



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Miglė Paliukaitė

**KLIMATO ĮTAKOS AUTOMOBILIŲ KELIŲ ASFALTO DANGOS
KONSTRUKCIJOS STIPRIUI TYRIMAI IR VERTINIMAS**

**RESEARCHES AND EVALUATION OF CLIMATE INFLUENCE TO
ASPHALT PAVEMENT STRENGTH**

Baigiamasis magistro darbas

Civilinė inžinerija, valstybinis kodas 62402T105

Keliai

Statybos inžinerija (02 T)

Vadovas: doc. dr. Audrius Vaitkus

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Alfredas Laurinavičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Miglė Paliukaitė

**KLIMATO ĮTAKOS AUTOMOBILIŲ KELIŲ ASFALTO DANGOS
KONSTRUKCIJOS STIPRIUI TYRIMAI IR VERTINIMAS**

**RESEARCHES AND EVALUATION OF CLIMATE INFLUENCE TO
ASPHALT PAVEMENT STRENGTH**

Baigiamasis magistro darbas

Civilinė inžinerija, valstybinis kodas 62402T105

Keliai

Statybos inžinerija (02 T)

Vadovas doc. dr. Audrius Vaitkus

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas tyrėjas Algirdas Motiejūnas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas lektorius Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2010

Užduotis

Anotacija

Annotation

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Bendrosios teorinės nuostatos ir sąvokos	11
Įvadas.....	12
1. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio vertinimas ir nustatymas.....	13
1.1. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio vertinimas	13
1.2. Automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo ir vertinimo metodų apžvalga.....	16
1.3. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio nustatymo metodai	27
1.4. Darbo tikslas ir uždaviniai	39
2. Klimato įtakos automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stipriui analizė	40
2.1. Asfalto dangos konstrukcijos darbas Lietuvos klimato sąlygose	40
2.2. Temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijos stipriui.....	47
2.3. Antrojo skyriaus išvados	54
3. Temperatūros ir drėgnio įtakos asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimai	55
3.1 Tyrimų susijusių su temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijai analizė.....	55
3.2 Temperatūros redukavimo metodai taikomi kitose šalyse	63
3.3 Tyrimų susijusių su temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijai analizė Lietuvoje.....	67
3.3.1 Kelių oro sąlygų informacinė sistema (KOSIS)	67
3.3.2 Kelių oro sąlygų informacinės sistemos 1999-2008 m. ir 2009 m. duomenų analizė.....	68
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	79
4. Temperatūros įtakos asfalto dangos konsrtukcijos stipriui eksperimentinis tyrimas	81
4.1. Tyrimo objektas ir metodika	81
4.2. Atlikto eksperimentinio tyrimo gautų rezultatų analizė	89
4.3. Temperatūros redukavimo +20 °C koeficiento nustatymas.....	96
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	99
5. Eksperimentinio tyrimo matavimų rezultatų vertinimas	101
5.1. Gautų tyrimų rezultatų vertinimas matematiniais-statistiniais metodais.....	101
5.2. Temperatūros redukavimo koeficiento patikrinimas	107
5.3. Penktojo skyriaus išvados.....	109
Bendrosios išvados	111
Rekomendacijos	112
Literatūra	113
PRIEDAI	117

Priedas Nr. 1. Research on the Dependence of Asphalt Pavement Stiffness upon the Temperature of Pavement Layers.

Priedas Nr. 2. Warm Mix Asphalts research, Analysis and Evaluation.

Priedas Nr. 3. Klimato įtakos automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimai ir vertinimas.

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Daviklių atstumai nuo apkrovos pridėties centro.....	36
4.1 lentelė. Elektroniniu termometru TE-100 ir temperatūros davikliais, išmatuotos asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros reikšmės.....	90
4.2 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotos E_0 modulio reikšmės, taikant temperatūros redukcijos koeficientą.....	98
5.1 lentelė. Koreliacijos koeficiento reikšmės.....	101
5.2 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio deformacijos modulio E_0 ir asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros statistiniai parametrai.....	103
5.3 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio deformacijos modulio ir temperatūros asfalto pagrindo sluoksnyje statistiniai parametrai.....	104
5.4 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuoto deformacijos modulio ir temperatūros asfalto pagrindo sluoksnyje statistiniai parametrai.....	105
5.5 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotos deformacijos modulio reikšmės, pakeitus asfalto sluoksnio storius.....	106
5.6 lentelė. Statistiniai parametrai redukuoto deformacijos modulio reikšmių, perskaičiuotų su pakeistais asfalto sluoksnio storiais, matuotais 1,1 m nuo ašies kairėje kelio pusėje.....	109

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Dangos deformacijos slegiant automobilio ratui.....	13
1.2 pav. Kelio dangos konstrukcijos storiui pagal PJ-IBD metodą nustatymas.....	18
1.3 pav. Daugiasluoksnė danga.....	21
1.4 pav. Dvisluoksnė danga.....	21
1.5 pav. Nestandžios dangos storio nustatymas.....	22
1.6 pav. Vienalytė dangos konstrukcija.....	23
1.7 pav. CBR nustatymo įranga - laboratorinis įrenginys.....	26
1.8 pav. Statinė sija.....	28
1.9 pav. Deformacijos kreivė.....	28
1.10 pav. Benkelmano sijos schema.....	
1.11 pav. Apkrovimo poveikio linijos vaizdas: a) apkrauta matavimo vieta, b) matavimo vieta, pašalinus apkrovą.	30
1.12 pav. Benkelmano sija	32
1.13 pav. Lengvas krintančio svorio deflektometras LWD.	34
1.14 pav. Deflektometras Dynatest FWD 8000.....	34
1.15 pav. Krintančio svorio deflektometras FWD.....	36
1.16 pav. FWD veikiamos apkrovos ir susidariusio įlinkio schema.....	36
1.17 pav. Krintančio svorio deflektometro „Dynatest 8000” daviklių išdėstymo schema.....	37
1.18 pav. Krintančio svorio deflektometro schema.....	38
2.1 pav. Vidutinė metinė Saulės spindėjimo trukmė.....	41
2.2 pav. Vidutinė oro temperatūra Lietuvoje 1961 m. -1990 m. ir 2009 m.	42
2.3 pav. Vidutinis metinis vėjo greitis ir vyraujančios vėjo kryptys.....	43
2.4 pav. Vėjo rožės rugpjūčio mėnesį pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis.....	44
2.5 pav. Vėjo rožės gruodžio mėnesį pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis.....	44
2.6 pav. Vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje nuo 1961 m. iki 1990 m. ir 2009 m.....	45
2.7 pav. Didžiausias ir mažiausias grunto išalimo gylis centimetrais	47
2.8 pav. Vandens judėjimas dangos konstrukcijoje.....	52
2.9 pav. Vertikalus vandens kiekio pasiskirstymas.....	53
2.10 pav. Kelio konstrukcijos elgsena veikiant ir neveikiant klimato veiksniams.....	54
3.1 pav. Dangos konstrukcijos struktūros kitimas priklausomai nuo laiko ir temperatūros.....	56
3.2 pav. Provėžų ir plyšių atsiradimas kelio dangos konstrukcijoje dėl blogo vandens drenažo.....	57
3.3 pav. Vandens kiekio pokytis pagrindo sluoksnyje be rišiklio ir žemės sankasoje.....	57

3.4 pav. Vidutinis mėnesio drėgnio kiekis pagrindo sluoksnyje be rišiklio ties dangos konstrukcijos ašine linija ir važiuojamosios dalies kelkraščiu pasiskirstymas	58
3.5 pav. Temperatūros ir drėgnio daviklių įrengimo darbai.....	60
3.6 pav. Temperatūrinis savitosios varžos zondas.....	61
3.7 pav. Drėgnio kitimas priklausomai nuo gylio ir laiko, stebint nuo 2002 m. kovo 15 d.....	62
3.8 pav. Asfalto sluoksnio standumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros (COST 336 Report, 1997).....	65
3.9 pav. KOSIS matavimo stoties sudedamosios dalys.....	68
3.10 pav. KOSIS Didžiulio stotelės įrengimo vieta.....	69
3.11 pav. Aukščiausia kiekvienų metų rugpjūčio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose.....	69
3.12 pav. Žemiausia kiekvienų metų rugpjūčio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose.....	70
3.13 pav. Aukščiausia kiekvienų metų spalio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose.....	71
3.14 pav. Žemiausia kiekvienų metų spalio mėnesio asfalto sluoksnio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose.....	71
3.15 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros reikšmės asfalto dangos paviršiuje.....	72
3.16 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros reikšmės asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm nuo dangos paviršiaus)	73
3.17 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros reikšmės žemės sankasoje (125 cm nuo dangos paviršiaus)	73
3.18 pav. Kiekvienos dienos vidutinė oro temperatūra Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis.....	74
3.19 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje pasiskirstymas	75
3.20 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje (85 cm nuo dangos paviršiaus) pasiskirstymas.....	75
3.21 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio žemės sankasoje (130 cm nuo dangos paviršiaus)	76
3.22 pav. 12-toje dangos konstrukcijoje visuose dangos konstrukcijos sluoksniuose išmatuota temperatūra 2008 m. rugpjūčio mėn. 4 d.	77

3.23 pav. 12-toje dangos konstrukcijoje apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje 2009 m. spalio 14 d. išmatuotas drėgnis	78
4.1 pav. Bandomojo kelio ruožo schema.....	82
4.2 pav. 12-ta dangos konstrukcija su įrengtais temperatūros ir drėgmės davikliais.....	83
4.3 pav. Temperatūros daviklis „12-Bit Temperature Smart Sensor“	84
4.4 pav. Drėgnio daviklis „Soil Moisture Smart Sensor“	84
4.5 pav. Gręžimo darbai drėgnio ir temperatūros daviklių įrengimo vietoje.....	85
4.6 pav. Iškarta asfalto dangoje temperatūros ir drėgnio daviklių laidų nuvedimui nuo kelio vidurio į kelkraštį.....	85
4.7 pav. Pradiniai temperatūros ir drėgnio duomenys Hoboware programos lange.....	86
4.8 pav. Koreguoti temperatūros ir drėgnio duomenys Hoboware programos langas.....	87
4.9 pav. Eksperimentinio tyrimo 2009 m. rugpjūčio 4 d. matavimo schema.....	88
4.10 pav. Eksperimentinio tyrimo 2009 m. spalio 5 d. matavimo schema.....	89
4.11 pav. Elektroniniu termometru TE-100 asfalto dangos sluoksnių temperatūros ir davikliais išmatuotų asfalto dangos sluoksnių temperatūros reikšmių palyginimas.....	91
4.12 pav.. Kairės pusės asfalto dangos sluoksnių storiai.....	93
4.13 pav. Kairės pusės asfalto dangos sluoksnių storiai 0,9 m nuo krašto.....	94
4.14 pav. Bandomojo kelio ruožo 12-tos dangos konstrukcijos kairės pusės E_{kv} tamprumo modulio reikšmių kitimas priklausomai nuo dangos konstrukcijos matuojamo taško padėties (asfalto sluoksnio storio).....	95
4.15 pav. E_0 modulio reikšmės, gautos tyrimų metu.....	99
5.1 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių temperatūros 10 cm gylyje ir E_0 modulio reikšmių, gautų tyrimo metu, koreliacija.	101
5.2 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 reikšmių, išmatuotų tyrimų metu, patikimumo intervalai.....	102
5.3 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio deformacijos modulio, priklausomai nuo asfalto sluoksnio storio, patikimumo intervalai.....	103
5.4 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotų deformacijos modulio reikšmių, priklausomai nuo asfalto sluoksnio temperatūros, patikimumo intervalai.....	104
5.5 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotų deformacijos modulio reikšmių patikimumo intervalai.....	106
5.6 pav. Temperatūrinio redukcijos koeficiento priklausomybė nuo asfalto sluoksnio temperatūros 10 cm gylyje.....	106

Bendrosios teorinės nuostatos ir sąvokos

AASHTO – Amerikos valstybinių kelių ir transporto įstaigų asociacija (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Asfalto temperatūra (šiuo darbe) – dangos konstrukcijos temperatūra išmatuota 10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus.

CBR – Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis (angl. California Bearing ratio).

COST – Europos bendradarbiavimo mokslinių ir techninių tyrimų srityje programa (angl. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research), kuri koordinuoja europinio lygio nacionalinius tyrimus. Įsteigta tarpvyriausybiniu susitarimu 1971 m. vykusioje Europos valstybių Ministrų konferencijoje.

DYNATEST FWD 8000 – firmos Dynatest A/S gamybos deflektometras.

ELMOD – firmos Dynatest grafinėje kompiuterinėje programoje realizuota daugiasluoksnės dangos tiesinė tamprumo – plastiškumo teorija ir Odemark'o – Boussinesq'o metodologija (angl. Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design).

ESA – ekvivalentinių standartinių ašių skaičius (angl. Equivalent Standard Axle).

FWD – krintančio svorio deflektometras, kuriuo atliekami automobilių kelių dangų konstrukcijų įlinkių matavimai, veikiant trumpalaikiai dinaminei apkrovai (angl. Falling Weight Deflectometer).

KOSIS (RWIS – *Road Weather Information System*) – kelių oro sąlygų informacinė sistema;

LAKD – Lietuvos automobilių kelių direkcija;

Stipris – medžiagos, konstrukcijos ar jos elemento savybė priešintis išorinėms mechaninėms jėgoms.

Tamprumo modulis – matematinė objekto ar medžiagos elastinio deformavimo, veikiant išorinei jėgai, išraiška. Jis aprašomas įtempių ir deformacijų santykiu, medžiagai esant tamprumo deformacijų būvio ribose.

Įvadas

Planuojant automobilių kelių priežiūros darbus, atliekant automobilių kelių tiesimo, rekonstrukcijos ir taisymo projektų ekonominius vertinimus, nustatant jų prioritetus neišvengiamai susiduriama su būtinybe prognozuoti kelio dangos būklę. Dangu ilgaamžiškumas labai priklauso nuo kelio konstrukcijos stiprumo. Konstrukcijai didelę įtaką turi ne tik važiuojančių transporto priemonių poveikis, bet ir klimato sąlygos (oro temperatūra, krituliai, vėjo kryptis ir stiprumas ir kt.). Pagrindiniai klimato veiksniai, nuo kurių priklauso dangos darbas ir jos struktūros projektavimas, yra temperatūra ir krituliai. Paros ir sezoniniai temperatūros svyravimai (užšalimo ir atšilimo ciklai) skatina kelio dangos pažaidų susidarymą ir blogina žemės sankasos būklę. Drėgno periodo metu, sumažėjus žemės sankasos grunto stipriui, sumažėja ir visos dangos konstrukcijos stipris. Stiprio kaita nuo temperatūros ir drėgnio pokyčio yra gana didelė, ir tai labai pablogina kelio asfalto dangos konstrukcijos darbo sąlygas.

Dangos konstrukcijos stipris yra vienas iš pagrindinių kelio stipruminių rodiklių, lemiančių dangos konstrukcijos gebėjimą atlaikyti transporto priemonių eismo apkrovas. Daugelyje pasaulio šalių kelio dangos stiprio vertinimui yra naudojamas įlinkių matavimas krintančio svorio deflektometru. Išmatavus įlinkius galima greitai ir pakankamai tiksliai nustatyti dangos konstrukcijos stiprį ir jo kitimą.

