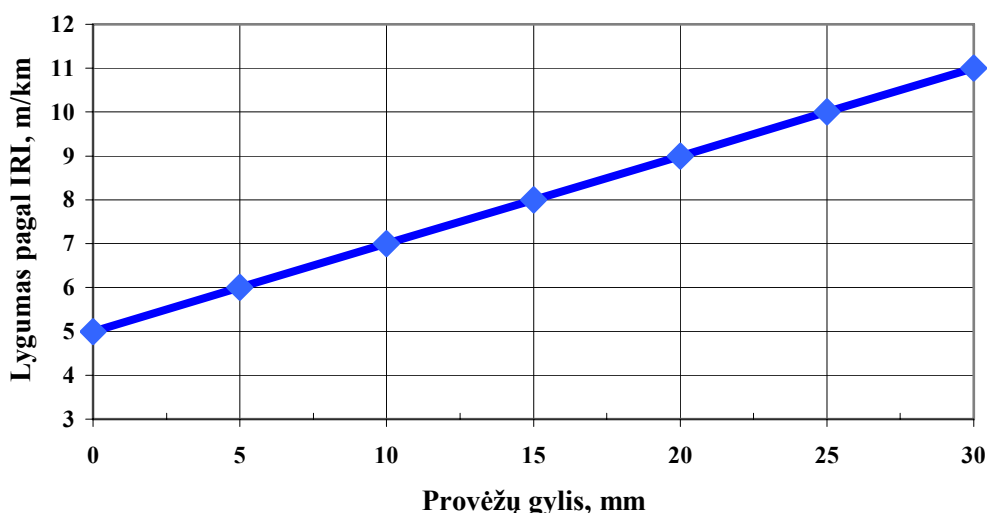
Vėliau būtina tyrimų rezultatus išanalizuoti, statistiškai apdoroti ir jais remiantis nustatyti, kokias medžiagas yra tikslinga naudoti. Taip pat reikia nustatyti kelių ir gatvių ruožus, kuriuose būtų tikslinga šias medžiagas naudoti. Be to, būtina apskaičiuoti ir ekonominį efektą, kuris bus gaunamas šias medžiagas naudojant. Paskutiniajame etape kiekvienai atskirai medžiagai reikia parengti reikalavimus ir apibrėžti jos naudojimo sritis.

4.3. Ekonominio efekto, panaudojus geosintetines medžiagas, įvertinimas

Provėžos, susidariusios asfaltbetonio dangose, veikia:

- eismo dalyvių laiką,
- transporto priemonių eksploatacines išlaidas,
- kelių tinklo priežiūros išlaidas,
- eismo įvykius.

Kelio dangose susiformavusios provėžos padidina nelygumus kelyje ir kartu sumažina greitį tame ruože.



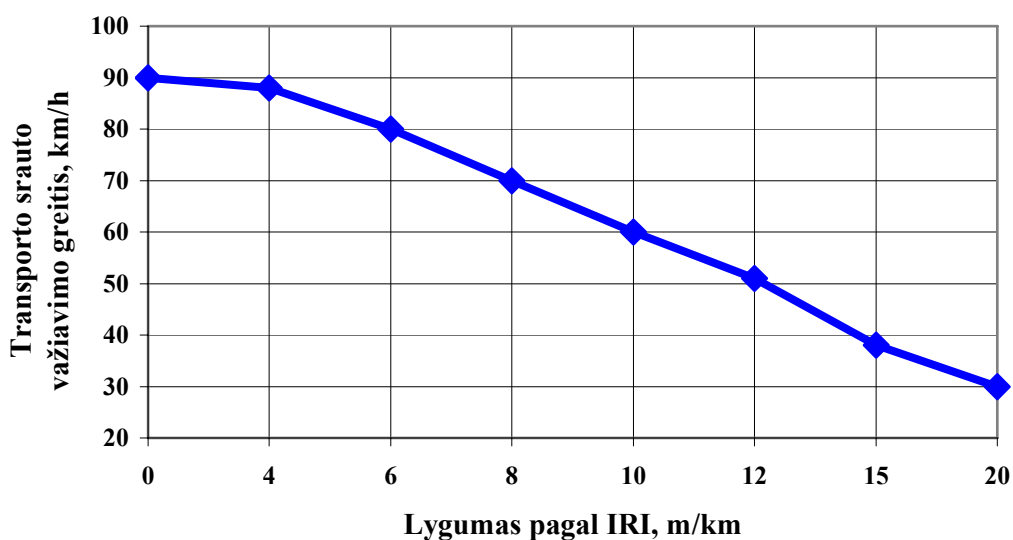
4.6 pav. Dangos nelygumų priklausomybė nuo susiformavusių provėžų gylio

K. Petkevičiaus pateikta metodika [80] leidžia nustatyti dangos nelygumus IRI pagal turimą provėžų gylį. 4.6 paveiksle pateikta priklausomybė tarp provėžų gylis ir dangos nelygumų pagal IRI.

Remiantis 3.18 paveiksle pateiktais provėžų gyliais ir pateikta priklausomybe, yra sužinomi nelygumai pagal IRI. Pagal toliau pateiktą (4.7 pav.) priklausomybę nustatoma, koks bus tame ruože srauto važiavimo greitis.

Turint autotransporto važiavimo greičių duomenis, galima nustatyti, koks bus eismo srauto greičio sumažėjimas sekcijose su skirtingais provėžų gyliais. Rezultatai pateikti 4.2 lentelėje.

Turint pagrindinius ekonominius parametrus, galima apskaičiuoti, kiek dėl sulėtėjusio autotransporto greičio prarandama lėšų.



4.7 pav. Eismo srauto greičio priklausomybė nuo dangos lygumo pagal IRI

Skirtingo automobilio tipo vienos valandos laiko vertė yra paimta iš literatūros šaltinio [81] ir pateikta 4.3 lentelėje. Skaičiavimams buvo pasirinktas 1 km ilgio kelio ruožas, kurio eismo intensyvumas atitiko bandomojo ruožo intensyvumą. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3–8 prieduose. Laiko nuostoliai, esant šlapiai dangai, apskaičiuojami remiantis tuo, kad provėžose besikaupiantis vanduo sumažina važiavimo greitį 10 km/h.

4.2 lentelė. Provėžų gylis, kelio dangos lygumo bei srauto važiavimo greičio suvestinė

Geosintetinės medžiagos kodas	Provėžų gylis, mm	Lygumas pagal IRI, m/km	Eismo srauto greitis, km/h
-	8,4	6,9	76
GT1	6,0	6,2	79
GT2	6,6	6,5	77,3
GT3	7,6	6,7	78,2

Iš kelių oro sąlygų stotelių buvo surinkti duomenys apie lietingas dienas toje vietoje. Suskaičiavus buvo gauta, kad per metus lyja 17,7 paros. Šie duomenys panaudoti skaičiavimuose.

Šiuose skaičiavimuose neįvertintas automobilių atsarginių dalių sąnaudų padidėjimas dėl susidariusių provėžų. Literatūroje [81] pateikta metodika šioms sąnaudoms skaičiuoti, tačiau susidariusios provėžos yra pernelyg mažos, kad būtų tikslinga šias sąnaudas vertinti.

4.3 lentelė. Automobilio eksploatavimo valandos vertė

Automobilio tipas	Laiko vertė, Lt/h	Patikslinta laiko vertė 2006 metams, Lt/h
Lengvasis automobilis	17,3	18,3
Sunkvežimis:		
dviejų ašių	17,8	18,9
trijų ašių	22,7	24,1
keturių ašių	32,0	33,9
penkių ir daugiau ašių	40,0	42,3
Maži autobusai	58,5	62,0
Dideli autobusai	187,9	199,1

Šiame darbe nesuskaičiuotos kelio priežiūros bei remonto išlaidos. Kadangi eksperimentiniai tyrimai atspindi tik vienerius dangos eksploatacijos metus, yra sunku prognozuoti, kaip provėžos plėtosis tolimesniais dangos eksploatacijos metais. Minėtas dvi ekonomines charakteristikas yra tikslinga suskaičiuoti tik turint ilgesnių stebėjimų bei tyrimų duomenis. Provėžų gylis įtaka avaringumui Lietuvos Respublikoje nėra tirta, todėl nėra atlikti ekonominiai skaičiavimai nuostolių, patiriamų dėl avarių, susijusių su provėžomis.