Kadangi Lietuvoje yra sąlyginai mažai atlikta tyrimų, susijusių su temperatūros ar drėgnio įtaka kelio dangos konstrukcijos stiprio kitimui, todėl šiame darbe siekiama įvertinti klimato įtaką asfalto dangos konstrukcijos stipriui. Apžvelgiami asfalto dangos konstrukcijos stiprio nustatymo metodai, taikomi Lietuvoje ir kitose šalyse. Analizuojama asfalto dangos konstrukcijos elgsena Lietuvos klimato sąlygomis, nagrinėjami temperatūros redukavimo metodai taikomi Lietuvoje ir kitose šalyse. Darbe aprašomas atliktas eksperimentinis temperatūros įtakos asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimas.

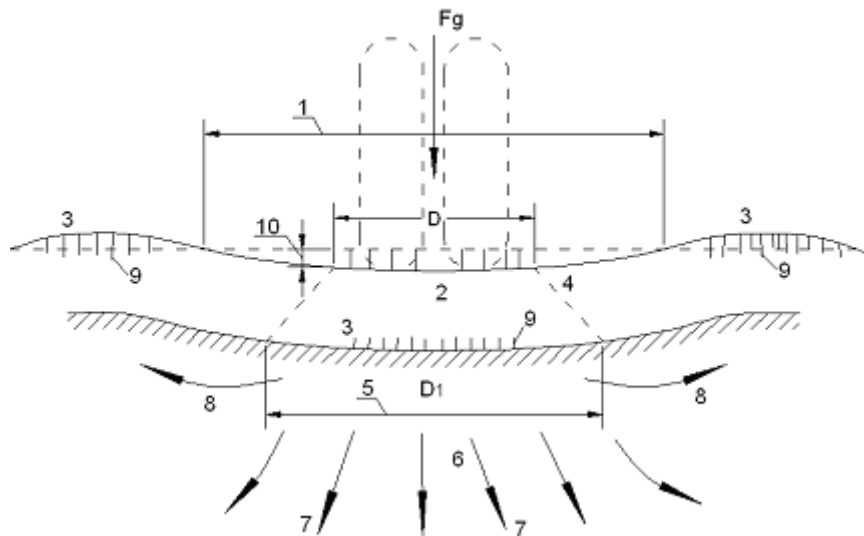
Eksperimentinio tyrimo metu atlikta temperatūros (dangos paviršiuje, 10 cm ir 125 cm gyliuose) ir drėgnio (53 cm, 85 cm ir 130 cm gyliuose) kiekvienos dienos pokyčių analizė, įvertinant jų įtaką kelio dangos konstrukcijai, bei nustatyta kelio dangos stiprio ir E_0 modulio priklausomybė nuo dangos temperatūros ir apkrovos, matuojant kelio dangos įlinkius krintančio svorio deflektometru skirtingu metų laiku. Tuo tikslu patikslintas temperatūros redukcijos koeficientas ir E_0 modulių reikšmės redukuotos priimtai standartinei temperatūrai. Tinkamai parinktas temperatūros redukcijos koeficiento panaudojimas leidžia krintančio svorio deflektometru nustatytas asfalto dangos sluoksnių standumo vertes redukuoti standartinei +20 °C temperatūrai.

1. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio vertinimas ir nustatymas

1.1. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio vertinimas

Sparčiai didėjantis eismo intensyvumas Lietuvos keliuose turėjo įtakos kelių tinklo plėtrai. Seniau tiesti keliai nebegali atlaikyti padidėjusių apkrovų ir yra nepritaikyti augančiam eismo intensyvumui, todėl reikia tyrimų, kurie įvertintų kelių būklę, jų stiprumą (Jazdauskas 2004).

Dangos stipris yra vienas iš pagrindinių kelio eksploatacinių rodiklių, lemiančių jo sugebėjimą atlaikyti apkrovas. Nuo dangos konstrukcijos stiprumo priklauso eismo sąlygos, kelio remonto išlaidos ir eksploatacijos trukmė. Pastaraisiais metais Lietuvos keliuose padidėjus transporto eismo intensyvumui, pagausėjus sunkiųjų transporto priemonių skaičiui, padidėjus šių transporto priemonių ašių apkrovoms, dangoje susidaro įvairių rūšių deformacijų, dangos tampa nelygios. Todėl labai svarbu, kad danga veikiama apkrovų kuo mažiau deformuotųsi ir apsaugotų žemiau esančius kelio konstrukcijos sluoksnius (Palšaitis *ir kt.* 1990). Asfalto dangos konstrukcijos stiprumą galima įvertinti pagal dangos įlinkį nuo apkrovos. Dangos deformacijos slegiant automobilio ratui pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Dangos deformacijos slegiant automobilio ratui

F_g – apkrova nuo rato; D – pėdsako apskritimo skersmuo; D_1 – žemės sankasos paviršiaus įlinkio apskritimo skersmuo; 1 – įlinkio zona; 2 – kelio dangos suspaudimo zona; 3 – dangos tempimo zona; 4 – dangos kirpimo linija; 5 – sankasos grunto slėgio zona; 6 – grunto tankėjimas; 7 – grunto suslėgimo kryptis; 8 – grunto išspaudimas; 9 – dangos plyšiai; 10 – dangos deformacija

Įtempiai nestandžiose dangose priklauso nuo dangos įlinkio. Kuo storesnė ir standesnė danga, tuo į didesnę plotą paskleidžiamas apkrovos slėgis ir tuo mažesni įtempiai susidaro sankasos grunte.

Kelio dangos stiprumas – tai kelio dangos atsparumas įtempiams ir deformacijoms nuo transporto apkrovų ir klimato sąlygų (Palšaitis 1995). Kelio dangos stiprumas vizualiai yra nepastebimas dydis. Tai ypač svarbus kelio dangos būklės diagnozavimo rodiklis. Įrengti naujus papildomus asfalto dangos sluoksnius labai brangu. Todėl informacija apie kelio dangos stiprumą padeda planuoti jos taisymo darbus, atsižvelgiant į transporto srauto intensyvumą ir jo sudėtį (Jazdauskas 2004).

Danga vadinama sustiprinta kelio važiuojamoji dalis, įrengta ant žemės sankasos ir vieno ar kelių įvairaus stiprio dangos pagrindo sluoksnių. Automobilių kelių dangos turi būti (Palšaitis *ir kt.* 1999):

- stiprios, t. y. jų mechaninis stiprumas turi atitikti eismo intensyvumą ir sudėtį;
- lygios, kad būtų patogų ir saugų važiuoti dideliais greičiais;
- šiurkščios, kad su jomis gerai sukibtų automobilio ratų padangos;
- ekonomiškos, t. y. dangų kaina ir išlaidos kelio eksploatacijai ir transportui turi būti kiek galima mažesnės;
- atitikti sanitarijos ir higienos reikalavimus (judėjimas be triukšmo, nedulkėjimas);
- mažai dilios, veikiant važiuojančių automobilių ratams;
- atsparios atmosferiniams veiksniams;
- estetiškos.

Visi šie rodikliai priklauso nuo pasirinkto dangos tipo bei jos konstrukcijos, eismo intensyvumo ir greičio, kelio reikšmės ir kt. Svarbiausi dangos rodikliai yra stiprumas ir nelygumas. Jeigu danga nepakankamai stipri, joje susidaro vėžės ir pralaužos, žymiai padidėja pasipriešinimas ratų riedėjimui, kartais danga pasidaro visiškai nebepravažiuojama. Važiuojant nelygia danga, nuo smūgių genda ne tik automobiliai, bet ir danga, o taip pat nuo to kenčia keleiviai ir pervežami kroviniai. Tadėl danga turi būti pakankamai stipri, kad joje nesusidarytų nei vėžių, nei kitų pažeidimų.

Dangos pagal bendrą konstrukcijos stiprį skirstomos į tipus: patobulintos ir pereinamojo tipo dangos.

Patobulintos dangos gali būti dvejopos:

- kapitalinio tipo;
- lengvesnio tipo (Laurinavičius 2004).

Kapitalinio tipo yra betono ir asfalto dangos, mozaikos ir tašyto akmens grindiniai. Tokios dangos yra labai stiprios, nes joms įrengti naudojamos geros kokybės akmens bei mineralinės rišančiosios medžiagos. Jos ilgai laikosi, jų eksploatacijos išlaidos yra nedidelės, bet įrengimas atsieina labai brangiai. Kapitalinio tipo dangos gali būti įrengiamos iš karto arba stadijomis.

Lengvesnio tipo dangos yra skaldos, žvyro ir tankių gruntų mišinių dangos, sustiprintos organinėmis arba mineralinėmis rišančiosiomis medžiagomis. Jos atlaiko mažiau intensyvių automobilių eismą, negu kapitalinio tipo dangos, ir automobiliai jomis gali patogiai važinėti ištisus metus. Jeigu šios dangos tvarkingai prižiūrimos ir remontuojamos, tai jos gali būti ilgą laiką naudojamos transportui.

Pereinamojo tipo dangos gali būti: skaldos, žvyro, stabilizuotų gruntų, grunto - skaldos, lauko ir skaldyto akmens. Šios dangos skiriamos nedidelio intensyvumo automobilių eismui, esant vidutiniam greičiui. Pereinamojo tipo dangos dažniausiai įrengiamos be rišančiųjų medžiagų (išskyrus stabilizuotų gruntų dangas). Jos neatsparios dilimui, neatitinka sanitarinių - higieninių reikalavimų. Kai kuriomis šio tipo dangomis (žvyro, grunto-skaldos) ne visais metų laikais patogų važiuoti. Po kurio laiko šios dangos gali būti sustiprintos (tada jos dažniausiai naudojamos kaip pagrindas tobulesnei dangai). Įrengti pereinamojo tipo dangas yra gana nebrangu, bet gana daug kainuoja remontas ir priežiūra. Žemesnio tipo dangomis eismas gali vykti tik sausu metų laiku, be to, jos labai dulka. Tokios dangos daugiausia daromos vietinės reikšmės keliuose (Palšaitis *ir kt.* 1999).

Pagal KPT SDK 07 dangos konstrukcijos skirstomos į septynias dangos konstrukcijos klases: SV, I, II, III, IV, V, VI. Dangos konstrukcijos klasė parenkama pagal projekcinę apkrovą A – ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičiaus sumą.

Asfalto dangų konstrukcijos parenkamos pagal dangos konstrukcijos klasę. Visose dangų konstrukcijose žemės sankasos deformacijos modulis turi būti ne mažesnis kaip 45 MPa, išskyrus dangos konstrukcijas su žvyro danga. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio deformacijos modulis turi būti (80-120) MPa, skaldos ar žvyro pagrindo sluoksnio deformacijos modulis turi būti (120-150) MPa, jų stiprumas priklauso nuo dangos konstrukcijos klasės. Tipinės asfalto dangų konstrukcijos yra pateiktos Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse KPT SDK 07. Asfalto dangos stipris Lietuvoje nėra reglamentuojamas.

1.2. Automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo ir vertinimo metodų apžvalga

Automobilių kelių danga įrengiama įvairių sąlygų vietovėse, kuriose skiriasi žemės sankasų gruntų savybės, nevienodos vietovės drėkinimo sąlygos. Todėl dažnai dangos konstrukcija visame kelio ruože parenkama atsižvelgiant į panašiose sąlygose įrengtos dangos, kurioje eksploatacinės savybės ir stabilumas yra tinkami ilgą laikotarpį, ruožus. Tačiau toks kelių dangos projektavimas pagal eksploatacinį patyrimą nėra efektyvus ekonominiu požiūriu. Dangų projektavimo metoduose svarbią reikšmę turi grunto stipris, tačiau kai kuriuose iš jų, neatsižvelgiama į automobilių ratų apkrovos pasikartojantį poveikį dangai, nekreipiamas dėmesys į horizontaliąsias jėgas viršutiniuose dangos sluoksniuose (Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas 2001). Projektavimo metoduose yra reikalaujama, kad eismas būtų išreikštas automobilio apkrova į ašį arba ekvivalentinių standartinių ašių skaičiumi. Ketvirtuo laipsnio priklausomybė ašies apkrovimo duomenų išraiškai ESA yra naudojama daugelyje Europos ir Pasaulio šalių.

Šiame skyriuje yra trumpai apžvelgiama kai kurių Europos ir pasaulio šalių automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodai ir plačiau aprašomi vieni iš svarbiausių metodų, kurie taikomi ir Lietuvoje:

- 1) AASHTO metodikos;
- 2) DORNII metodas;
- 3) CBR metodas.

Belgijoje kelio dangų projektavimo modelis grindžiamas daugiasluoksnės sistemos, susidedančios iš mechanškai homogeninių ir izotropinių sluoksnių, teorija. Yra siekiama išvengti asfalto dangos nuovargio ir struktūrinių sluoksnių deformacijų. Taikant šį metodą reikia žinoti: medžiagų savybes, klimato įtaką ir transporto eismo apkrovas.

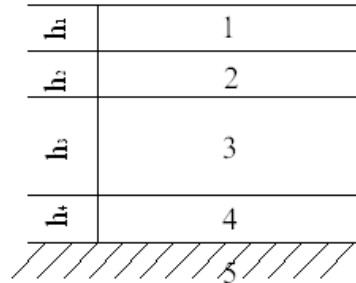
Suomijoje projektavimo metodas yra pusiau empirinis, pagrįstas Odemarko teorija. Kiekviename sluoksnyje turi būti žinomas medžiagos tamprumo modulis ir sluoksnio storis. Iš pradžių skaičiuojami tamprumo moduliai nuo statinės apkrovos, po to įvertinant sluoksnių storius ir medžiagas. Tipiniai tamprumo modulio dydžiai yra tokie: skaldytai uolai – 300 MPa, žvyrai – 200 MPa, maišytam žvyrai – 100 MPa, smėliui – 50 MPa ir moliui – 10 MPa. Asfalto tipinė tamprumo modulio reikšmė yra 2500 MPa. Taikant šį projektavimo metodą yra nagrinėjama dvisluoksnė kelio danga. Jei yra daugiau nei du sluoksniai, laikomoji galia skaičiuojama dviem žemiausiems sluoksniams, po to sekančiam sluoksniui ir taip kol

gaunama visos dangos konstrukcijos laikomoji galia. Kelio dangos konstrukcijos projektavimui yra nustatomas ekvivalentinių standartinių ašių skaičius (ESA). Keliai yra klasifikuojami į 6 klases naudojantis ESAL sistema. Kiekvienai kelių klasei yra nurodoma tam tikra laikomoji galia. Pradedant žemės sankasa, medžiagos ir sluoksnių storiai projektuojami tokie, kurie leidžia pasiekti nurodytą laikomąją galią. Yra pateikiamas minimalus šalčiui atsparus sluoksnių storis priklausomai nuo žemės sankasos, šalčio indekso bei drenažo būklės.

Prancūzų dangų projektavimui naudojamas tiesinis, daugiasluoksnis plastiškumo modelis apskaičiuoti tempimo įtempimus ir deformacijas surištų sluoksnių apačioje bei vertikalias gniuždymo deformacijas nesurištų sluoksnių viršuje, sukeltas 130 kN ašies apkrovos į dangą. Skaičiavimai yra atliekami ekvivalentinėje 15 °C temperatūroje, kuri laikoma kaip vidutinė temperatūra. Sluoksnių storis parenkamas taip, kad apskaičiuoti įtempiai ir deformacijos neviršytų leistinų reikšmių kiekviename sluoksnyje. Šie leistini įtempimai ir deformacijos pasirinkti atsižvelgiant į medžiagos nuovargio savybes, dangos irimo riziką, sankasos laikomąją galią ir pataisos koeficientą. Irimo rizika priklauso nuo eismo, bet visuomet mažesnė negu 50 %. Esama keturių žemės sankasos laikomosios galios klasių. Pataisos koeficientas nustatomas iš daugybės dangų eksploatacinių savybių stebėjimų. Dangos projektuojamos 15 metų arba 20 metų eksploatacijos trukmei priklausomai nuo eismo intensyvumo.

Danijos kelių dangos projektavimo metodas paremtas analitinėmis ir empirinėmis lygtimis. Pagal šį metodą kiekvienai kelio dangos medžiagai yra taikomi tam tikri tamprumo parametrai, o didžiausias dėmesys skiriamas naudojamų medžiagų savybėms. Tiesiamų kelių ruožai yra bandomi naudojant statinę siją tam, kad būtų nustatyti kiekvieno pagrindo sluoksnio ir sankasos grunto deformacijos moduliai. Yra patikrinami bet kokie nuokrypiai nuo standartinių dydžių ir nustatomas kiekvieno tipo medžiagos nevienalytiškumas. Bandymo metu yra surandamos silpnos kelio dangos konstrukcijos vietos ir visas kelias padalinamas į struktūriniu požiūriu vienodus ruožus, kuriems būdingas skirtingas sankasos ir pagrindo burių medžiagų atsparumas. Visi sluoksniai apskaičiuojami taip, kad visą tarnavimo laiką atlaikytų jiems tenkančias apkrovas važiuojant standartiniams sunkvežimiams, kurio vienas ratas sukelia 50 kN svorio apkrovą į dangą. Pirmame projektavimo etape kuriamas kelio dangos projektas įprastomis numatomų naudoti medžiagų savybėmis. Antrajame etape iš naujo analizuojant kelio konstrukciją yra naudojami vietoje atlikti matavimai, todėl atsižvelgiama į nuokrypius nuo standartinių dydžių ir konkrečiam keliui sukuriamas tikslesnis kelio dangos konstrukcijos projektas (Staged pavement design, a Danish construction practice 1995).

Lenkijoje projektuojant automobilių kelių dangas yra naudojamas PJ-IBD metodas, parengtas Varšuvos kelių ir tiltų tyrimų institute. PJ-IBD metodo modelis, pagal kurį konstruojama danga, parengtas taikant prielaidą, kad danga sudaryta iš keturių sluoksnių 1.2 pav.



1.2 pav. Kelio dangos konstrukcijos storiui pagal PJ-IBD metodą nustatymas

Čia: 1 – medžiagų, apdorotų organiniais rišikliais, sluoksnis; 2 – viršutinis pagrindo sluoksnis; 3- apatinis pagrindo sluoksnis; 4 – papildomas pagrindo sluoksnis; 5 – žemės sankasos gruntas.

Visos dangos konstrukcijos storis apskaičiuojamas pagal tokias formules:

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1.1)$$

$$h_1 = 3 \cdot a \cdot b_1, \quad (1.2)$$

$$h_2 = 15 \cdot a \cdot b_2 \cdot c \cdot d_1, \quad (1.3)$$

$$h_3 = 10 \cdot a \cdot b_3 \cdot c \cdot d_2 \cdot e, \quad (1.4)$$

čia: a – koeficientas, apibūdinantis kelio eismą; b_1 – koeficientas nustatomas atsižvelgiant į asfalto mišinio, naudojamo dangos viršutiniam sluoksniui, rūšį; b_2 ir b_3 – koeficientai nustatomi atsižvelgiant į medžiagų, naudojamų h_2 ir h_3 sluoksniams, rūšį ir kokybę; b_4 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į h_4 sluoksnio medžiagą ir jo įrengimo būdą; c – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į automobilio rato didžiausią apkrovą; d_1 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į sankasos grunto rūšį; d_2 – koeficientas, nustatomas atsižvelgiant į sankasos grunto rūšį, būklę ir vandens poveikio sąlygas; e – koeficientas, kuriuo apibūdinamos įvairių regionų klimatinės sąlygos.

Kiekvienas dangos konstrukcijos sluoksnis įvertinamas tam tikrais koeficientais nuo kurių priklauso visas dangos konstrukcijos storis. Koeficientai parenkami iš lentelių arba diagramų. Tarkime viršutinio dangos konstrukcijos sluoksnio storis h_1 priklauso nuo eismo intensyvumo ir asfalto mišinio rūšies, naudojamo viršutiniam asfalto sluoksniui. Kiti dangos konstrukcijų storiai atitinkamai priklauso nuo tam tikrų parametrų (Pokac, C. IO. *ir kt.* 1983).

Šiuo metu Lietuvoje projektuojant automobilių kelių dangas vadovaujamasi skirtingomis metodikomis: amerikietiška AASHTO metodika bei rusiškos VSN 46-83 automobilių kelių instrukcijos pagrindu DORNII sukurtą dangų projektavimo metodika.

AASHTO metodika

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) metodika yra grindžiama empirinėmis priklausomybėmis, sudarytomis remiantis AASHTO kelių tyrimo rezultatais. Projektuojama tam tikram ekvivalentinių 80 kN svorio ašių apkrovų (ESA) skaičiui bei kelio eksploatacinio tinkamumo indekso pokyčiui. Šioje metodikoje yra vertinama ir atsižvelgiama į: netikrumą, kad kelio danga pasieks savo projektinę gyvenimo trukmę; standartinės eismo intensyvumo apkrovos bei eksploatacinės kokybės paklaidas; iškylas nuo šalčio; brinkimą ir kelio drenažą. Tam, kad suprojektuota danga atlaikytų numatomas eismo apkrovas, nustatomas reikalingas kelio dangos konstrukcijos modifikuotas stiprio rodiklis SNC ir apskaičiuojami atskirų sluoksnių storiai naudojant sluoksnių ekvivalentiškumą.

Lietuvoje šią metodiką naudoja VĮ „Transporto ir kelių tyrimo institutas“. Viena iš AASHTO projektavimo metodikos nagrinėjamų klausimų yra konstrukcijos stiprumo vertinimas.

Dangos konstrukcijos stiprumo nustatymui naudojama dinaminė apkrova ir įlinkio dubens matavimai. Tai atliekama tokiais metodais:

- dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių nustatymo metodas;
- tiesioginio konstrukcijos stiprumo nustatymo metodas.

Abu metodai apibūdinami tais pačiais dydžiais, t.y. efektyviu struktūriniu atsparumu SCN_{eff} , todėl pasirenkant vieną iš jų reikia žinoti kiekvieno metodo privalumus ir trūkumus.

Tarkime, danga yra apkrauta dinamine apkrova. Apkrova dangos konstrukcijoje pasiskirsto dubens pavidalo zonomis. Zonos nuolydis keičiasi kiekviename dangos sluoksnyje priklausomai nuo sluoksnio medžiagos santykinio stiprumo ar tamprumo modulio. Moduliui didėjant įtempimai pasiskirsto didesniame plote ir gaunama įlinkių diagrama. Svarbus yra atstumas nuo apkrovos, kuriame įtempimų zona kerta žemės sankasos ir apatinio pagrindo sluoksnio sąlyčio liniją. Matuojant įlinkių dubenį, bet kuris dangos paviršiaus įlinkis ties ar už apkrovos yra sukeltas tik žemės sankasoje susidariusių įtempimų. Todėl išoriniai įlinkių dubens parodymai, veikiant dinaminei apkrovai atspindi žemės sankasos savybes. Kiekvienam dangos tipui yra nustatytas minimalus atstumas, kuriame išdėstomi įlinkio davikliai, tam kad užtikrinti jog įlinkiui neturės įtakos viršutiniai dangos sluoksniai. Taikant dangos sluoksnių tamprumo modulių nustatymo metodą, išmatuojamas įlinkių dubuo ir apskaičiuojami visų sluoksnių tamprumo moduliai.

Tiesioginis konstrukcijos stiprumo nustatymo metodas grindžiamas tuo, kad suminis stiprumas, priklausantis nuo kiekvieno sluoksnio tamprumo modulio ir sluoksnio storio,

nusako bendrą dangos konstrukcijos stiprumą. Maksimalus įlinkis apkrovos centre yra apibūdinamas kaip dviejų skirtingų dangos parametrų rezultatai:

- dangos konstrukcijos stiprumo;
- žemės sankasos grunto deformacijos modulio.

Todėl yra teigiama, kad dangos konstrukcijos stiprumas yra maksimalaus įlinkio ir žemės sankasos deformacijos modulio funkcija.

Kelio dangos konstrukcijos modifikuoto stiprumo rodiklio (SNC) nustatymas naudojant AASHTO metodiką

Atlikus dangos įlinkių matavimus apskaičiuojami atskirų dangos sluoksnių tamprumo bei žemės sankasos deformacijos moduliai. Pagal apskaičiuotus tamprumo modulius yra nustatomas atskirų sluoksnių stiprio rodiklis a .

Žemės sankasos deformacijos modulio ir Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklio (CBR) priklausomybė išreiškiama Emery formule:

$$E_{sg} = 41,19 \cdot CBR^{0,385}, \quad (1.5)$$

Čia: E_{sg} – žemės sankasos deformacijos modulis, MPa;
CBR – Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis.

Visų dangos konstrukcijos sluoksnių stiprio rodiklis SN apskaičiuojamas pagal formulę:

$$SN = 0,0394(a_1 \cdot H_1 + a_2 \cdot H_2 \cdot d_2 + a_3 \cdot H_3 \cdot d_3 + a_n \cdot H_n \cdot d_n) = 0,0394 \sum_{i=1} a_i \cdot H_i \cdot d_i, \quad (1.6)$$

Čia: a_i – i -ojo sluoksnio stiprio rodiklis;
 H_i – i -ojo sluoksnio storis, mm;
 d_i – i -ojo sluoksnio drenavimo koeficientas;
 n – dangos konstrukcijos sluoksnių skaičius.

Sankasos grunto stiprumo rodiklis (SNSG) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$SNSG = 3,51 \log CBR - 0,85(\log CBR)^2 - 143; \quad (1.7)$$

Taigi kelio dangos konstrukcijos modifikuotas stiprumo rodiklis yra:

$$SNC = SN + SNSG, \quad (1.8)$$

DORNII metodas

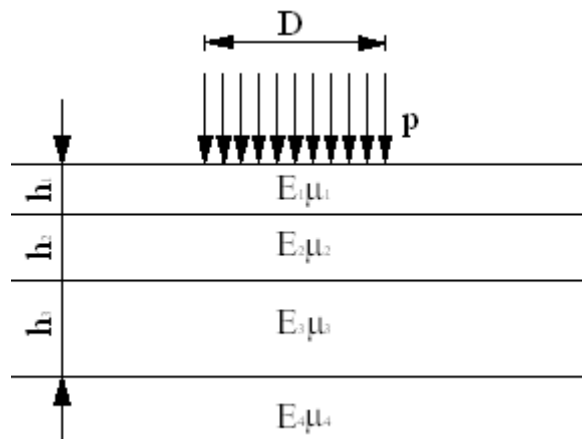
Projektuojant nestandžias dangas pagal tamprųjų įlinkių Lietuvoje yra taikomas DORNII metodas. Šiame metode įvertinami labai svarbūs aplinkos veiksniai (temperatūra, krituliai, vietovės drėkinimo sąlygos), kurie turi didelę įtaką automobilių kelių dangoms. Kelio dangos stiprumas ir stabilumas nustatomas pagal tris kriterijus:

- 1) leidžiamąjį tamprų įlinkį;
- 2) šlyties atsparumą grunte ir silpnai rišlių medžiagų sluoksniuose;
- 3) monolitinių sluoksnių atsparumą tempimui lenkiant.

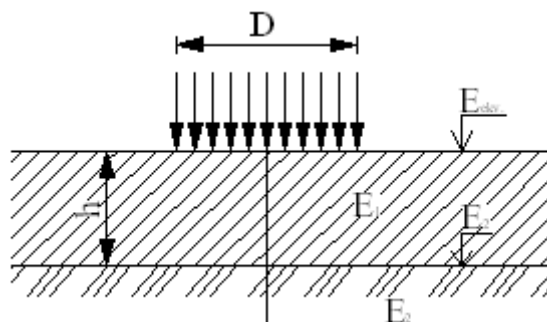
Dangos tamprusis įlinkis

Pagal DORNII metodą svarbiausias dangos stiprio rodiklis yra leistinasis tamprusis įlinkis. Kelio dangoje, kuri tenkina šią sąlygą, turi būti užtikrinti nerišlių medžiagų sluoksnių atsparumas šlyties deformacijoms, monolitinių sluoksnių leistinasis atsparumas tempimui lenkiant, visos dangos leistinosios netolygios iškylos žiemos metu, patikimas vandens nuleidimas iš poringų dangos pagrindo medžiagų.

Nustatant įtempimų skirstinį bei vertikaliąsias deformacijas daugiasluoksnėje dangoje yra labai sudėtinga, todėl dažniausiai nagrinėjama dvisluoksnė danga.



1.3 pav. Daugiasluoksnė danga



1.4 pav. Dvisluoksnė danga

Lyginant įvairių konstrukcijų dangas pagal stiprį, jos apibūdinamos bendroju (ekvivalentiniu) tamprumo modeliu, t. y. modeliu tokios puserdvės, kurioje veikiant projektinei apkrovai, susidaro tokia pat deformacija, kaip ir daugiasluoksnėje dangoje.

Kelio dangos vienaarūšės puserdvės ekvivalentinis tamprumo modelis, kai deformacijos šioje dangoje nuo projekcinės apkrovos neviršija tam tikrų pasirinktų dydžių, gali būti nustatytos, kai slegianti apkrova tolygiai paskirstyta D skersmens pėdsako plote:

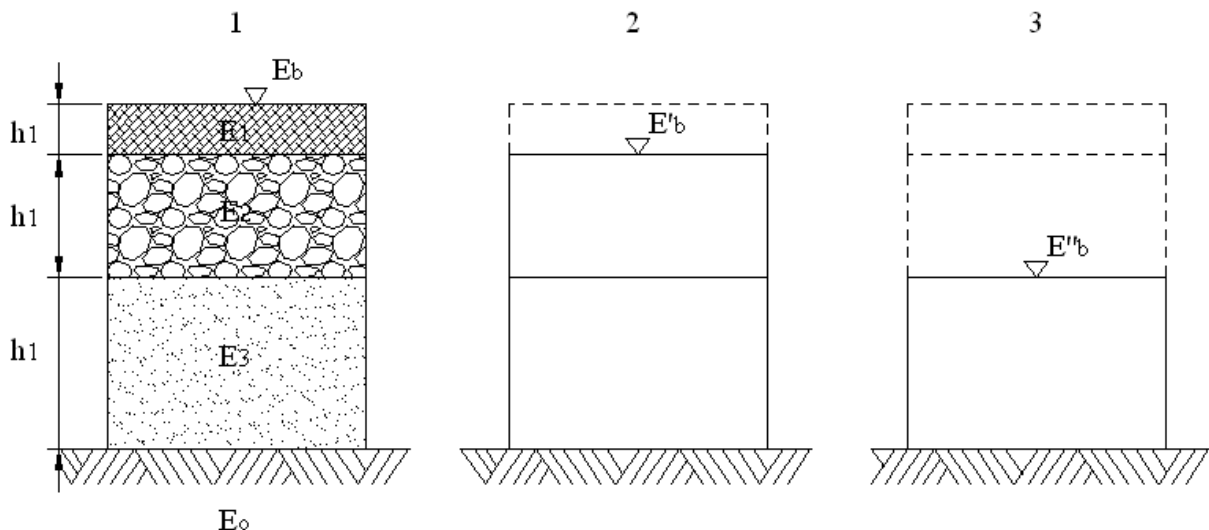
$$E_{ekv} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{l}, \quad (1.9)$$

čia: p – automobilio rato slėgis į dangą; μ – Puasono koeficientas; l – leistinoji tamproji deformacija, projektuojant dangą taikoma atsižvelgiant į dangos konstrukciją ir eismo intensyvumą.