4.4 lentelė. Laiko nuostolių, patiriamų dėl sumažėjusio važiavimo greičio Vilniaus mieste, suvestinė

	GT1	GT2	GT3
Laiko nuostoliai, patiriami sumažėjus važiavimo greičiui nearmuotame kelio ruože, lyginant su armuotu kelio ruožu, Lt	41929	24238	11568
Laiko nuostoliai, patiriami nearmuotame kelio ruože, lyginant su armuotu kelio ruožu, esant šlapiai kelio dangai, Lt	7628	7967	8215
Iš viso per metus:	49557	32205	19783
Papildomi dangos įrengimo kaštai (geosintetinės medžiagos kaina)	105000	99000	103500

Norint atlikti minėtus skaičiavimus, būtina atlikti kompleksinius tyrimus, siekiant nustatyti, kiek autoavarijų įvyko būtent dėl susiformavusių provėžų.

Atlikti laiko nuostolių skaičiavimai parodė, kad, panaudojus tam tikras medžiagas, įdėtos lėšos geriausiu atveju atsipirks po 2,1 metų, o blogiausiu ekonominiu variantu – po 5,2 metų. Tačiau šiuose skaičiavimuose neįvertintas provėžų padidėjimas tolesniaisiais eksploatacijos metais. To priežastis yra mažas tyrimų periodas.

Ekonominiai svertai, apibūdinantys projekto rentabilumą, pateikti 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Ekonominių svertų suvestinė

Ekonominis svetas	Bandomasis ruožas Vilniaus mieste		
	GT1	GT2	GT3
Naudos ir kaštų santykis N/K	2,5	1,7	1,01
Vidinė gražos norma VGN, %	33,1	17,32	0,33

Remiantis mokslinė literatūra [81], projekto patrauklumas pagal VGN yra:

- patenkinamas, jeigu VGN yra 5 – 10 %,
- geras, jeigu VGN yra 10 – 15 %,
- labai geras, jeigu VGN yra ≥ 15 %.

Vertinant pagal santykį N/K projekto patrauklumas yra:

1. patenkinamas, jeigu N/K yra 1,0 – 1,5,
2. geras, jeigu N/K yra 1,5 – 2,5,
3. labai geras, jeigu N/K yra $> 2,5$.

Jeigu VGN yra mažesnė nei 5 %, rekomenduojama projekto atsisakyti arba jį keisti iš esmės [81].

Projekto vertinimas atliktas, kai dangą iki kito remonto bus eksploatuojama 6 metus. Diskonto norma paimta vidutine reikšme ir yra lygi 7,5 %.

Šiuo atveju autorius rekomenduoja atsisakyti geotinklų GT2 bei GT3 naudojimo.

4.4. Išvados

Apibendrinant šį skyrių galima daryti tokias išvadas:

1) Pasiūlyta provėžų gylio skaičiavimo metodika, sudaryta eksperimentinių tyrimų metu nustatytais armavimo koeficientais ir įvertinanti geosintetinių medžiagų įtaką, gali būti taikoma metoduose provėžų gyliui skaičiuoti.

2) Siūlomas sukurtas geosintetinių medžiagų diegimo modelis gali būti taikomas tiek Lietuvoje, tiek ir kitose šalyse. Šis modelis apibūdina geosintetinių medžiagų naudojimo tikslingumą bei ekonominę naudą.

3) Įrengiant naujas ir rekonstruojant egzistuojančias asfaltbetonio dangas naudoti geosintetines medžiagas ekonominiu požiūriu yra naudinga. Geriausi ekonominiai rodikliai nustatyti naudojant geosintetinę medžiagą GT1, todėl provėžų gyliui viršutiniuosiuose asfaltbetonio sluoksniuose mažinti rekomenduoju naudoti šią geosintetinę medžiagą.

4) Geosintetinėmis medžiagomis armuotose asfaltbetonio dangose besiplečiančių provėžų tendencijoms skirtingo eismo intensyvumo kelių ruožuose nustatyti siūlau organizuoti papildomus tyrimus. Tokiu būdu bus galima apskaičiuoti ekonominę naudą bet kokio intensyvumo kelyje.

BENDROSIOS IŠVADOS

1) Nuo automobilių eismo apkrovų susiformavę šlyties įtempiai viršutiniuosiuose asfaltbetonio dangų sluoksniuose yra pagrindinė provėžų susidarymo priežastis. Provėžų didėjimas suintensyvėja tais periodais, kai dangos temperatūra yra aukštesnė nei $+35^{\circ}\text{C}$ ir kai asfaltbetonis laipsniškai praranda savo gebėjimą priešintis šlyties įtempiams. Atsiradusios provėžos didina kelių naudotojų ir kelių eksploatavimo išlaidas, o kai danga šlapia ar apledėjusi, provėžos gali tapti skaudžių eismo įvykių priežastimi. Teoriniais tyrimais nustatyta, kad dauguma provėžų gylimo mažinimo metodų Lietuvoje ir pasaulyje orientuoti į asfaltbetonio atsparumo šlyties įtempiams didinimą. Šiam tikslui projektuojami nauji asfaltbetonio mišiniai, keičiamas jų sudėties komponentų santykis, naudojamos modifikuotos rišamosios medžiagos. Tačiau, kaip rodo praktika, šios priemonės ne visada duoda laukiamus rezultatus.

2) Teoriniais tyrimais nustatyta, kad geosintetinės medžiagos naudotinos mažinti provėžoms, susijusioms su šlyties deformacijomis, tačiau jų naudojimas Lietuvoje ir pasaulyje nėra paremtas mokslo tyrimais ar kelių eksploatavimo patirtimi. Pavieniai stebėjimai nesuteikia pakankamai prielaidų šias medžiagas naudoti tiesiant ir rekonstruojant kelius.

3) Kitų mokslininkų geosintetinių medžiagų naudojimo dangų konstrukcijose tyrimais įrodyta, kad šių medžiagų įtaka asfaltbetonio reologinėms savybėms ir provėžų gyliui susijusi su armavimo koeficientais. Armavimo koeficientai atspindi šių savybių ir provėžų susidarymo pokyčius, nulemtus geosintetinių medžiagų poveikio.

4) Eksperimentinių ruožų tyrimais nustatyta, kad naudojant geosintetines medžiagas provėžų gylis mažėja. Provėžos, susidariusios karštuoju metų periodu dangos ruožuose, armuotose geosintetinėmis medžiagomis, yra nuo 1,4 iki 3,0 karto mažesnės, kaip ruožuose, kuriuose nenaudotos jokios geosintetinės medžiagos. Be to, naudojant šias medžiagas, asfaltbetonio klampumas didėja nuo 1,1 iki 1,4 karto. Šaltuoju metų periodu, kai dangos temperatūra nesiekia $+35^{\circ}\text{C}$, vienodos provėžos susidaro geosintetika armuotuose ruožuose ir ruožuose be geosintetinių medžiagų.

5) Eksperimentiniais tyrimais ir ekonominės naudos skaičiavimais nustatytas toks geosintetinių medžiagų naudojimo prioritetas: asfaltbetonį armuoti geotekstile neefektinga. Šlyties deformacijoms mažinti siūloma naudoti GT1 ir GT2 kodų geotinklus. Apskaičiavus naudos ir kaštų santykį (atitinkamai 2,5 – GT1 medžiagai ir 1,7 – GT2 medžiagai) ir vidinę grąžos normą (atitinkamai 33,1 % – GT1 medžiagai ir 17,32 % – GT2 medžiagai), ekonomiškai geriausias variantas asfaltbetonį armuoti geotinklu GT1.

6) Teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais apibūdintos pagrindinės savybės (medžiagos stiprumas tempiant, maksimalus pailgėjimas trūkio metu, medžiagos lydimosi temperatūra), kurias turi tenkinti geosintetinės medžiagos, skirtos provėžoms mažinti.