Projektuojant kelio dangos konstrukciją turi būti išpildyta sąlyga:

$$E_{ekv,R} \leq E_{ekv,P}, \quad (1.10)$$

čia: $E_{ekv,R}$ – reikalingas projektuojamos dangos konstrukcijos ekvivalentinis tamprumo modulis, MPa; $E_{ekv,P}$ – suprojektuotos dangos konstrukcijos ekvivalentinis tamprumo modulis, MPa. (Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas 2001).



1.5 pav. Nestandžios dangos storio nustatymas (Palšaitis 1999)

čia: 1 – dangos konstrukcija ir jos sluoksnių projektiniai rodikliai; 2 – schema bendrajam (ekvivalentiniam) tamprumo moduliui E'_b po viršutiniu sluoksniu esančiai dangos sandarai nustatyti; 3 – schema pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos grunto bendrajam (ekvivalentiniam) tamprumo moduliui nustatyti.

Žinant visos dangos bendrąjį tamprumo modulį E_b iš dvisluoksnės dangos ekvivalentiniam tamprumo moduliui nustatyti nomogramos nustatomas visų sluoksnių, esančių po viršutiniu sluoksniu, tai yra pagrindo (E_2) ir apatinio (E_3) sluoksnių ir sankasos grunto (E_0) bendrasis tamprumo modulis E'_b .

Dangos stabilumas šlyčiai

Kelio dangos sluoksniuose, kurie yra iš nerišlių medžiagų, taip pat žemės sankasos grunte, veikiant automobilio apkrovai, neturi medžiagos poslinkio reiškinių, sukeliančių dangos deformacijas.

Žemės sankasos atsparumas šlyčiai bus užtikrinamas tada, kai didžiausi aktyvieji šlyties įtempiai $\tau_{aktyv, \max}$ neviršys leistinųjų įtempių: τ_{leist} :

$$\tau_{aktyv, \max} = (\tau_{aktyv} \pm \tau_B) \leq \tau_{leist} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot c, \quad (1.11)$$

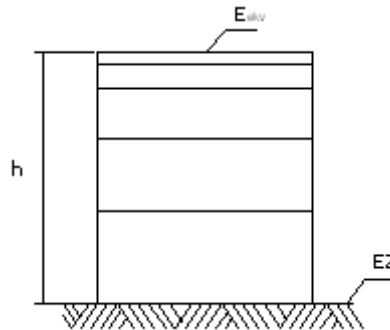
čia: τ_{aktyv} - aktyvieji šlyties įtempiai; τ_B - papildomi aktyvieji įtempiai; τ_{leist} - leistinieji įtempiai; k_1 – grunto sankibos sumažėjimas nuo trumpalaikės kintamos dinaminės apkrovos, k_2 – koeficientas, įvertinantis kelio tiesimo technologijų procesų pažeidimą ir nepalankias aplinkos sąlygas, k_3 – koeficientas, įvertinantis skirtingų gruntų darbą kelio konstrukcijoje; c – grunto sankiba.

Aktyviesiems šlyties įtempiams įtakos turi dangos konstrukcijos svoris virš skaičiuojamojo sluoksnio. Todėl įvedama pataisa:

$$\tau_B = 10^{-10} \cdot (5 - 0,3 \cdot \varphi) \cdot h, \quad (1.12)$$

čia: τ_B - papildomi aktyvieji įtempiai.

Nustatant šlyties įtempius, daugiasluoksniė dangos konstrukcija virš žemės sankasos, priimama kaip vienalytė h storio konstrukcija.



1.6 pav. Vienalytė dangos konstrukcija

Vienalytės dangos konstrukcijos tamprumo modulis E_{ekv} :

$$E_{ekv} = \frac{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2 + \dots E_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots h_n}, \quad (1.13)$$

čia: $E_1, E_2 \dots E_n$ dangos sluoksnių, kurių storis atitinkamai $h_1, h_2 \dots h_n$, esančių virš nagrinėjamojo, tamprumo moduliai.

Iš nomogramų nustatomi aktyvieji šlyties įtempiai nuo vienetinės apkrovos τ_a ir aktyvieji įtempiai, atsirandantys nuo dangos savojo svorio τ_d . Tada paskaičiuojami leistini šlyties įtempiai pagal formulę:

$$\frac{[\tau]}{\tau} \geq k_{st}, \quad (1.14)$$

čia: k_{st} – stiprio koeficientas; τ – didžiausi aktyvieji šlyties įtempiai; $[\tau]$ – leistinieji aktyvieji šlyties įtempiai. Jei nerišlių medžiagų sluoksnių ir sankasos grunto stabilumas šlyčiai nepakankamas, tai reikia padidinti sluoksnių storį arba E_{ekv} , [42].

Dangos monolitinių sluoksnių stabilumas

Veikiant automobilių apkrovai, danga įlinksta ir jos kai kuriuose sluoksniuose gali atsirasti plyšius sukeliantieji tempimo įtempiai. Tempimo įtempiai monolitinių medžiagų sluoksnyje σ_t , esančiame ant tamprios puserdvės, apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot k_1 \cdot p \cdot h}{\pi \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \frac{h_e}{D} \right) \cdot \arctg^2 \frac{D}{h_e}, \quad (1.15)$$

p – automobilio rato slėgis; k_1 – dinaminio apkrovos poveikio ir nevienodų dangos veiklos sąlygų atsargos koeficientas; h_e – ekvivalentinis dangos storis; h – dangos storis; E_1 – dangos tamprumo modulis; E_b – bendrasis tamprumo modulis sluoksnių esančių po dangos monolitinais sluoksniais; D – rato pėdsako skersmuo.

Monolitinių sluoksnių stabilumas nustatomas taip:

$$k_{st} = \frac{R_l}{\sigma_t}, \quad (1.16)$$

čia: k_{st} – stiprio koeficientas; R_l – ribiniai leidžiamieji sluoksnio medžiagos tempimo įtempiai, įvertinant nuovargio reiškinius; σ_t – tempimo įtempiai nagrinėjamame sluoksnyje.

Tempimo įtempiai viename ar keliuose monolitinių medžiagų sluoksniuose, kai jie yra dangos paviršiuje nustatomi pagal viršutinio monolitinio dangos sluoksnio tempimo įtempių, atsirandančių vienetinei apkrovai jį lenkiant, nomogramą. Kai monolitinis sluoksnis yra dangos viduryje, tai tempimo įtempiai nustatomi pagal tarpinio monolitinio dangos sluoksnio tempimo įtempių nomogramą.

Atsparumo sąlyga išreiškiama tokia sąlyga:

$$\sigma_{\max} \leq R_s, \quad (1.17)$$

čia: $\sigma_{\max}$ – skaičiavimo būdu nustatyti maksimalūs skaičiuojamojo sluoksnio lenkimo tempimo įtempiai; R_s – skaičiuojamojo sluoksnio medžiagos ribinis įtempis.

Suminiai tempimo įtempiai apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_{\max} \cdot p \cdot k_1, \quad (1.18)$$

čia: $\sigma_{\max}$ – suminiai tempimo įtempiai; $\sigma'_{\max}$ – tempimo įtempiai nuo vienetinės apkrovos; p – automobilio rato slėgis; k_1 – dinaminio apkrovos poveikio ir nevienodų dangos veikos sąlygų atsargos koeficientas.

$$R_s = R \cdot (1 - t \cdot \gamma) k_y \cdot k_m, \quad (1.19)$$

čia: R_s – leistinieji tempimo įtempiai; R – dangos sluoksnio medžiagos vidutinis atsparumas tempimui lenkiant ($R = 4$ MPa); t – norminis nuokrypio koeficientas taikomas atsižvelgiant į numatytą projektinio patikimumo lygį ir kelio kategoriją; γ – variacijos koeficientas; k_m – dangos sluoksnio medžiagos stiprio sumažėjimo dėl aplinkos veiksnių įtakos koeficientas; k_y – nuovargio koeficientas, priklausantis nuo eismo intensyvumo dangos sluoksnio medžiagos rūšies tipo.

Patikrinama ar leistina sąlyga:

$$\frac{R_s}{\sigma_{\max}} \geq k_{st}, \quad (1.20)$$

čia: R_s – leistinieji tempimo įtempiai; $\sigma_{\max}$ – suminiai tempimo įtempiai; k_{st} – kelio dangos stiprio koeficientas.

Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis (CBR metodas)

Kalifornijos santykinio atsparumo rodiklis (California Bearing Ratio) metodas parengtas JAV AASHTO (the American Association of State Highway and Transportation Officials) tyrimais ir Asfalto instituto darbais. Šis metodas taikomas JAV, Anglijoje, Prancūzijoje, Lenkijoje ir kitose šalyse.

Kelio dangos konstrukcijos parinkimas pagal ekvivalentinių storių dangų konstrukcijų grafikus, kurie sudaryti remiantis informacija apie eksploatuojamų kelių funkcionavimą ir specialiai įrengtų eksperimentinių kelių (ruožų) tyrimų rezultatais. Atsižvelgiant į paros transporto eismo intensyvumą ar į bendrą transporto eismo intensyvumą per tarpremontinį periodą nustatomas reikalingas dangos konstrukcijos storis. Parenkant atskirų dangos konstrukcijos sluoksnių storius taikomi skirtingų medžiagų sluoksnių storių pervedimo į ekvivalentinio storio dangos konstrukciją koeficientai. Projektuojant šiuo metodu kelio dangos konstrukcijos sluoksnių stiprumas apibrėžiamas CBR arba Kalifornijos santykinio atsparumo rodikliu (California Bearing Ratio).

Tyrimais nustatyta dangos storio priklausomybė nuo tam tikro svorio automobilių poveikio, o taip pat nuo žemės sankasos grunto atsparumo. Dangos storis pagal šį metodą nustatomas atsižvelgiant į:

- žemės sankasos grunto atsparumą, apibūdinama rodikliu CBR;
- eismo poveikį dangai, jį perskaičiavus į vadinamuosius lyginamuosius automobilius;
- įvairiems dangos konstrukcijos sluoksniams naudojamų medžiagų savybes;
- dangos eksploatavimo iki kapitalinio remonto laikotarpį.

CBR yra apkrovos p , kuria 5 cm skersmens 20 cm² skerspjuvio štampos išspaudžiamas į atitinkamai paruošto grunto bandinį iki tam tikro gylio (2,5 mm arba 5,0 mm),

santykis su standartine apkrova p_s , kuri yra pastovus dydis ir nustatoma, kai toks pat šampas iki to paties gylio įsminga į etaloninę medžiagą – standartiniai sutankintą skaldą.

Žemės sankasos grunto stiprumas nustatomas formule:

$$CBR = \frac{P}{p_s} \cdot 100\%, \quad (1.21)$$

Apkrova p_s yra tokia: kai šampą reikia išpausti 2,5 mm – 7,0 MPa, o kai 5,0 mm – 10,45 MPa. CBR nustatymo įrangos pavyzdžiai pateikti 1.7 pav.



a)

1.7 pav. Grunto CBR nustatymo įranga - laboratorinis įrenginys

Įvairių tipų automobilių eismo įtaka kelio dangai įvertinama lyginamojo automobilio poveikiu. Lyginamuoju automobiliu laikomas sunkvežimis, kurio galinės ašies apkrova yra 80 kN arba dviejų galinių ašių apkrova – 145 kN.

Visas dangos konstrukcijos storis nustatomas pagal formulę:

$$H = h_1 + h_2 + h_3, \quad (1.22)$$

čia : h_1 – dangos viršutinio sluoksnio storis, cm; h_2 – dangos pagrindo viršutinio sluoksnio storis, cm; h_3 – dangos pagrindo apatinio sluoksnio storis, cm.

Reikalingas dangos konstrukcijos storis H_r nustatomas atsižvelgiant į kelio transporto eismo intensyvumą, rodiklį CBR ir į dangos eksploatavimo laikotarpį T :

$$H_r \leq H_{proj.}, \quad (1.23)$$

$$H_{proj.} = x \cdot h_1 + y \cdot h_2 + z \cdot h_3, \quad (1.24)$$

čia: x, y, z – naudojamų medžiagų savybes apibūdinantys koeficientai.

Projektuojant dangą pagal CBR metodą pagrindinis dėmesys yra skiriamas gruntų ir

kitų apatinių sluoksnių medžiagų savybėms nustatyti (Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas 2001).

1.3. Automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stiprio nustatymo metodai

Pastaraisiais metais Lietuvoje kelių priežiūros didžiausios problemos yra susijusios su sunkiasvorio transporto skaičiaus augimu ir kelių ūkio nepakankamu finansavimu. Automobilių keliai dangos konstrukcijos stiprumą nėra pritaikyti atlaikyti labai ženkliai padidėjusį sunkiasvorio transporto eismą ir didėjančias jų ašių apkrovas, todėl pastaruoju metu mūsų kelių danga patiria pernelyg didelį ardymo poveikį, net tada, kai visų transporto priemonių sraute yra santykinai nedaug sunkiasvorio transporto. Nuo važiuojančių kelių transporto priemonių skaičiaus ir jų ašinių apkrovų dydžio bei transporto priemonių bendrosios masės priklauso dangos būklė ir ilgaamžiškumas. Didesnės ašinės apkrovos sparčiau blogina dangos būklę – atsiranda plyšiai, duobės, vėžės, sparčiau vyksta asfalto dangos erozija. Ypač pavojingos ašinės apkrovos viršijančios leistinas projektines ašines apkrova (Čygas *ir kt.* 2007). Atsiranda poreikis tyrimams, kurie įvertintų kelių būklę, jų stiprumą.

Kelių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymui Lietuvoje šiuo metu naudojama:

- 1) statinė sija;
- 2) Benkelmano sija,
- 3) dinaminiai prietaisai:
 - a) lengvas dinaminis prietaisas;
 - b) lengvas krintančio svorio deflektometras LWD;
 - c) krintančio svorio deflektometras FWD.

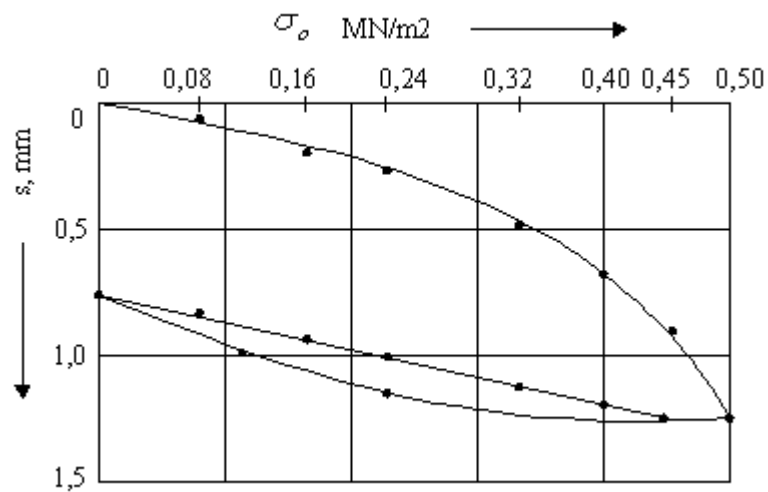
Statinė sija

Matuojant statinę sija dangos konstrukcijos sluoksnius spaudimo plokšte laipsniškai apkraunamas ir nukraunamas (1.8 pav.).



1.8 pav. Statinė sija

Po to bandymas vėl kartojamas. Grunto įtempimai σ_o po štampu ir jo deformacija s vaizduojami deformacijos kreive (Automobilių kelių gruntai LST 1360.5:1995).



1.9 pav. Deformacijos kreivė

Šį bandymą galima taikyti stambiagrūdžiams, įvairiagrūdžiams, kietiems smulkiagrūdžiams gruntams. Dalelių, stambesnių negu 1/4 štampo skersmens, po plokšte neturi būti. Greitai džiūstančių smėlių, suslūgusių arba laikinai suminkštėjusių gruntų, taip pat gruntų, kurių viršutinį dalis suardyta, spaudimo štampu bandymas atliekamas pašalinus šį

gruntą. Tiriamojo grunto tankis turi likti nepakitęs. Tiriant smulkiagrūdžius gruntus (molį), šį metodą galima taikyti, kai gruntai yra optimalios drėgmės.

Gruntų deformacijos modulis E_v yra grunto gebėjimo deformuotis parametrinis dydis. Jo reikšmės, turint pirmojo ir pakartotinio apkrovimo deformacijos kreivę, apskaičiuojamos pagal kirstinės nuolydį tarp taškų 0,3 σ_{lmax} ir 0,7 σ_{lmax} :

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \text{ MN/m}^2; \quad (1.25)$$

čia: r – apkrovos štampos spindulys, mm; $\Delta\sigma$ – grunto įtempimų pokytis po štampos, mm; Δs – grunto deformacijos pokytis štampos centre, mm.

Grunto standumo rodiklis k_s yra įtempimų santykis su jų sukeltąja deformacija:

$$k_s = \frac{1000 \cdot \sigma_0}{s} \text{ MN/m}^3; \quad (1.26)$$

čia: σ_0 – vidutiniai įtempimai po štampos, MN/m²; s – grunto deformacija štampos centre, mm.

Jis nustatomas pagal pirmojo apkrovimo deformacijos kreivę.

Spaudimo štampos bandymui atlikti reikalinga:

- 1) apkrovos atsvara;
- 2) spaudimo įrenginys;
- 3) jėgos (apkrovos) ir grunto deformacijos matavimo įrenginiai;
- 4) pagalbinės priemonės.

Apkrovos atsvara turi būti 10 kN didesnė negu didžiausia bandymo apkrova. Atsvarai tinka pakrautas sunkvežimis, automobilio priekaba ir pan.

Apkrovos štampos pagaminamas iš aukštos kokybės plieno. Štampos apačia turi būti lygi. Apkrovos štampos gali būti: 300 mm, 600 mm ir 762 mm skersmens. Standartinis apkrovos štampos yra 300 mm skersmens.

Spaudimo įrenginys susideda iš štampos, spaudimo prietaiso, hidraulinio preso ir didelio slėgimo žarnos. Apkrovos štampos spaudimo įrenginiu yra laipsniškai apkraunamas arba nukraunamas, tam naudojant spaudimo siurbį, kuris didelio slėgimo žarna sujungtas su hidrauliniu presu.

Deformacijoms matuoti naudojami indikatoriai arba elektriniai jutikliai su 10 mm matavimo skale. Deformacija štampos centre s apskaičiuojama pagal formulę:

$$s = s_M \cdot \frac{h_p}{h_M}, \quad (1.27)$$

čia: s_M – indikatoriaus sodmenys, mm;

h_p – atstumas nuo indikatoriaus iki lankstos, m;

h_M – atstumas nuo lankstos iki štampos centro.

Didžiausia apkrova, kurią numatoma taikyti, arba didžiausia grunto deformacija, kurią reikia pasiekti atliekant bandymą, priklauso nuo bandymo tikslo, grunto savybių bei štampos dydžio.

Tiesiant kelius, deformacijos modulis E_v nustatomas naudojant 300 mm skersmens spaudimo plokštę. Apkrova didinama tol, kol pasiekama 5 mm deformacija arba grunto įtempimai po plokšte yra $0,5 \text{ MN/m}^2$. Bandymą reikia nutraukti, kai įlinkiai arba įtempimai yra mažesni negu nurodyti, tiriant apkrovoms silpnus gruntuos, arba kai apkrovos didinimas rodo staigų deformacijos padidėjimą, artimą grunto išstūmimo būsenai.

Apkraunant ir nukraunant gruntą, kita apkrova uždedama tik po 120 s. Tiriant kelio konstrukcijos medžiagą, apkrovos tarpas gali būti sutrumpintas iki 60 s.

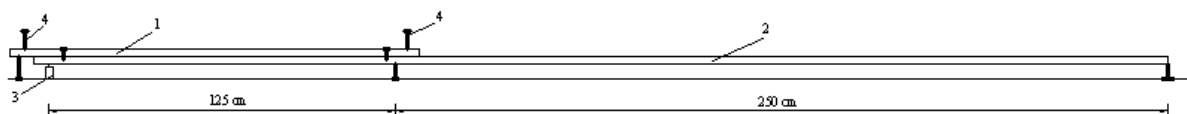
Štampas nukraunamas didžiausią apkrovą mažinant 50%, 25% ir visiškai nukrovus. Visiškai nukrovus štampą, atliekamas antrasis apkrovimo ciklas iki priešpaskutinės pirmojo ciklo apkrovos (Automobilių kelių gruntai LST 1360.5:1995).

Benkelmano sija

Matavimo Benkelmano sijos pagalba metodika pagrįsta kelio dangos konstrukcijos įlinkių nustatymui nuo statinės apkrovos. Benkelmano sija – tai matavimo prietaisas, naudojamas kelio konstrukcijos tampriosios deformacijos matavimui. Benkelmano siją sudaro:

- 1) sulankstomas rėmas, turintis tris atramas, kurių aukštį galima reguliuoti;
- 2) indikatorius, turintis 30 mm matavimo sritį ir 0,01 mm matavimo skalę;
- 3) reguliuojamas vibratorius.

Benkelmano sijos schema pavaizduota 1.10 pav.



1.10 pav. Benkelmano sijos schema

1 – važiavimo-nešiojimo rėmas; 2 - Benkelmano sija; 3 – indikatorius; 4 - rankenos

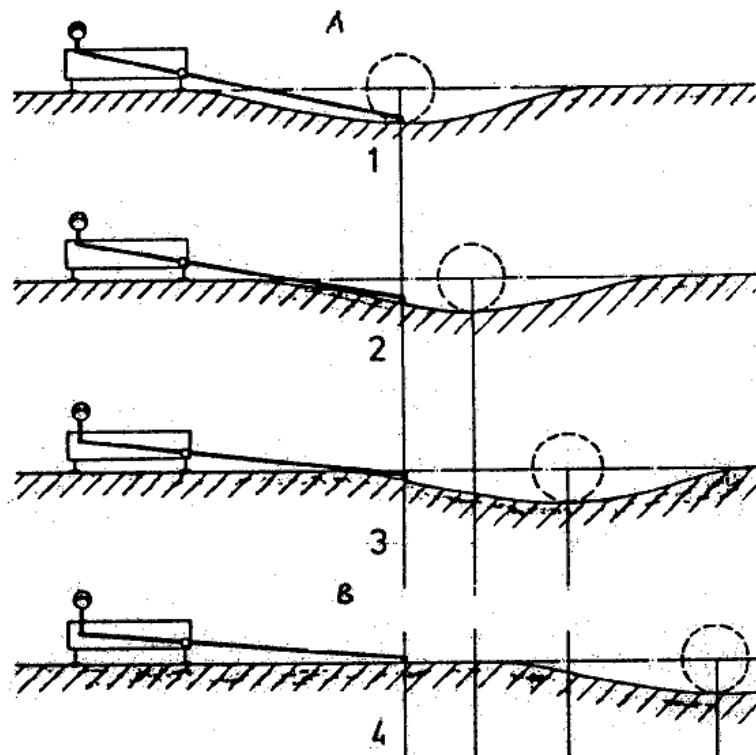
Matuojant Benkelmano siją kelio dangos konstrukcija apkraunama statine apkrova. Naudojama dviašė transporto priemonė, kurios užpakalinė ašis turi suporintus ratus (suporintų ratų krūvis turi būti lygus 50 kN ($5t$) nuo kurios danga įlinksta. Pašalinus statinę apkrovą, Benkelmano sija išmatuojamas įlinkis ir apskaičiuojamas dangos paviršiaus ekvivalentinis tamprumo modulis.

Asfalto dangų matavimai atliekami, kai jų paviršiaus temperatūra yra nuo $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atliekant palyginamuosius įlinkių matavimus, jų reikšmės perskaičiuojamos standartinei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai.

Šis matavimo būdas taikomas:

- kelio dangos deformacijos dydžiui nustatyti;
- techninei kontrolei kelio ruožo deformacijos stabilumui nustatyti;
- betono dangų deformacijoms nustatyti tarp plokščių, siūlėse.

Įlinkio matavimai atliekami važiuojamojoje dalyje ties kraštine ratų vėže, kuri yra labiausiai veikiamą sunkiojo autotransporto. Atstumas tarp matavimo taškų išilgai važiuojamosios dalies neturi viršyti 20 m. Norint nustatyti maksimalų įlinkį, transporto priemonė vienu dvigubu užpakaliniu ratu pastatoma matavimo taške. Benkelmano sija pastatoma horizontaliai, o jos smaigalys talpinamas tarp suporintų ratų. Reguluojant vibratorių nustatoma indikatorius rodyklė ir užrašomas indikatorius rodmuo. Antrasis indikatorius rodmens užrašymas atliekamas, kai apkrautas ratas nutolsta nuo matavimo taško apie 5 m (1.11 pav.). Atliekant matavimus ant asfalto dangų, laikas nuo transporto priemonės pastatymo matavimo taške iki apkrovos nuėmimo (transporto priemonės nuvažiavimo) neturi trukti ilgiau nei 1 min.



1.11 pav. Apkrovimo poveikio linijos vaizdas: a) apkrauta matavimo vieta, b) matavimo vieta, pašalinus apkrovą.

Maksimalus įlinkis skaičiuojamas pagal formulę:

$$s = k_1 \cdot (s_a - s_o), \quad (30), \quad (1.28)$$

čia: k_1 – apkrovos (krūvio) perskaičiavimo koeficientas; s_a – indikatoriaus skalės rodmuo apkrovimo metu; s_o – indikatoriaus skalės rodmuo, nuėmus apkrovimą.

Kelio dangos konstrukcijoms be hidrauliškai surištų sluoksnių įlinkis yra perskaičiuojamas standartinei 20° C dangos paviršiaus temperatūrai s_{20} pagal formulę:

$$s_{20} = s \cdot k_2, \quad (1.29)$$

čia: s – maksimalus įlinkis (mm), esant vidutinei paviršiaus temperatūrai T_m , °C; k_2 – temperatūrinis perskaičiavimo koeficientas.

Kelio dangos konstrukcijoms, turinčioms hidrauliškai surištus sluoksnius, maksimalus įlinkis s_{20} skaičiuojamas:

$$s_{20} = s + d, \quad (1.30)$$

čia: d – skirtumas (pataisos koeficientas).

Matuojant Benkelmano sija reikia mažiau laiko, lyginant su apkrovos plokšte, todėl per pamainą gali būti atlikta 100 – 150 matavimų. Benkelmano sija pavaizduota 1.12 pav.



a)



b)

1.12 pav. Matavimai su Benkelmano sija:

a) Benkelmano sija

b) dangos konstrukcija apkrauta statine apkrova ir išmatuotas įlinkis

Lengvas krintančio svorio deflektometras LWD

Automobilių kelių bei gatvių dangų konstrukcijoms modeliuoti buvo sukurtas deflektometras (FWD), kuris matuoja įlinkius veikiant trumpalaikiai apkrovai. Šio metodo pranašumai: negadinama matuojama kelio danga, prietaisas valdomas vieno žmogaus, tikslūs ir greitai atliekami matavimai (iki 60 matavimo taškų per valandą), didelis apkrovų diapazonas (7 – 120 kN); pritaikytas daugelio kelio dangų matavimams – nuo paprastų kelių iki aerouosto dangų bandymų (Hoffman *ir kt.* 1982; Hudson *ir kt.* 1987; Ruotoistenmäki, A. 1999).

Bandymas lengvu diniminiu prietaisu atliekamas tikrinant gruntų ir pagrindų konstrukcinių sluoksnių, įrengtų iš birių medžiagų stiprumą. Šis metodas geriausiai tinka stambiagrūdžiams ir mišriems gruntams, kurių dalelės ne didesnės kaip 63 mm. Bandymas krintančio svorio deflektometru Mini FWD – tai toks bandymo būdas, kai smūgio jėga gruntui perduodama per standžią plokštę, ir sukelia dinaminę apkrovą δ , kuri lygi 0,1 MN/m². Apkrovos trukmė siekia apie 18 ms. Tai sukelia grunto deformaciją. Lengvas dinaminis prietaisas pavaizduotas 1.13 pav.



1.13 pav. Lengvas krintančio svorio deflektometras LWD

Krintančio svorio deflektometras FWD

Krintančio svorio deflektometras plačiai naudojamas visame pasaulyje kelio dangų stiprumui diagnozuoti. Matavimai šiuo prietaisu įgalina nustatyti bet kurio dangos konstrukcijos sluoksnio deformacijos modulį neardant kelio dangos. Jo pagalba galima greitai ir tiksliai nustatyti kelio dangos stiprį. Deflektometro prietaisas pateiktas 1.14 pav. (Jazdauskas, G. 2004).



1.14 pav. Deflektometras Dynatest FWD 8000

Deflektometras yra vienas iš pagrindinių tyrimo prietaisų kelio dangos konstrukcijos stiprumui nustatyti, kadangi jis leidžia įvertinti dangos gebėjimą atlaikyti automobilių apkrovų poveikį. Šis prietaisas gali būti naudojamas kelių tinklo arba atskirų kelių ar jų ruožų stiprio rodiklių nustatymui (Dynatest 8000 FWD Test System 1995).

Dinaminiu dangos deformacijos modulio nustatymo prietaisu FWD matavimai paprastai atliekami nuo kovo iki lapkričio mėn., tačiau priklausomai nuo oro sąlygų matavimai gali būti atliekami ir kitais mėnesiais. Jei oro temperatūra yra žemiau 4 °C arba gruntas yra išalęs, tai matavimo rezultatai gali būti klaidingi.

Matavimų su FWD eiga:

- jei būtina, tai visiškai sustabdyti eismą ir pasirinkti apkrovos plokštės vietą;
- nuleisti daviklius ant dangos paviršiaus;
- paleisti svoriui kristi.

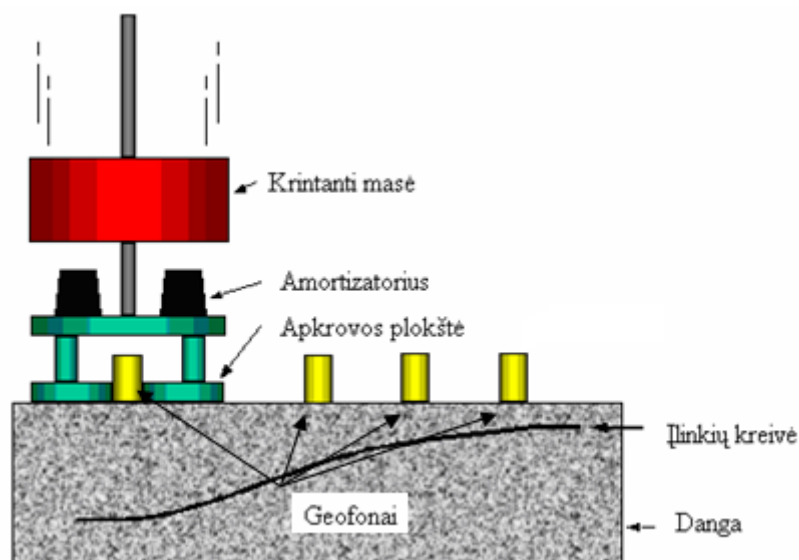
Sudėtiniai matavimų testai gali būti atliekami toje pačioje vietoje naudojant skirtingus svorio kritimo aukščius.