7) Sukurtasis geosintetinių medžiagų diegimo modelis gali būti taikomas ne tik klojant Lietuvos Respublikos automobilių kelių asfaltbetonio dangas, bet ir įrengiant kitus kelio elementus. Pritaikius šį modelį būtų išvengta nereikalingų finansinių išlaidų, o parengus norminius dokumentus, būtų užtikrintas šių medžiagų naudojimo tikslingumas ir garantuota kokybės kontrolė.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Balčytis Z. ES politikos įtaka Lietuvos transporto sistemai. *Lietuvos keliai*. Nr. 1, 2004, p. 4–5.
2. Aavik A. Estonian Road Network and Road Management. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Vol. I, No. 1, 2006, p. 39–44.
3. Puodžiukas V. Įstoję į Europos Sąjungą. *Lietuvos keliai*. Nr. 1, 2004, p. 6–10.
4. Ullidtz P. Pavement Analysis. Institute of Roads, Transport and Town Planning, the Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1987, 318 p.
5. Huang Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, 805 p.
6. Nilson R. Fatigue of asphalt Mixtures – Continuum Damage Mechanics applied to Data from laboratory Tests. Licentiate Thesis. Department of technology and Society Lund Institute of Technology, 2001, 124 p.
7. Sivilevičius H., Petkevičius K. Regularities of Defect Development in the Asphalt Concrete Road Pavements. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. VIII, No. 3, 2002, p. 206–213.
8. Fwa T.F., Tan S.A., Zhu L.Y. Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using C - ϕ Model. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 130, No. 5, 2004, p. 675–683.
9. The Shell Bitumen Handbook. Cherstey: Design and Print Partnership Limited, 1991, 336 p.
10. Brown S.F. Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering. ISAP-8th International Conference on Asphalt Pavements. Seattle, 1997, 23 p.
11. Wang L.B., Hoyos L., Wang J. Anisotropic Properties of Asphalt Concrete: Characterization and Implications in Pavement Design and Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. XVII, No. 5, 2004, p. 535–543.
12. Uzan J. Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 130, No. 1, 2004, p. 6–13.
13. Laurinavičius A., Čygas D. Climatic Conditions of Road Pavement and their Impact on Road Traffic. *Transport*. Vol. XIII, No. 1, 2003, p. 23–31.
14. Statistiniai duomenys: transportas, krovinių vežimas, kelių ilgis. Prieiga per internetą: <http://www.std.lt/lt/pages/view/?id=1226> (žiūrėta 2006-06-30).
15. 2002–2015 metų Lietuvos Respublikos valstybinės reikšmės kelių priežiūros ir plėtros programa. II tomas. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerijos. Kaunas, 2001, 97 p.
16. Ramsamooj D.V., Ramadan J.P.E., Lin G.S. Model Prediction of Rutting in Asphalt Concrete. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 124, No. 5, 1998, p. 448–456.

-
17. Čygas D. Key Problems of Asphalt Concrete Production in Lithuania. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. VI, No.1, 2000, p. 39–45 (In Lithuanian).
 18. Laurinavičius A., Čygas D., Skerys K., Babickas R., Stankevičius A., Oginskas R., Syrnickaitė I. Asfaltbetonio mišinių naujų sudėčių tyrimas, analizė ir projektavimas ypatingoms automobilių transporto apkrovoms Vilniaus miesto gatvėse. Statybinių medžiagų, konstrukcijų ir statybos technologijų kūrimas ir taikymas. Vilnius, 1999.
 19. Topal A., Sengoz B. Determination of Fine Aggregate Angularity in Relation with the Resistance to Rutting of Hot-mix Asphalt. *Construction and Building Materials*. Vol. 19, No. 2, 2005, p.155–163.
 20. Vislavičius K. Determination of Optimum Quantity of Bitumen in Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Civil Engineering*. Vol. VIII, No. 1, 2002, p. 73–76.
 21. Laurinavičius A., Čygas D., Babickas R., Oginskas R., Vaitkus A. Priedų panaudojimo asfaltbetonio mišinių kokybei gerinti tyrimai. Vilnius, 2001.
 22. Королёв И.В., Агеева Е.Н. Дорожный тёплый асфальтобетон. Высша школа. Головное издательство. 1984, 200 p.
 23. Лаврухин В.П., Калгин Ю.И. Свойства асфальтобетонов на модифицированных битумах. *Наука и техника в дорожной отрасли*. №. 1, 2002, с. 14-17.
 24. Gonsalves F.P., Ceratti J.A., Bernucci L.B. Study of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Layers. 2002, 6 p.
 25. Kiryuhin G.N. Designing of asphalt pavements on the ultimately permissible irreversible deformation. 2001, 6 p.
 26. Kandhal P.S., Mallick R.B., Brown E.R. Hot Mix Asphalt for Intersection in Hot Climates. National Centre for Asphalt Technology. Auburn, 1998, 16 p.
 27. Čygas D., Laurinavičius A. Asfaltbetonio mišinių naudojimo automobilių kelių ir miestų gatvių dangoms įrengti pagrindinės problemos. *Miesto plėtra ir keliai*. Mokslo žurnalo „Statyba“ priedas. 2000, p. 20–26.
 28. Kim Y.R., Lee Y.C., Lee H.J. Correspondence Principle for Characterization of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.VII, No. 1, 1995, p. 59–68.
 29. Yong-Rak Kim, Little D.N. Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 16, No. 2, 2004, p. 122–132.
 30. Wong W.G., Han Heifeng, Ge Huiping, Wang C.P., Lu Weimin. Rutting Response of the Hot-Mix Asphalt to Generalized Dynamic Shear Moduli of Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*. Vol. XVIII, No. 6, 2004, p. 399–408.
 31. White T.D., Haddock J.E., Fang H. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board – National

-
- Research Council National Academy Press Washington D.C., 2002, 65 p.
32. Bahuguna S., Panoskaltsis V.P., Papoulia K.D. Characterization and Modelling of Permanent Deformations of Asphalt Pavements. The Proceeding of "Fourteenth Engineering Mechanics Conference". Austin, Texas, 2000, 6 p.
 33. Collop A.C., Debon D., Hardy M.S.A. Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 121, No. 1, 1995, p. 82-92.
 34. Sun Woo Park, Kim Y.R., Schapery R.A. A Viscoelastic Continuum Damage Model and its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete. *Mechanics of Materials*. Vol. 24, No. 4, 1996, p. 241-255.
 35. Zhang W., Dresher A., Newcomb D.E. Viscoelastic Analysis of Diametral Compression of Asphalt Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 123, No. 6, 1997, p. 596-603.
 36. Collop A.C., Debon D., Hardy M.S.A. Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 121, No. 1, 1995, p. 82-93.
 37. И.В.Рыбьев. Асфальтовые бетоны. Высшая школа. Москва, 1969, 397 p.
 38. Development of New Bituminous Pavement Design Method COST 333. Final Report of the Action. Luxenburg, 1999, 337 p.
 39. Blazejowski K., Nillson R., Sybilski D. Visco-elastic Analysis of Typical Polish Flexible Pavements Using VEROAD. Proceedings of 2th International Conference Durable and Safe Road Pavements, 1996, 12 p.
 40. Гезенцевей Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. Москва: Транспорт, 1985, 347 p.
 41. Quaresma L., Fereirra P.S., Freire A.C., Batista A.L. Mechanistic Approach for Rutting. COST 334 – effects of wide tyres and dual tires. Lisboa, 2000, 16 p.
 42. Sybilski D., Mularzuk R., Bankowski W. Comparison Between Typical Pavement Structure in Accordance with Polish Design Guide and Innovation Pavement Structure with Us of VEROAD Software. 2002, 14 p.
 43. Szydlo A., Mackiewicz P. Asphalt Mixes Deformation Sensitivity to Change in Rheological Parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. XVII, No. 1, 2005, p. 1-9.
 44. Juodžbalis A. Geosintetinės technologijos jau Lietuvoje. *Lietuvos keliai*. Nr. 1, 1998, p. 52-54.
 45. Civil Engineering Handbook: Geosynthetics. University of Washington. Electronic edition. 2003, 14 p.
 46. Handbook of Geosynthetics. Geosynthetic Materials Association January 2002, 64 p.
 47. Brown S.F. Geosynthetics in Asphalt Pavements. International geosynthetics society.
-

- 2001, 43 p.
48. 25 year's Experience with the Pilot – Scale Nottingham Pavement test Facility. International Conference on Accelerated Pavement Testing Reno, Nevada, 1999, 36 p.
49. Technical Note No.1. Geotextiles. Amoco Fabrics and Fibers Company, 1994, 8 p.
50. Perkins S.W., Edens M.Q. Finite Element and Distress Models for Geosynthetic-Reinforced Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. III, No. 4, 2002, p. 239–250.
51. Perkins S.W. Evaluation of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavement Systems Using Two Pavement Test Facilities. Montana Department of Transportation, Helena, Montana, Report No. FHWA/MT-02-008/20040. 1998, 120 p.
52. Perkins S.W. Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections. Montana Department of Transportation, Helena, Montana, Report No. FHWA/MT-99-001/8138. 1999, 140 p.
53. Perkins, S.W. Numerical Modeling of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements. Montana Department of Transportation, Helena, Montana, Report No. FHWA/MT-01-003/99160-2. 2001, 97 p.
54. Hoe I Ling, Huabei Liu. Finite Element Studies of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with Geogrid. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 129, No. 7, 2003, p. 801–811.
55. Yue Z.Q., Chen S., Tham L.G. Finite Element Modeling of Geomaterials Using Digital Image Processing. *Computers and Geotechnics*. Vol. 30, No. 5, 2003, p. 375–397.
56. Dong-Yeob Park, Hee-Ku Lee, Sik Youn In, Young-Chan Suh. Impact of Geosynthetic Placement Location on Viscoelastic Responses of Reinforced Flexible Pavements. Publication at the 2002 TRB Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., 2002, 22 p.
57. Cancelli A., Montanelli F. and Rimoldi P., Zhao A. Full scale laboratory testing on geosynthetics reinforced paved roads. *Proc. Int. Sym. on Earth Reinforcemen.* 1996, p. 573–578.
58. Cancelli A. and Montanelli F. In-ground test for geosynthetic reinforced flexible paved roads. Proceeding of Geosynthetics IFAI, Boston, 1999, 23 p.
59. Гунин С.О., Киселев Г.В. Экспериментальные исследования нежестких одежд переходного и низшего типов, временных автомобильных дорог, армированных георешетками. Материал II – ой международной научно – технической конференции. Санкт–Петербург, 2002, с. 92–96.
60. Гунин С.О., Киселев Г.В. Методика расчёта нежестких одежд временных

- автомобильных дорог, армированных георешетками. Материал II – ой международной научно – технической конференции. Санкт – Петербург, 2002, с. 96–100.
61. Hoe I.Ling, Zheng Liu. Performance of Geosynthetic-Reinforced Asphalt Pavements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 127, No. 2, 2001, p.177–184.
62. Wasage T.L.J., Ong G.P., Fwa T.P., Tan S.A. Laboratory Evaluation of Rutting Resistance of Geosynthetics Reinforced Asphalt Pavement. *Journal of the Institution of Engineers*. Vol. 44, No. 2, 2004, p. 29–44.
63. Cleveland G.S., Button J.W., Lytton R.L. Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavement Overlay Systems to Reduce Reflection Cracking. Texas Transportation Institute, Report No. 0-1777. 2002, 298 p.
64. Kim K.W., Doh Y.S., Lim S. Mode I reflection cracking resistance of strengthened asphalt concretes. *Construction and Building Materials*. Vol. 13, No. 5, 1999, p. 243–251.
65. Nazarian S., Alvadar G. Impact of Temperature Gradient on Modulus of Asphaltic Concrete Layers. *Materials in Civil Engineering*. Vol. XVIII, No. 4, 2006, p. 492–499.
66. DiMaggio J.A., Cribbs M.M. The Role Geosynthetics on USA Highways. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 14, No. 5, 1996, p. 243–251.
67. Deacon A.J., Harvey J.T., Guada I. An Analytically-Based Approach to Rutting Prediction. *Transportation Research Record*. 2002, p. 9-18.
68. Statybos techninis reglamentas STR 2.06.03:2001 „Automobilių keliai“. Vilnius, 2001, 92 p.
69. Statybos rekomendacijos R 35-01. Automobilių kelių asfaltbetonio ir žvyro dangos. Vilnius, 2001, 119 p.
70. Statybos rekomendacijos R 34-01. Automobilių kelių pagrindai. Vilnius, 2001, 124 p.
71. LST 1360.5:1995. Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Bandymas šlampu. Vilnius, 1995, 14 p.
72. LST EN 13036-7:2004. Kelio ir skridimo aikštelės paviršiaus rodikliai. Bandymo metodai. 7 dalis. Kelio dangos sluoksnių nelygumų matavimas liniuotės metodu. Vilnius, 2004, 10 p.
73. Eidukas D. Eksperimento planavimo teorija. Eksperimentas. Kaunas: Technologija, 2002, 137 p.
74. Ашмаров И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Издательство Ленинградского университета, 1971, 75 с.

-
75. Čekanavičius V., Murauskas G. Statistika ir jos taikymas. II dalis. Vilnius: leidykla TEV, 2002, 272 p.
76. Sakalauskas V. Statistika su Statistica. Vilnius: Margi Raštai, 1998, 227 p.
77. Valkauskas R. Statistika. Vilnius, Vilniaus vadybos kolegija, 2002, 155 p.
78. Regresinė analizė: paprastoji regresija, regresinių modelių palyginimas. Prieiga per internetą: http://www.statgraphics.com/regression_analysis.htm#simple. (žiūrėta 2006-06-15).
79. Geotekstilės ir geotinklų naudojimas tiesiant kelius (laikini nurodymai). Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija, Lietuvos kelių direkcija. Vilnius, 1998.
80. Petkevičius K. Lietuvos automagistralių asfaltbetonio dangos patikimumo analizė. Mokslo tyrimo darbo ataskaita. Vilnius, 2003, 142 p.
81. Čygas D., Laurinavičius A., Miškinis D., Puodžiukas V. Automobilių kelių investiciniai projektai. Reikalavimai ir vertinimas. Vilnius, 2006, 191 p.

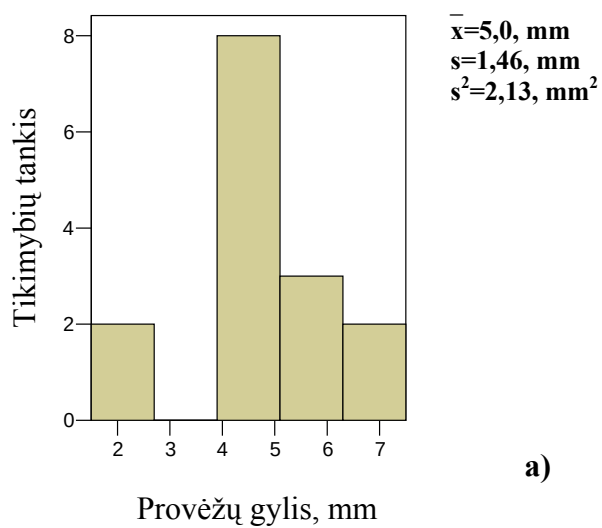
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA

- 1a. Oginskas R., Laurinavičius A. Impact of Various Factors on the Elasticity Characteristics of Asphalt Concrete. Tarptautinės konferencijos „Environmental Engineering“ pranešimų rinkinys. Vilnius, 2005, p. 753–758.
- 2a. Огинскас Р., Чигас Д., Лауринавичюс А. Опыт применения геосинтетических материалов в Литве для улучшения качества автомобильных дорог. Tarptautinės konferencijos „Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств“ recenzuotų pranešimų rinkinys. Penza, 2004, p. 380–385.
- 3a. Oginskas R., Laurinavičius A. Geosintetinių medžiagų panaudojimo galimybės aplinkos apsaugos inžinerijoje. 6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ konferencijos pranešimų rinkinys. Vilnius, 2003, p. 121–129.
- 4a. Повилайтене И., Огинскас Р. Геосинтетические материалы в строительстве и ремонте автомобильных и железных дорог. *Строительные материалы*. №. 10, 2005, с. 74–75.
- 5a. Oginskas R. Armuotų asfaltbetonio dangų tyrimai Lietuvoje. 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ konferencijos pranešimų rinkinys. Vilnius, 2005, p. 90–95.
- 6a. Laurinavičius A., Oginskas R., Žilionienė D. Research and Evaluation of Lithuanian Asphalt Concrete Road Pavements Reinforced by Geosynthetics. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2006, Vol. I, No. 1, p. 21–28.