Matavimų atlikimo metu yra matuojama oro ir dangos temperatūros. Šie duomenys yra toliau naudojami analizuojant gautus rezultatus. Dangos temperatūra turėtų būti (5 – 50) °C, tačiau norint gauti geresnius rezultatus dangos temperatūra turėtų būti (5 - 35) °C (aukščiausia temperatūra kiekvienoje šalyje yra skirtinga). Pakartotini matavimai yra atliekami kiekvienoje vietoje iki tol, ko esamas smūgis skiriasi nuo ankstesnio mažiau nei 5 %.

Pagrindiniai veiksniai įtakojantys dangos įlinkių matavimų su FWD metu:

- dangos sluoksnio storis;
- medžiagos rūšis;
- medžiagos kokybė;
- žemės sankasos stiprumas;
- aplinkos sąlygos;
- dangos konstrukcijos stabilumas (Texas department of transportation 2008).

Dinaminiu dangos deformacijos modulio nustatymo prietaisu FWD, galima greitai nustatyti įlinkius ir įvertinti esamos dangos stiprį. Šis deflektometras sukuria pusės sinusoidės formos, vieno „smūgio“ apkrovą, kurios trukmė 25 – 30 ms ir labai panaši į judančio rato apkrovą. Apkrovos reguliavimo intervalas nuo 7 iki 120 kN (1.15 pav.).

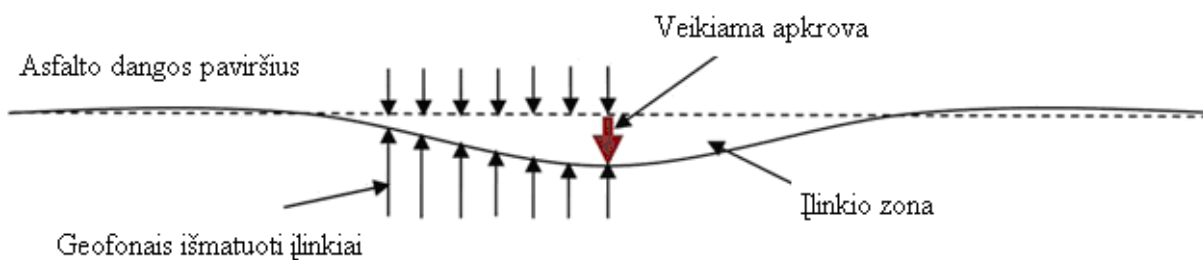


1.15 pav. Krintančio svorio deflektometras FWD

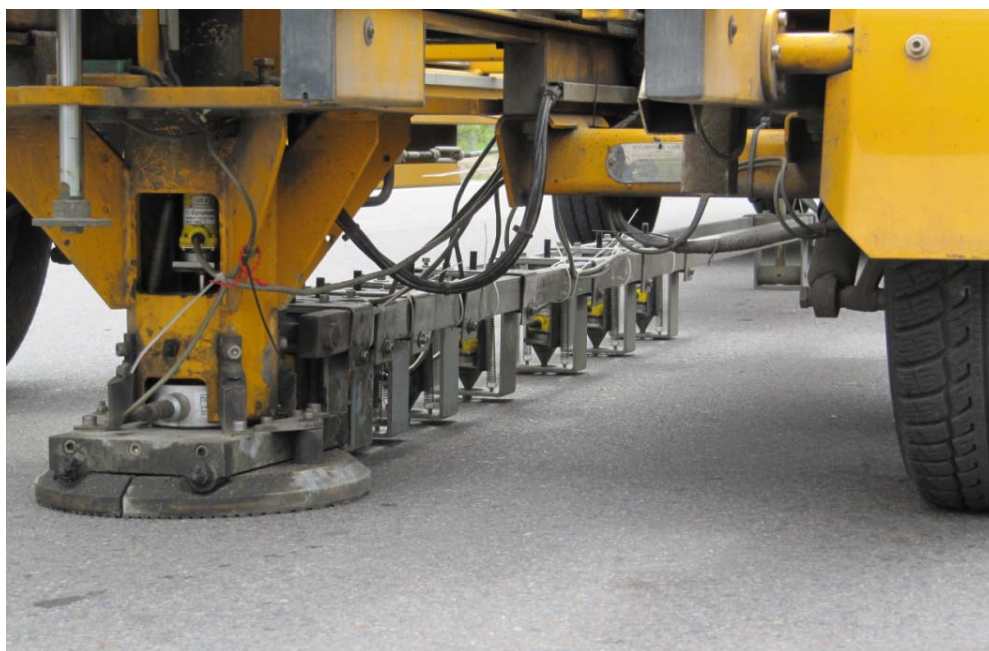
Apkrovą fiksuoja centre įmontuotas dinamometro daviklis, prijungtas prie ant šarnyrų pakabintos apkrovos plokštės. Kelio dangos įlinkiai fiksuojami 7 – 9 įlinkių davikliais, 1.1 lentelė, 1.16 pav., 1.17 pav. (Dynatest 8000 FWD Test System 1995).

1.1 lentelė. Daviklių atstumai nuo apkrovos pridėties centro, mm

Daviklių skaičius	Daviklių atstumai nuo apkrovos pridėties centro, mm
7	0, 200, 300, 400, 600, 900, 1500
9	0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800

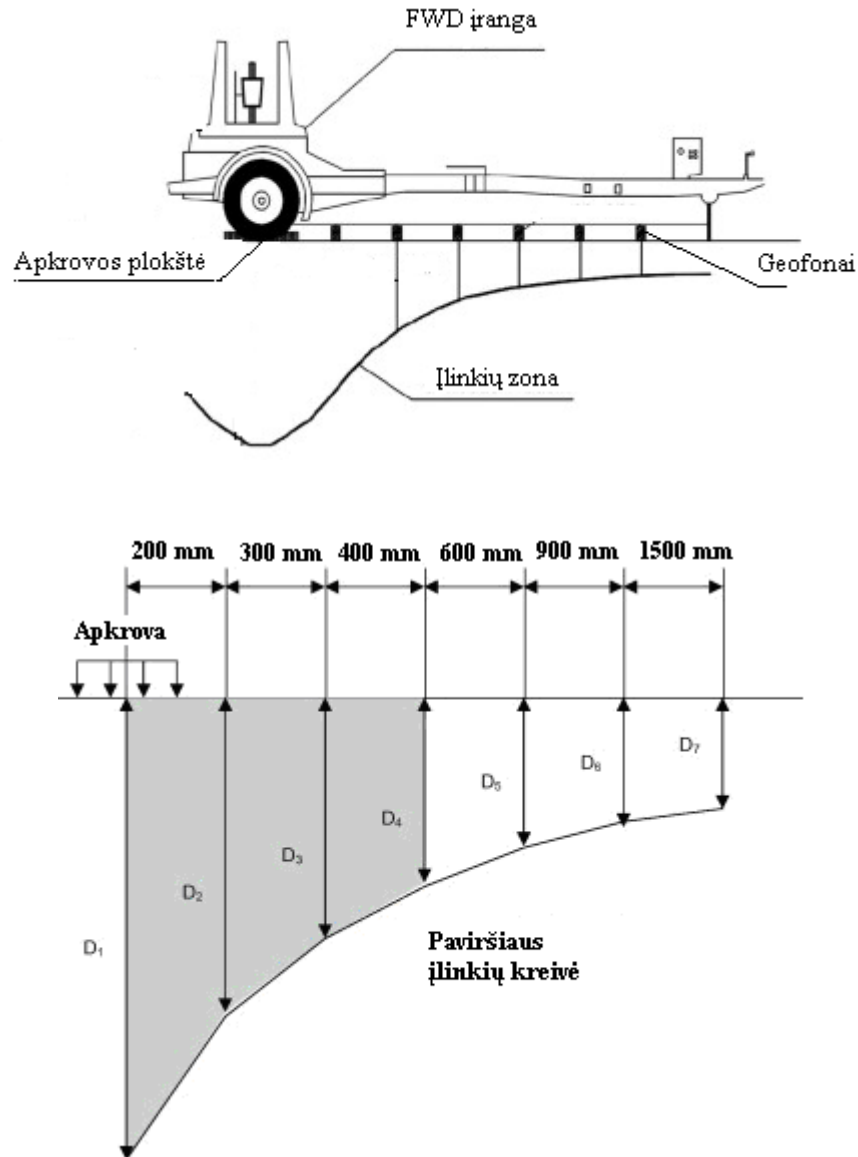


1.16 pav. FWD veikiamos apkrovos ir susidariusio įlinkio schema



1.17 pav. Krintančio svorio deflektometro „Dynatest 8000” geofonų išdėstymo schema

Matavimo įrenginys aprūpintas automatine mechanine sistema (tame tarpe ir apkrovos kritimo aukščio pasirinkimas). Matavimo įrenginio sistemos procesorius Dynatest 8000 susideda iš mikroprocesoriaus kontrolės ir signalų apdorojimo įrenginio. Jis prijungtas prie deflektometro priekabos ir kompiuterio. Procesorius aprūpintas sistemos būklės stebėsenos sistema, todėl puikiai užtikrina matavimų tikslumą. Įlinkiai matuojami absoliučiu $2\% \pm 2$ mikrometrų tikslumu ir standartiniu santykinu $1\% \pm 1$ mikrometro tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba įlinkių matavimams yra 1 mikronas. Apkrova matuojama ne mažesniu nei $2\% \pm 0,3$ kN tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba apkrovai yra nuo 0,03 iki 0,2 kN. Matuojant kelių dangos konstrukcijos įlinkius dinaminio prietaisu, apkrova sukelia masyvaus cilindro smūgiu, kuris per labai trumpą laiko dalį, sukelia konstrukcijos sluoksnio poslinkį. Krintančio svorio deflektometro schema pateikta 1.18 pav.



1.18 pav. Krintančio svorio deflektometro schema

Tyrimų metu išmatuojami kelio dangos įlinkiai, apskaičiuojami kelio dangos konstrukcinių sluoksnių tamprumo moduliai, įtempimų pasiskirstymas apkrovos zonoje, nustatomas kelio dangos liekamasis amžius ir kritinis kelio dangos konstrukcijos sluoksnis.

Norint nustatyti dangos sluoksnių paviršiaus įlinkį, rekomenduojama nubraižyti paviršiaus E modulio grafiką. Šis grafikas nurodo dangos sluoksnių įlinkius skirtinguose ekvivalentiniuose gyliuose.

Paviršiaus E modulis ekvivalentiniame gylyje r yra apytiksliai lygus moduliui dangos sluoksnio, ekvivalentiško dangos sluoksniams, esantiems žemiau ekvivalentinio gylio $h_e = r$.

Paviršiaus E modulis apkrovos centre (ekvivalentinis gylis = 0 mm) apskaičiuojamas pagal 2 formulę:

$$E_0 = \left[\frac{f(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_r} \right], \quad (1.31)$$

Šis modulis nurodo visos dangos ekvivalentinį E modulį (priimama, kad danga yra vienas sluoksnis).

Paviršiaus E modulis atstumu r nuo apkrovos centro ($r > 2a$) apskaičiuojamas pagal 34 formulę:

$$E_{0(r)} = \left[\frac{(1-\nu^2) * \sigma_0 * a^2}{r * d_r} \right], \quad (1.32)$$

čia: E_0 – paviršiaus modulis apkrovos plokštės centre; $E_{0(r)}$ – paviršiaus modulis atstumu r , MPa; f – įtempimų pasiskirstymo koeficientas ($f = 2$ – tolygus (skelta apkrovos plokštė), $f = \pi/2$ – standi plokštė, $f = 8/3$ – birūs gruntai, standi plokštė, $f = 4/3$ – rišlūs gruntai, standi plokštė; ν – Puasono koeficientas; σ_0 – kontaktinis slėgis po apkrovos plokštės, kPa; a – apkrovos plokštės spindulys, mm; r – atstumas nuo jutiklio iki apkrovos centro, mm; d_r – įlinkis atstumu r , mm.

Šis modulis nurodo ekvivalentinę deformaciją sluoksnių, esančių žemiau ekvivalentinio gylio $h_e = r$ (Dynatest 8000 FWD Test System 1995).

1.4. Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas – tobulinti asfalto dangų stiprio vertinimo metodus, įvertinant klimato įtaką kelio asfalto dangos konstrukcijos stipriui bei nustatant asfalto sluoksnių temperatūros redukavimo koeficientą.

Uždaviniai tikslui pasiekti:

- 1) apžvelgti nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo ir vertinimo metodus taikomus Lietuvoje ir kitose šalyse;
- 2) išnagrinėti asfalto dangos konstrukcijos stiprio nustatymo metodus;
- 3) išanalizuoti asfalto dangos konstrukcijos elgseną Lietuvos klimato sąlygomis;
- 4) išnagrinėti temperatūros redukavimo metodus taikomus Lietuvoje ir kitose šalyse;
- 5) atlikti eksperimentinį temperatūros įtakos asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimą:
 - įvertinant dangos konstrukcijos stiprio kitimą atsižvelgiant į temperatūros ir drėgnio pokyčius;
 - atliekant gautų tyrimų rezultatų matematinę-statistinę analizę ir vertinimą;
 - nustatant temperatūros redukavimo koeficientą.
- 6) pateikti išvadas ir rekomendacijas.

2. Klimato įtakos automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos stipriui analizė

2.1. Asfalto dangos konstrukcijos darbas Lietuvos klimato sąlygose

Dangų ilgaamžiškumas labai priklauso nuo kelio konstrukcijos stiprumo. Konstrukcijai didelę įtaką turi ne tik važiuojančių transporto priemonių poveikis, bet ir klimato sąlygos. Klimato sąlygos – tai temperatūros kitimo amplitudė ir greitis, temperatūros maksimumai ir minimumai, krituliai, vėjo kryptis ir greitis, sniego dangos storis (Statybinė klimatologija RSN 156-94 1995).

Klimato sąlygų įtaka kelio dangos konstrukcijai galima apibūdinti hidroterminiu režimu. Klimato veiksniai ir formuoja šį režimą – dėsningus sezoninius drėgmės ir temperatūros pokyčius dangos konstrukcijoje ir žemės sankasoje. Šį režimą sudaro kelio konstrukcijoje vykstančių sudėtingų procesų: išilimo, atvėsimo, išalimo, atšilimo, garavimo, kondensacijos, sublimacijos – visuma. Tai šilumos ir drėgnio mainai, sąlygojantys temperatūros ir drėgnio svyravimus kelio konstrukcijoje (Palšaitis. *ir kt.* 1999).