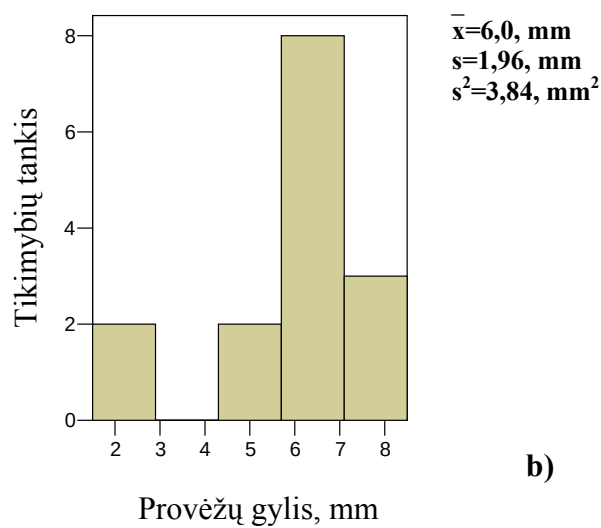
-
- 7a. Laurinavičius A., Oginskas R. Experimental Research on the Development of Rutting in Asphalt Concrete Pavements Reinforced with Geosynthetic Materials. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006, Vol. XII, No. 4, p. 311–317. ISSN 1392–3730.
- 8a. Огинскас Р., Чигас Д., Лауринавилюс А. Анализ влияния геосинтетических материалов на формирование и развитие колеи в асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог Литовской Республики. Tarptautinės konferencijos „Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств” recenzuotų pranešimų rinkinys. Penza, 2006, p. 418–423.

PRIEDAI

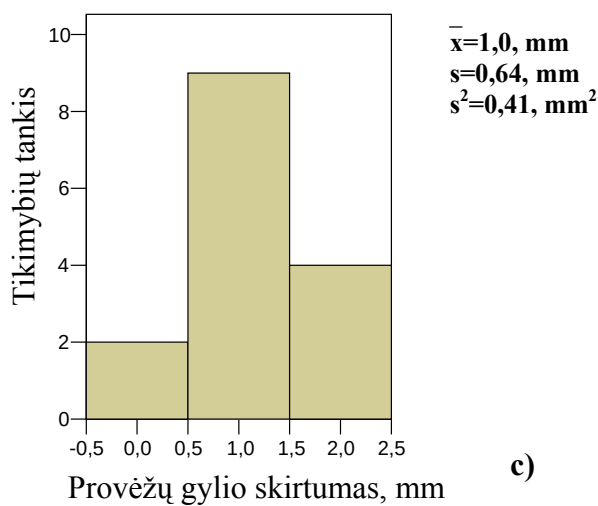
1 priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai



a)

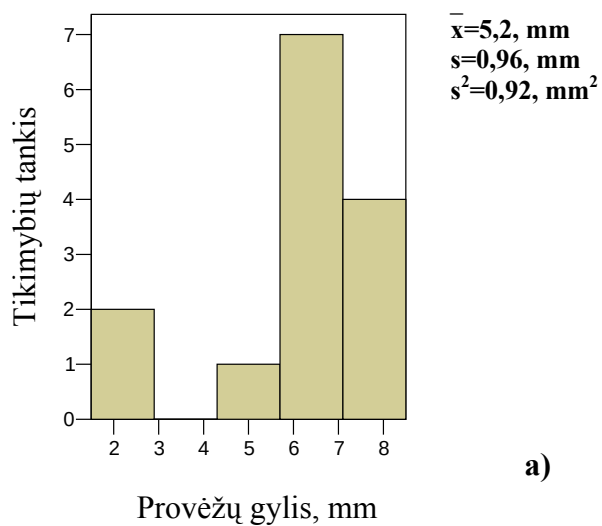


b)

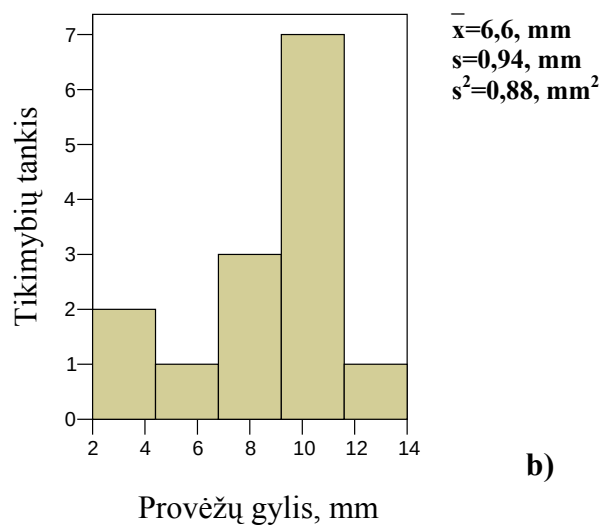


c)

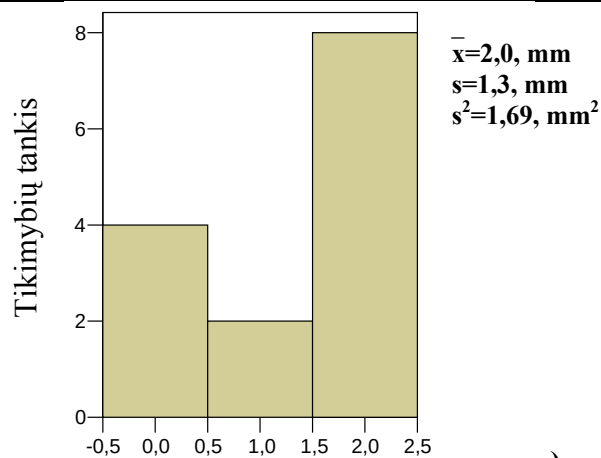
Provėžų gylio pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT1: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų



a)



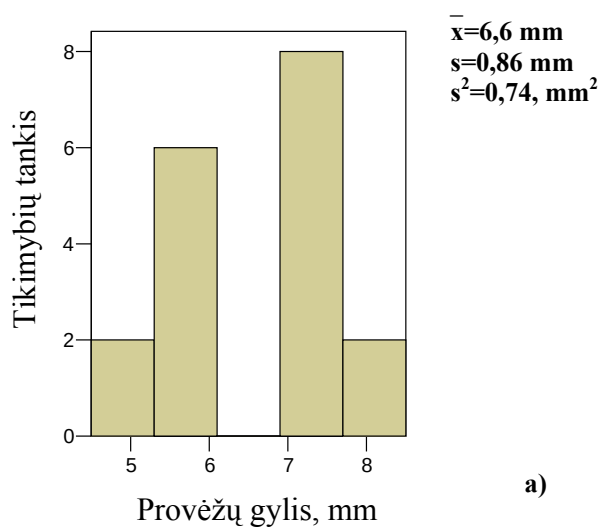
b)



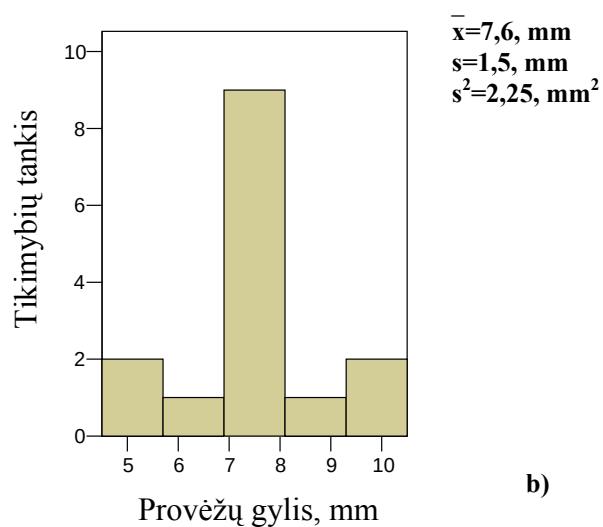
c)

Provėžų gylis skirtumas, mm

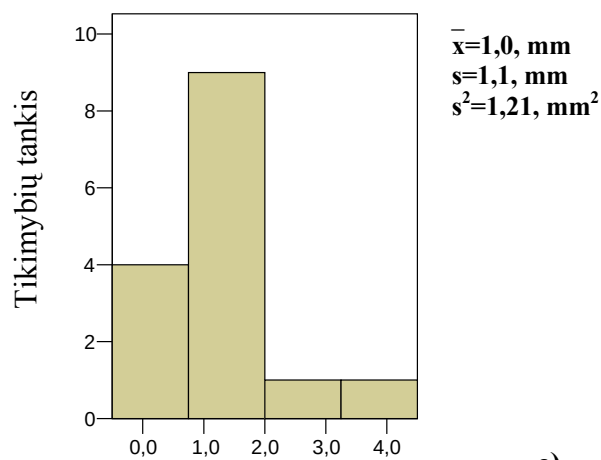
Provėžų gylis pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT2: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų



a)