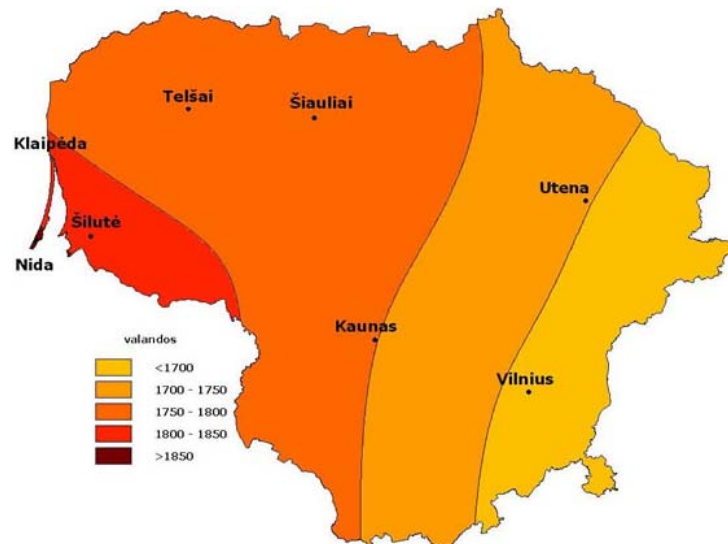
Lietuva yra vėsiojo vidutinio klimato zonoje su vidutinio šilumo vasaromis bei vidutinio šaltumo žiemomis (Dėl Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos įgyvendinimo iki 2012 metų nacionalinės strategijos patvirtinimo 2008). Lietuvos klimatą lemia globalūs (zoniniai) veiksniai ir vietinės geografinės sąlygos (zoniniai veiksniai). Zoniniai veiksniai: geografinė padėtis ir vyraujanti oro masių pernaša iš vakarų. Azoniniai veiksniai, lemiantys klimato bruožus: gretimi sausumos plotai vandenynų ir jūrų išsidėstymas, reljefo absoliutus aukštis, dirvožemio savybės, paklotinio paviršiaus danga. Prie azoninių veiksnių priskiriami ir vietiniai klimato veiksniai: reljefo formos, vandens telkiniai, dirvožemiai, augalija, urbanizuotos teritorijos, taip pat jų fizinės būklės sezoninė kaita.

Saulės spinduliavimas

Oro temperatūros rodiklių teritorinis pasiskirstymas priklauso nuo Saulės spinduliuotės prietakos, jos sugėrimo paklotiname paviršiuje, nuo gretimų vandenynų ir sausumos plotų išsidėstymo, paklotinio paviršiaus pobūdžio, dangos ir energetinės apykaitos su atmosfera, vietovės reljefo, dirvožemio tipo ir drėgnumo. Visų šių veiksnių savybių sezoninė arba paros kaita nulemia temperatūros rodiklių svyravimus ir teritorinio pasiskirstymo ypatumus (Visuotinė lietuvių enciklopedija XII Lietuva 2007).

Saulės aukštis virš horizonto per metus kinta. Didžiausias jis būna birželio mėnesio pabaigoje, o mažiausias – gruodžio pabaigoje. Lietuvoje saulėtų dienų tik pavasarį ir vasarą apie 10 %, o rudenį ir žiemą apie 1-2 %. Žemę dažnai dengia debesys, rūkas. Žemės paviršius

radiaciją ne tik sugeria, bet dalį jos ir atspindi atgal į atmosferą. Todėl sugertosios radiacijos kiekis priklauso nuo bendrosios Saulės radiacijos intensyvumo ir nuo paklotinio paviršiaus sugebėjimo atspindėti radiaciją. Daugiausia radiacijos žemės paviršius sugeria birželio mėnesį, mažiausiai – gruodžio-sausio mėnesiais. Padidėjus sugertosios radiacijos daliai, labiau išsyla paviršiai. Pagal Lietuvos hidrometeorologijos duomenis vidutinė metinė Saulės spindėjimo trukmė valandomis Lietuvoje, esant giedram dangui, kai galima gauti maksimalų spinduliuojamos energijos kiekį pateikta 2.1 pav.

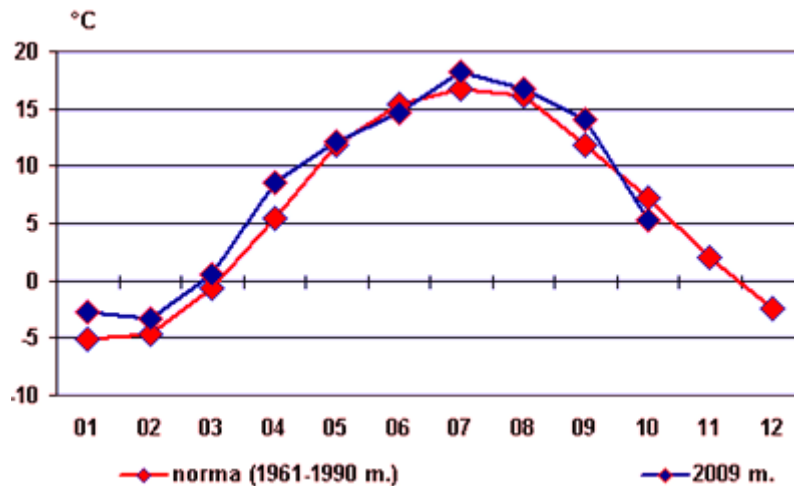


2.1 pav. Vidutinė metinė Saulės spindėjimo trukmė

Oro temperatūra

Didžiausia saulės kaitra būna nuo pusiaudienio iki 13 val., tačiau kaitinant saulėj asfalto danga neįkaista iš karto. Aukščiausią temperatūrą asfalto danga pasiekia mažiausiai po valandos.

Vidutinė liepos mėnesio temperatūra Lietuvoje yra apie 17 °C, dienomis pakyla iki 25 °C. Žiemą - apie -5 °C; intervalas tarp temperatūrų yra apie 20 °C. Lietuvos teritorija visus metus yra stipriai veikiamą Atlanto vandenyno ir Baltijos jūros. Dažnai žiemą veikia Atlanto ciklonai, kurie atneša sniegą ar šlapdrią, šiltesnį orą, taip pat lemia storesnę sniego dangą. Lietuvoje buvo labai karštų vasarų, kai oras sušildavo iki 30 °C, ir labai šaltų žiemų, kai oras atšaldavo iki -20 °C, o naktimis - iki -30 °C (Dėl Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos įgyvendinimo iki 2012 metų nacionalinės strategijos patvirtinimo, 2008). Vidutinė oro temperatūra Lietuvoje 1961-1990 ir 2009 m. pateikta 2.2 pav.



2.2 pav. Vidutinė oro temperatūra Lietuvoje 1961 m.-1990 m. ir 2009 m.

Svarbūs klimato rodikliai yra oro temperatūros kitimas per parą. Pagrindiniai veiksniai, kurie nulemia oro temperatūros kitimą per parą, yra radiacijos balanso ir jo sudedamųjų paros eiga.

Žemiausią oro temperatūrą nukrinta saulėj tekant, o aukščiausią pakyla apie 14 val. - 16 val. Saulėj patekėjus, temperatūra greitai kyla, bet, likus iki temperatūros maksimumo 3 val. - 4 val., kilimas sulėtėja. Pasiėkus aukščiausią tašką, temperatūra 2-3 val. krinta lėtai, o po to - intensyviai. Naktį, artėjant temperatūros minimumui, kritimas vėl sulėtėja. Oro temperatūros kitimo per parą vidutinė amplitudė pajūryje 1,5 karto mažesnė negu Rytų Lietuvoje. Šis skirtumas susidaro todėl, kad pajūryje temperatūros minimumai būna aukštesni, o temperatūros maksimumai - žemesni. Didžiausi temperatūros svyravimai būna Pietryčių Lietuvoje (Varėnos raj.).

Temperatūros kitimui per parą turi įtakos ir debesuotumas: debesys sugeria trumpabangę saulės radiaciją, o ilgabangį žemės paviršiaus spinduliavimą sulaiko. Todėl temperatūros svyravimo amplitudė sumažėja.

Vėjo greitis taip pat turi įtakos temperatūros kitimui per parą. Labiausiai temperatūra per parą svyruoja esant giedriam ramiam orui, o mažiausiai - esant vėjuotiems ir debesuotiems orams. Taigi paros ir sezoniniai temperatūros svyravimai (šalčio ir atšilimo ciklai) skatina kelio dangos deformacijų susidarymą ir blogina žemės sankasos būklę.

Oro drėgnumas

Svarbiausi klimatiniai oro drėgnumo rodikliai yra šie: parcialinis vandens garų slėgis (tai slėgis, kurį sudaro tik vandens garai) ir santykinis oro drėgnumas (esamo parcialinio vandens garų slėgio procentinis santykis su sotinančiu vandens garų slėgiu, esant tai pačiai temperatūrai), oro prisotinimo vandens garais nepriteklis.

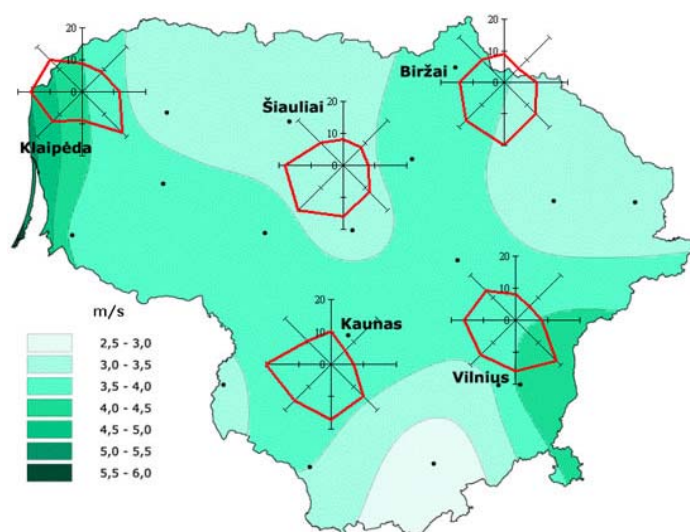
Sausiausia atmosfera yra tada, kai būna žemiausia temperatūra, t.y. sausio-vasario mėn., o drėgniausia – liepos-rugpjūčio mėn. Didžiausias santykinis oro drėgnumas būna spalio-vasario mėn. Žiemos pradžioje į Lietuvą atslenka oro masės, kurios atneša daug drėgmės nuo 87 % iki 91 %. Pavasarį, kylant temperatūrai, santykinis oro drėgnumas mažėja ir gegužės mėn. pasiekia metinį minimumą nuo 67 % iki 77 %. Rudenį, oro temperatūrai krintant, oro drėgnumas auga; žiemą santykinis oro drėgnumas nukrinta iki (25 - 30) %, o vasaros pradžioje nukrinta net iki (16 – 20) %.

Oro drėgnumo kitimas per parą taip pat priklauso nuo temperatūros. Labiausiai hidroterminiai rodikliai kinta šiltuoju metų laiku. Rytą patekėjus saulėj, kyla paklotinio paviršiaus temperatūra, sustiprėja garavimas ir kartu didėja vandens slėgis. Santykinio oro drėgnumo paros svyravimo amplitudė didžiausia balandžio-rugsėjo mėn. (27 - 30) %, o mažiausia – gruodžio-sausio mėn. (3 – 5) %. Paros maksimumas yra ryte, prieš saulės patekėjimą, kai yra žemiausia temperatūra, o minimumas – nuo 15 val. iki 18 val.

Vėjas

Lietuvoje rudenį ir žiemą daugiausia pučia pietvakarių ir pietų vėjai. Tik pavasario pabaigoje pradeda pūsti šiaurės vakarų, vakarų vėjai, kurie vyrauja ir visą vasarą. Daugiausia ramių ir be vėjo orų būna vasarą.

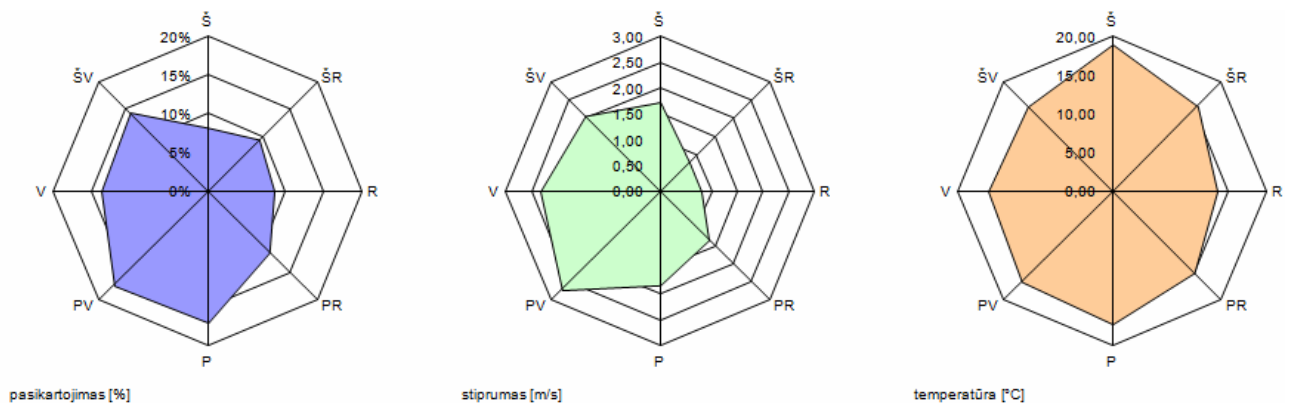
Vėjo krypties pasikeitimai turi įtakos oro temperatūrai. Žiemą šalčiausia būna pučiant šiaurės (Š), šiaurės rytų (ŠR), rytų (R) vėjams, o pučiant pietvakarių (PV) ir vakarų (V) vėjams – temperatūra būna aukštesnė. Vidutinis metinis vėjo greitis Baltijos jūros pakrantėje lygus (5,5 - 6,0) m/s, o tolstant į sausumą jis sumažėja iki (2,9 - 3,5) m/s, (2.3 pav.).



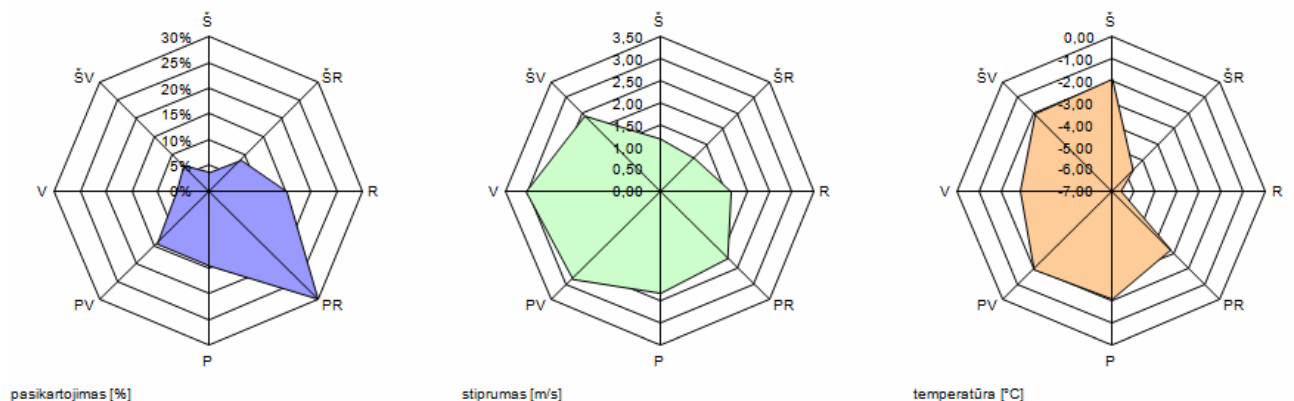
2.3 pav. Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos duomenimis vidutinis metinis vėjo greitis ir vyraujančios vėjo kryptys

Stipriausi vėjai vyrauja rudenį ir žiemą (pietryčių, pietų ir pietvakarių kryptių), o vasarą – vakarų krypties. Per parą didžiausi vėjo greičiai paprastai būna 12.0-18.0 val., o mažiausi – 00.0-6.0 val.