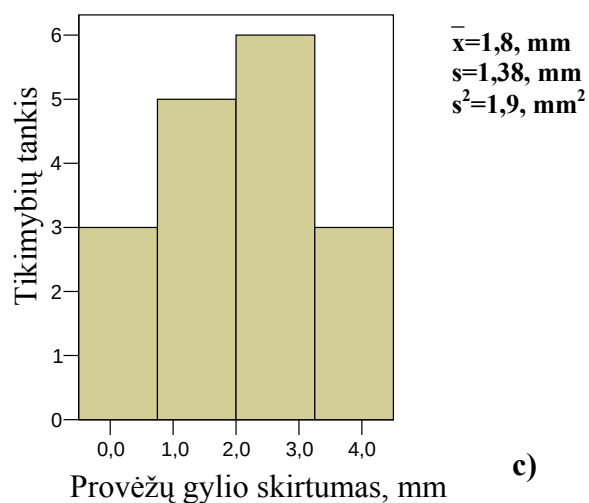
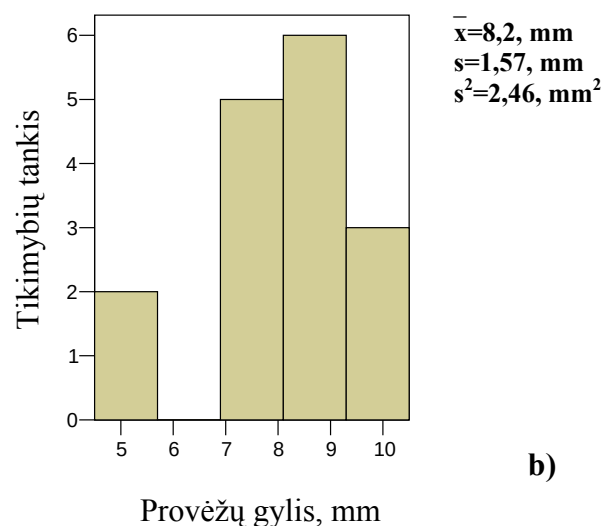
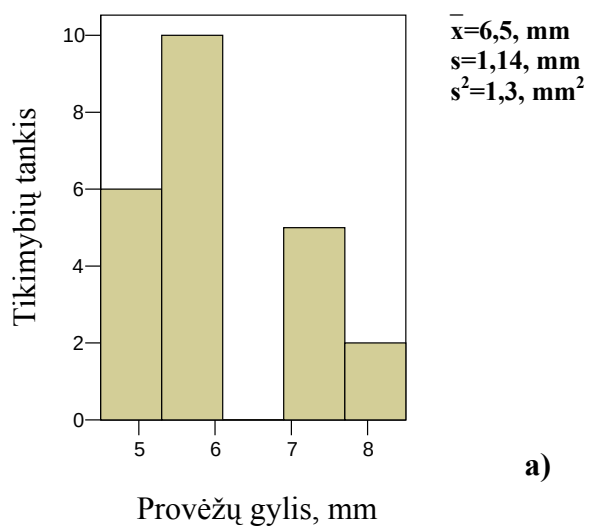
b)



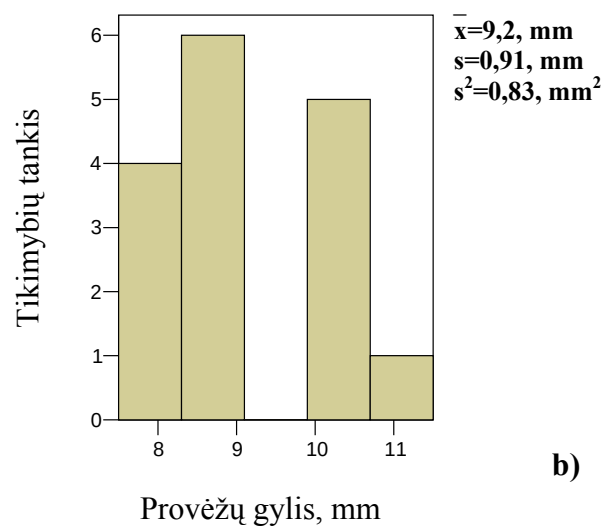
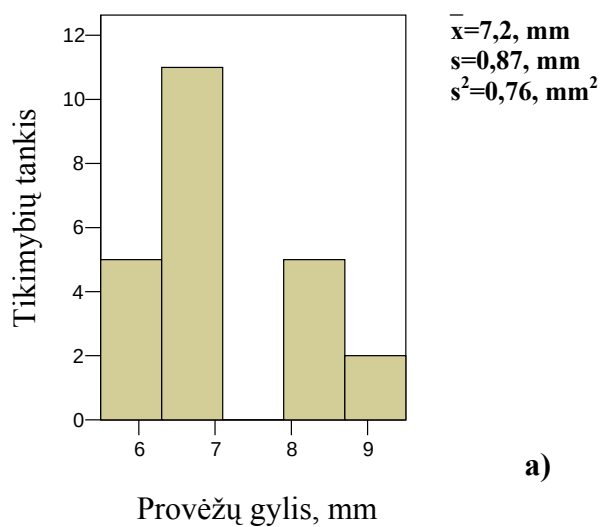
c)

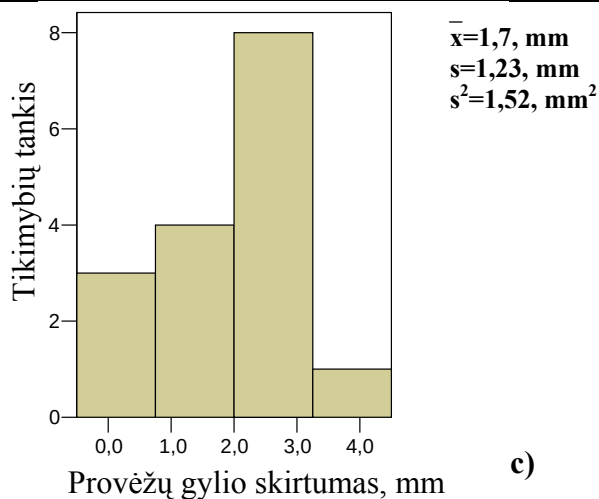
Provėžų gylis skirtumas, mm

Provėžų gylis pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT3: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų

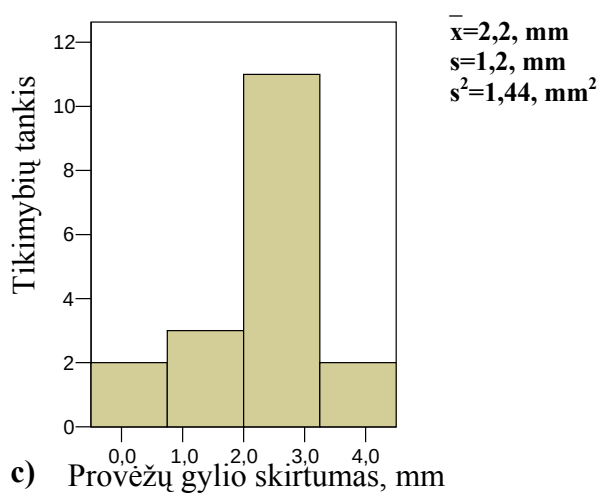
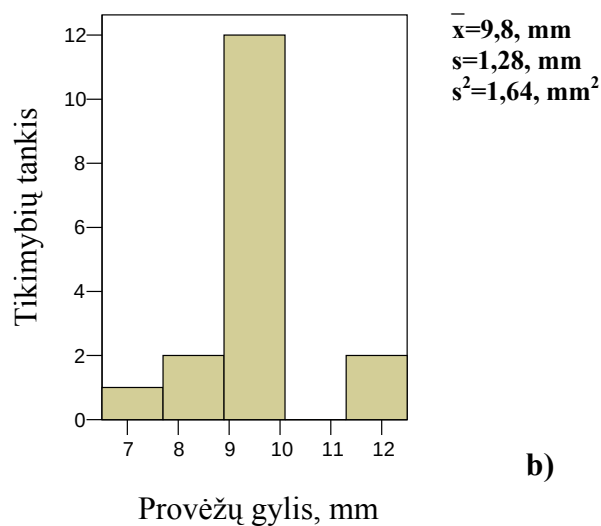
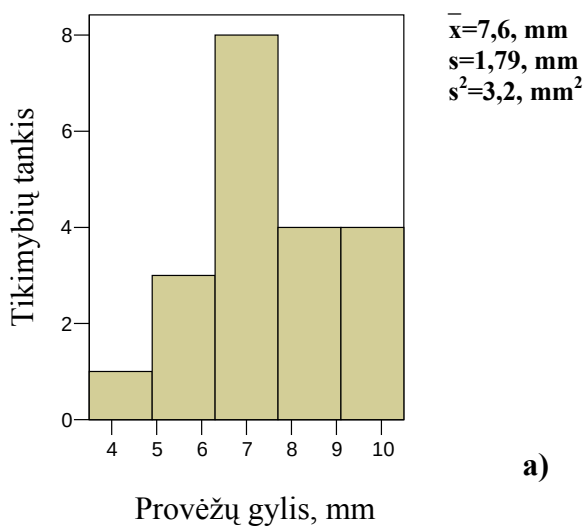


Provėžų gylis pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT4: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų

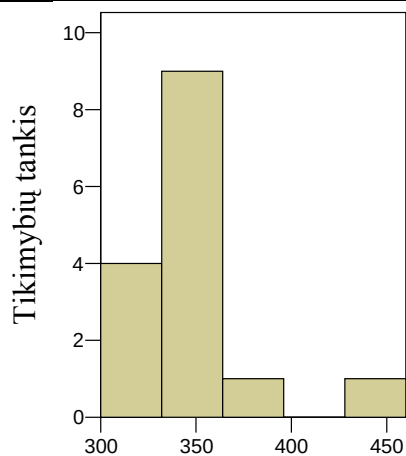




Provėžų gylis pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT5: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų

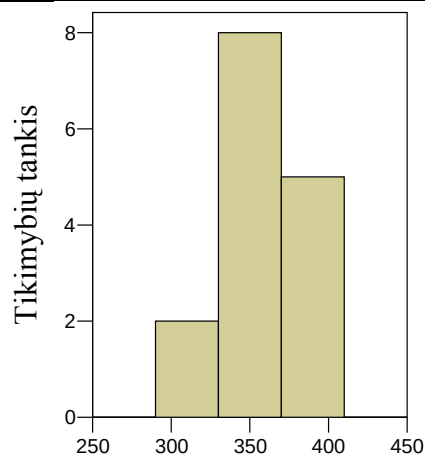


Provėžų gylis pasiskirstymas ruože su geosintetine medžiaga GT6: a – po pirmojo matavimo; b – po antrojo matavimo; c – skirtumo tarp matavimų



$\bar{x}=347 \text{ MPa}$
 $s=34,23, \text{ MPa}$
 $s^2=1172, \text{ MPa}^2$

a)



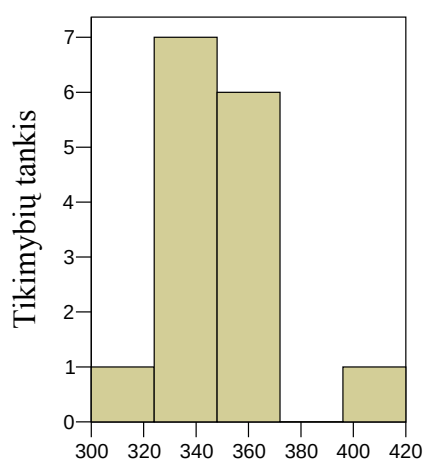
$\bar{x}=359 \text{ MPa}$
 $s=30,35, \text{ MPa}$
 $s^2=921, \text{ MPa}^2$

b)

Tampros modulis, MPa

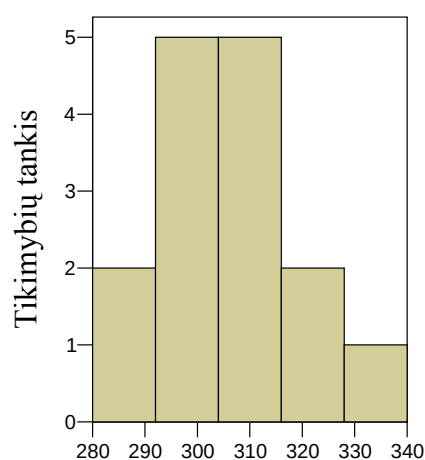
Tampros modulis, MPa

Tampros modulis: a – kontrolinėje sekcijoje, b – sekcijoje su geosintetine medžiaga GT1



$\bar{x}=351 \text{ MPa}$
 $s=23,14, \text{ MPa}$
 $s^2=536, \text{ MPa}^2$

a)



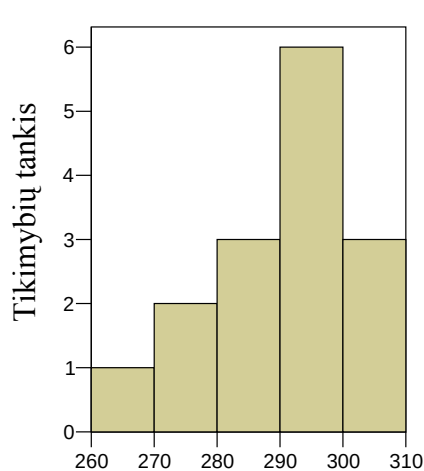
$\bar{x}=306 \text{ MPa}$
 $s=12,76, \text{ MPa}$
 $s^2=163, \text{ MPa}^2$

b)

Tampros modulis, MPa

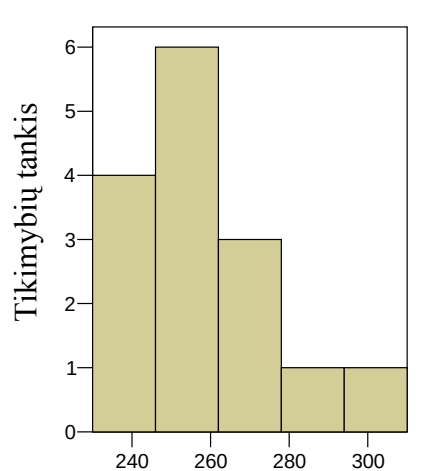
Tampros modulis, MPa

Tampros modulis: a – sekcijoje su geosintetine medžiaga GT2, b – sekcijoje su geosintetine medžiaga GT3



$\bar{x}=291 \text{ MPa}$
 $s=12,89, \text{ MPa}$
 $s^2=166, \text{ MPa}^2$

a)



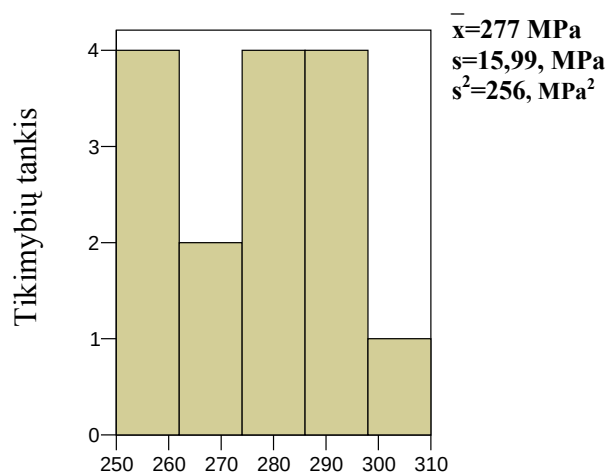
$\bar{x}=258 \text{ MPa}$
 $s=18,41, \text{ MPa}$
 $s^2=339, \text{ MPa}^2$

b)

Tampros modulis, MPa

Tampros modulis, MPa

Tampros modulis: a – sekcijoje su geosintetine medžiaga GT4, b – sekcijoje su geosintetine medžiaga GT5



Tampros modulis, MPa

Tampros modulis sekcijoje su geosintetine medžiaga GT6

2 priedas. Post hoc testo rezultatai

Sugretinimas	PG_1	PG_2	ΔPG	E
K-GT1				
<i>Tukey HSD</i>	0,991	0,069	0,016	0,806
<i>LSD</i>	0,476	0,005	0,001	0,168
<i>Bonferroni</i>	1,000	0,100	0,020	1,000
K-GT2				
<i>Tukey HSD</i>	0,513	0,974	0,995	0,998
<i>LSD</i>	0,066	0,379	0,514	0,600
<i>Bonferroni</i>	0,252	1,000	1,000	1,000
K-GT3				
<i>Tukey HSD</i>	0,051	0,991	0,004	0,000
<i>LSD</i>	0,003	0,472	0,000	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,007	1,000	0,004	0,000
K - GT4				
<i>Tukey HSD</i>	0,145	0,999	0,664	0,000
<i>LSD</i>	0,012	0,472	0,107	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,029	1,000	1,000	0,000
K-GT5				
<i>Tukey HSD</i>	0,000	0,650	0,294	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,102	0,029	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,000	1,000	0,603	0,000
K-GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,000	0,131	0,223	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,010	0,020	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,000	0,214	0,416	0,000
GT1-GT2				
<i>Tukey HSD</i>	0,991	0,069	0,112	0,977
<i>LSD</i>	0,012	0,000	0,008	0,390
<i>Bonferroni</i>	0,252	0,007	0,176	1,000
GT1-GT3				
<i>Tukey HSD</i>	0,060	0,324	0,999	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,472	0,658	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,007	0,688	1,000	0,000
GT1-GT4				
<i>Tukey HSD</i>	0,145	0,016	0,567	0,000
<i>LSD</i>	0,001	0,607	0,079	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,029	0,020	1,000	0,000
GT1-GT5				
<i>Tukey HSD</i>	0,000	0,000	0,898	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,102	0,239	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,000	0,000	1,000	0,000
GT1-GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,000	0,000	0,958	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,010	0,331	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,000	0,000	1,000	0,000
GT2-GT3				
<i>Tukey HSD</i>	0,928	0,687	0,036	0,000
<i>LSD</i>	0,276	0,114	0,002	0,000
<i>Bonferroni</i>	1,000	1,000	0,049	0,000
GT2-GT4				
<i>Tukey HSD</i>	0,994	1,000	0,964	0,000

<i>LSD</i>	0,503	0,707	0,347	0,000
<i>Bonferroni</i>	1,000	1,000	1,000	0,000
GT2–GT5				
<i>Tukey HSD</i>	0,171	0,990	0,728	0,000
<i>LSD</i>	0,014	0,462	0,130	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,296	1,000	1,000	0,000
GT2–GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,001	0,612	0,627	0,000
<i>LSD</i>	0,000	0,091	0,095	0,000
<i>Bonferroni</i>	0,002	1,000	1,000	0,000
GT3–GT4				
<i>Tukey HSD</i>	0,999	0,877	0,294	0,536
<i>LSD</i>	0,669	0,219	0,029	0,071
<i>Bonferroni</i>	1,000	1,000	0,603	1,000
GT3–GT5				
<i>Tukey HSD</i>	0,784	0,222	0,664	0,000
<i>LSD</i>	0,156	0,020	0,107	0,000
<i>Bonferroni</i>	1,000	0,413	1,000	0,000
GT3–GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,037	0,020	0,793	0,014
<i>LSD</i>	0,002	0,001	0,161	0,001
<i>Bonferroni</i>	0,050	0,026	1,000	0,017
GT4–GT5				
<i>Tukey HSD</i>	0,512	0,916	0,997	0,004
<i>LSD</i>	0,066	0,259	0,555	0,000
<i>Bonferroni</i>	1,000	1,000	1,000	0,004
GT4–GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,011	0,353	0,987	0,662
<i>LSD</i>	0,001	0,037	0,444	0,106
<i>Bonferroni</i>	0,013	0,779	1,000	1,000
GT5–GT6				
<i>Tukey HSD</i>	0,606	0,953	1,000	0,291
<i>LSD</i>	0,089	0,320	0,852	0,028
<i>Bonferroni</i>	1,000	1,000	1,000	0,593

3 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT1

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis, kai provėžų gylis 6,0 mm, km/h	Greitis, kai provėžų gylis 8,4 mm, km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per parą, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	68	65	2,4	3,665	18,3	67,1	24481
2 ašių sunkvežimis	360	65	62	2,7	0,268	18,9	5,1	1849
3 ašių sunkvežimis	90	60	57	3,2	0,079	24,1	1,9	694
4 ašių sunkvežimis	4	60	57	3,2	0,004	33,9	0,1	43
5 ašių sunkvežimis	2	60	57	3,2	0,002	42,3	0,1	27
Mažas autobusas	540	65	62	2,7	0,402	62	24,9	9097
Didelis autobusas	90	60	57	3,2	0,079	199,1	15,7	5737
Iš viso:	6486				4,5		114,9	41929

4 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT2

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis, kai provėžų gylis 6,6 mm, km/h	Greitis, kai provėžų gylis 8,4 mm, km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per parą, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	66,7	65	1,4	2,117	18,3	38,7	14143
2 ašių sunkvežimis	360	63,7	62	1,5	0,155	18,9	2,9	1069
3 ašių sunkvežimis	90	58,7	57	1,8	0,046	24,1	1,1	402
4 ašių sunkvežimis	4	58,7	57	1,8	0,002	33,9	0,1	25
5 ašių sunkvežimis	2	58,7	57	1,8	0,001	42,3	0,0	16
Mažas autobusas	540	63,7	62	1,5	0,232	62	14,4	5260
Didelis autobusas	90	58,7	57	1,8	0,046	199,1	9,1	3323
Iš viso:	6486				2,6		66,4	24238

5 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, lyginant su armuota sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT3

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis, kai provėžų gylis 6,6 mm, km/h	Greitis, kai provėžų gylis 8,4 mm, km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per parą, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	65,8	65	0,7	1,010	18,3	18,5	6747
2 ašių sunkvežimis	360	62,8	62	0,7	0,074	18,9	1,4	510
3 ašių sunkvežimis	90	57,8	57	0,9	0,022	24,1	0,5	192
4 ašių sunkvežimis	4	57,8	57	0,9	0,001	33,9	0,0	12
5 ašių sunkvežimis	2	57,8	57	0,9	0,000	42,3	0,0	7
Mažas autobusas	540	62,8	62	0,7	0,111	62	6,9	2511
Didelis autobusas	90	57,8	57	0,9	0,022	199,1	4,4	1588
Iš viso:	6486				1,2		31,7	11568

6 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT1

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis, esant sausai dangai, km/h	Greitis, esant šlapiai dangai, km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per parą, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	68	58	9,1	13,692	18,3	250,6	4435
2 ašių sunkvežimis	360	65	55	10,1	1,007	18,9	19,0	337
3 ašių sunkvežimis	90	60	50	12,0	0,300	24,1	7,2	128
4 ašių sunkvežimis	4	60	50	12,0	0,013	33,9	0,5	8
5 ašių sunkvežimis	2	60	50	12,0	0,007	42,3	0,3	5
Mažas autobusas	540	65	55	10,1	1,510	62	93,7	1658
Didelis autobusas	90	60	50	12,0	0,300	199,1	59,7	1057
Iš viso:	6486				16,8		430,9	7628

7 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT2

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis, esant sausai dangai, km/h	Greitis, esant šlapiai dangai, km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per parą, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	66,7	56,7	9,5	14,279	18,3	261,3	4625
2 ašių sunkvežimis	360	63,7	53,7	10,5	1,052	18,9	19,9	352
3 ašių sunkvežimis	90	58,7	48,7	12,6	0,315	24,1	7,6	134
4 ašių sunkvežimis	4	58,7	48,7	12,6	0,014	33,9	0,5	8
5 ašių sunkvežimis	2	58,7	48,7	12,6	0,007	42,3	0,3	5
Mažas autobusas	540	63,7	53,7	10,5	1,579	62	97,9	1732
Didelis autobusas	90	58,7	48,7	12,6	0,315	199,1	62,7	1109
Iš viso:	6486				17,6		450,1	7967

8 priedas. Laiko nuostoliai nearmuotoje sekcijoje, esant šlapiai kelio dangai, lyginant su sekcija, kurioje panaudota geosintetinė medžiaga GT3

Transporto rūšis	Eismo intensyvumas aut/parą	Greitis esant sausai kelio dnagai, km/h	Greitis, esant šlapiai kelio dangai km/h	Vėlavimo laikas, s	Laiko praradimas per parą, h	Transporto priemonės vertė, Lt/h	Nuostoliai per para, Lt	Nuostoliai per metus, Lt
Lengvasis automobilis	5400	65,8	55,8	9,8	14,707	18,3	269,1	4764
2 ašių sunkvežimis	360	62,8	52,8	10,9	1,086	18,9	20,5	363
3 ašių sunkvežimis	90	57,8	47,8	13,0	0,326	24,1	7,9	139
4 ašių sunkvežimis	4	57,8	47,8	13,0	0,014	33,9	0,5	9
5 ašių sunkvežimis	2	57,8	47,8	13,0	0,007	42,3	0,3	5
Mažas autobusas	540	62,8	52,8	10,9	1,629	62	101,0	1787
Didelis autobusas	90	57,8	47,8	13,0	0,326	199,1	64,9	1148
Iš viso:	6486				18,1		464,1	8215