Kelių oro sąlygų informacinės sistemos duomenimis netoli Didžiulio ežero esanti meteorologinė Dižiulio stotelė išmatavo vėjo kryptį ir stiprumą toje vietovėje. Vėjo rožės pateiktos 2.4, 2.5 pav.



2.4 pav. Vėjo rožės rugpjūčio mėnesį pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis



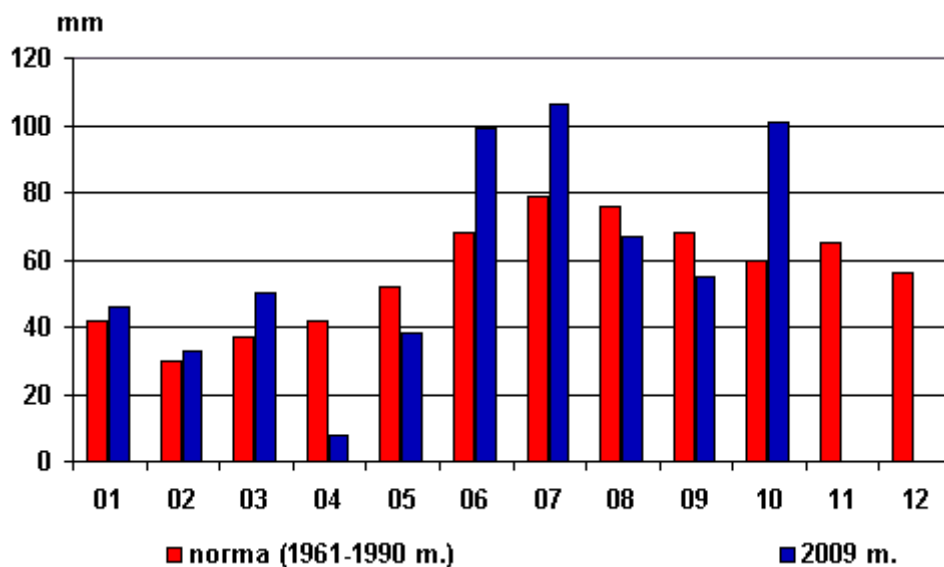
2.5 pav. Vėjo rožės gruodžio mėnesį pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis

Pustymo procesus lemia ne tik vėjo greitis, bet ir jo kryptis dažnumas, stiprių vėjų pasikartojimas. Stiprus šoninis vėjas pavojingas slidžiame kelyje išvažiuojant iš uždaro kelio ruožo į atvirą. Važiuojant slidžiu keliu, sumažėja automobilio stabdymo kelias. Taip pat stipriai sningant ar pūstant kelio matomumas ženkliai sumažėja. Taip pat vėjas turi didelę įtaką drėgnio kiekiui dangos konstrukcijoje, nes esant dideliame vėjui dangos paviršius yra greičiau džiovinamas.

Krituliai

Krituliai – tai skysto ar kieto pavidalo vanduo, iškrintantis iš atmosferos ir nusėdantis ant žemės paviršiaus ar daiktų. Krituliai iškrinta lietaus dulksnos, sniego šlapdribos, sniego ir ledo kruopų, krušos pavidalu. Kritulių kiekiu vadinamas vandens sluoksnis, kuris susidarytų ant horizontalaus ir nepralaidaus paviršiaus.

Kritulių pasiskirstymui didžiausią įtaką turi reljefas, šlaitų padėtis vyraujančių oro tėkmių atžvilgiu ir nuotolis nuo jūros (Visuotinė lietuvių enciklopedija XII Lietuva. 2007). Daugiausiai kritulių iškrenta vasarą (iki 50 % metinio kritulių kiekio) dėl netikėtų audrų, škvalų, perkūnijų ir lietaus. Mažiau kritulių rudenį, žiemą. Mažiausiai kritulių - pavasarį (dėl vyraujančių anticiklonų) (Dėl Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos įgyvendinimo iki 2012 metų nacionalinės strategijos patvirtinimo, 2008). Vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje nuo 1961 m. iki 1990 m. ir 2009 m. pateiktas 2.6 pav.



2.6 pav. Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos duomenimis vidutinis kritulių kiekis Lietuvoje nuo 1961 m. iki 1990 m. ir 2009 m.

Automobilių kelius nuolat ir intensyviai veikia klimato veiksniai – aukšta temperatūra vasarą, žiemą šaltis, pavasarį atodbrėkis bei atmosferos krituliai ir gruntinis vanduo. Iš patirties vairuotojai ir kelių tiesybos specialistai žino, kad vanduo turi prastą poveikį automobilio važiavimo dinamikai ir kelio konstrukcijos stipriui. Vanduo, atsižvelgiant į jo temperatūrą, būna kietosios fazės (ledas), klampusis (skystasis), dujinis (garai).

Metiniame kelio darbo cikle išskiriami keturi periodai. Rudens periodu kelio danga ir kelio konstrukcija atvėsta, iš dalies padidėja drėgnumas ir sumažėja grunto tankis. Paisant drėkinimo šaltinių intensyvumo ir automobilių eismo sąlygų, šiame periode gali vykti dangos sėdimas. Žiemos periodas prasideda šąlant kelio dangai ir jos konstrukcijai. Vandens plėvelė,

gaubianti grunto dalelytes, virtimo ledu metu storėja. Todėl viršutinių kelio konstrukcijos sluoksnių drėgmė ir temperatūra būna mažesnė nei viršutinių sluoksnių. Tai verčia drėgmę iš žemutinių konstrukcijos sluoksnių migruoti į viršutinius sluoksnius. Kelio konstrukcijos grunto drėgmė pamažu didėja ir pasiekia maksimalias reikšmes šalto žiemos periodo pabaigoje. Čia pastebimas minimalus sezoninis grunto tankis ir maksimalus sušalusio grunto atsparumas. Antrame periode galima tikėtis grunto šalimo ir brinkimo reiškinių. Trečiasis pavasario periodas prasideda atitirpstant kelio konstrukcijai. Čia vyksta intensyvus drėgmės persiskirstymas aktyvioje zonoje. Drėgmė pasiekia maksimalią reikšmę, o tankis ir atsparumas – minimalią atšilusio grunto reikšmę. Trečiame periode padidėja kelio konstrukcijos ir dangos sėdimo tikimybė. Ketvirtame vasaros periode, pasibaigus ledo atitirpimui, pamažu kelio konstrukcija džiūsta: drėgmė mažėja, o grunto tankis ir atsparumas didėja.

Sniego danga

Sniego danga žiemos metu yra svarbus klimato veiksnys, nes atspindi daug (60 – 90) % saulės radiacijos. Kietieji krituliai, iškrentantys sniego pavidalu, suformuoja sniego dangą. Mažas sniego šiluminis laidumas stabdo šilumos apykaitą tarp oro bei dirvos ir sulaiko šilumą, kuri susikaupia dirvoje rudenį.

Pagrindiniai klimatiniai sniego rodikliai yra šie:

- sniego dangos susidarymo ir ištirpimo datos;
- sniego dangos storis;
- tankis;
- vandens atsargos sniege.

Sniego dangos pasirodymo datos artimos oro temperatūros nukritimo žemiau nulio vidutinėms datoms.

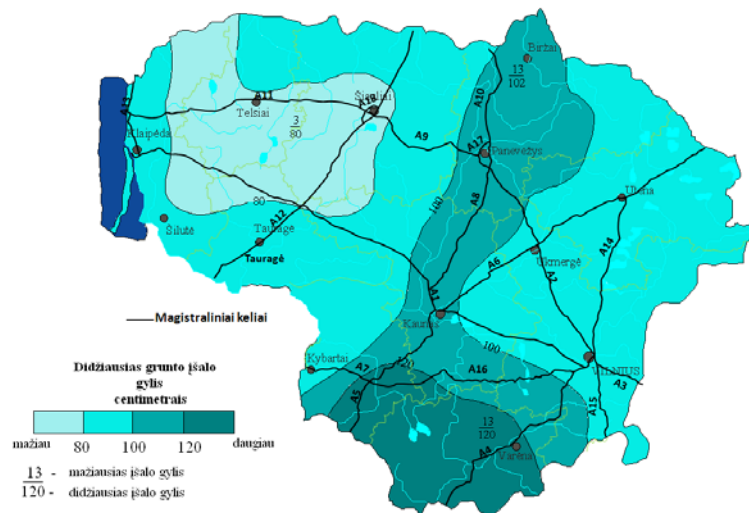
Pastoviausia ir storiausia (vidutiniškai nuo 30 cm iki 40 cm) sniego danga susidaro Rytų Lietuvoje. Čia ji ilgiausiai ir išsilaiko – apie 90 dienų. Didesniojoje Lietuvos dalyje sniego danga būna nuo 20 cm iki 30 cm storio. Ploniausia ji esti pajūryje – iki 15 cm. Ten ji susidaro ne kasmet, išsilaiko vidutiniškai (40–50) dienų. Gausus sniegas užneša kelius, sutrikdo transporto eismą, įlaužia pastatų stogus.

Grunto temperatūra ir įšalas

Grunto temperatūra ir įšalas priklauso ne tik nuo temperatūrą veikiančių veiksnių, bet ir nuo grunto tipo bei mechaninės sudėties, drėgnumo, šiluminių savybių, gruntinio vandens slūgsojimo gylio, augalijos ir sniego dangos. Lyginant su oro temperatūra, dirvos

paviršius vasarą vidutiniškai (3 – 6) °C šiltesnis, o žiemą keliomis dešimtosiomis laipsnio dalimis šaltesnis.

Pastovusis įšalas susidaro gruodžio mėnesio pirmąjį ir antrąjį dešimtadienį. Pavasarį, vidutiniškai balandžio pirmame dešimtadienyje, įšalas išeina. Anksčiausiai dirvos atitirpsta pajūryje ir pietvakariuose, vėliausiai – šiaurės rytuose. Kai pavasaris labai šaltas, o įšalas būna gilus, dirvos atitirpsta tik balandžio pabaigoje. Didžiausią gylį įšalas pasiekia žiemos pabaigoje (vasario – kovo mėn.). Didžiausio įšalimo gylio žemėlapis pavaizduotas 2.7 pav.



2.7 pav. Didžiausias ir mažiausias grunto įšalimo gylis centimetrais (Juknevičiūtė *et al* 2008)

Kelio konstrukcija nuolat drėkinama, džiovinama, šildoma, šaldoma, tokių procesų kaita vadinama hidroterminiu režimu. Blogiausios sąlygos yra, kai oro temperatūra pereina iš teigiamos į neigiamą, ir atvirkščiai. Kai temperatūra pereina per 0 °C, tai ypač neigiamai veikia automobilių kelių dangą. Esant labai permainingoms temperatūroms, labiau poringa asfalto danga suyra.

Nukritus temperatūrai, asfalto dangoje esanti drėgmė sušąla, padidėja jos tūris, todėl danga pradeda trupėti, atsiranda įtrūkių, sumažėjo dangos stiprumo savybės.

2.2. Temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijos stipriui

Temperatūros įtaka asfalto dangos konstrukcijos stipriui

Temperatūros pokyčiai kelio konstrukcijoje sudaro specifinį šiluminį režimą, kuris skiriasi nuo aplinkinės vietovės šiluminio režimo. Kelio konstrukcijoje vykstantys šilumos mainai yra sudėtingi difuziniai procesai, susiję su drėgmės mainais žemės sankasoje ir dangos konstrukcijoje. Kelio konstrukcijos temperatūra, sąveikaudama su kitais veiksniais (drėgmė, transporto eismu) gali pakenkti kelio konstrukcijos stabilumui. Temperatūra yra vienas iš veiksnių, skatinančių žiemos iškylų susidarymą kelio konstrukcijoje, kada deformuojama

žemės sankasa arba net ir danga, be to, tiek aukštoje, tiek žemoje temperatūroje pasikeičia deformacinės kelio dangos medžiagų savybės.

Svarbiausi kelio aplinkos ypatumai, kurie veikia kelio dangos temperatūrinio režimo pobūdį yra šie:

- kelio absoliutus aukštis ir reljefas;
- kelias, esantis atviroje vietoje (kur Saulės radiacijos prietaka yra tiesioginė);
- prie kelio esantys miškai ir vandens telkiniai;
- ant kelio krintantys šešėliai;
- tiltai;
- miestai.

Kelio dangos temperatūrinis režimas priklauso ir nuo klimato sąlygų (oro temperatūros, santykinės oro drėgmės, debesuotumo, vėjo, sniego ir kt.), pačios kelio dangos konstrukcijos bei transporto srauto intensyvumo. Nuolat veikiant visiems išvardintiems aplinkos veiksniams kelio danga praranda atsparumą.

Esant tiek žemai, tiek ir aukštai temperatūrai, pasikeičia dangos medžiagų deformacinės (plastinės) savybės. Dėl staigaus temperatūrų pokyčio danga pasidaro trapi, joje atsiranda plyšių. Šie temperatūriniai plyšiai yra dvejopi – dėl nepakankamo dangos atsparumo šlyties deformacijoms atsiranda skersiniai plyšiai, o išilginiai yra temperatūros pokyčio rezultatas.

Esant aukštai oro temperatūrai ir veikiant horizontalioms ir vertikaloms jėgoms (vertikaliosios jėgos poveikis priklauso nuo transporto priemonės svorio, o horizontaliosios – nuo važiavimo greičio, pagreičio, padangų sukibimo su kelio danga), asfalto dangų plastiški viršutiniai sluoksniai susibanguoja, t.y. dangoje atsiranda šlyties deformacijos. Bangos atsiranda viršutiniams dangos sluoksniams persistūmus žemiau esančių atžvilgiu. Šioms deformacijoms atsirasti ir didėti vasarą susidaro palankios sąlygos, nes danga periodiškai įkaista ir padidėja jos plastiškumas.

Veikiant apkrovai kelio danga išlinksta, bet apkrovą nuėmus danga grįžta į pradinę padėtį. Važiuojant sunkiasvoriams automobiliams, įlinkiai padidėja ir išsiplečia į visas puses. Įlinkis juda automobilio judėjimo kryptimi. Vykstant intensyviu transporto priemonių eismui, įlinkiai gali apimti visą važiuojamąją kelio dangos dalį, jei danga po apkrovų nespėja sugrįžti į pradinę padėtį, atsiranda įvairaus pobūdžio plastinės deformacijos. Esant kelio dangoje nelygumų, atsiranda dinaminių apkrovų deformacijos.

Pagrindinis asfalto trūkumas yra didelė jo savybių priklausomybė nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, mažėja bitumo klampa, tuo pačiu susilpnėja ir ryšiai tarp mineralinių medžiagų, dėl to mažėja asfalto dangos stiprumas. Temperatūrai mažėjant vyksta atvirkštinis

procesas: didėja bitumo klampa, kartu didėja ir asfalto stipris. Stiprio kaita nuo temperatūros pokyčio yra gana didelė, ir tai labai pablogina asfalto dangų darbo sąlygas. Labiausiai pasireiškiančios deformacijos karštuoju metų periodu yra bangos, išstūmimai, provėžos. Deformacijos ypač pradeda didėti, didinant apkrovą į asfalto dangą, esant mažiausiam dangos pastovumui, karštuoju metų periodu.

Išoriniai veiksniai (transporto priemonių apkrovų poveikis ir klimato sąlygos), kurie turi įtaką dangos deformacijų susidarymui:

- apkrova į transporto priemonės ašį ir didelis slėgis jos padangoje;
- sunkių apkrovų pasikartojimo kiekis ir trumpi laiko intervalai tarp jų, ypač važiujant daugiaašiams automobiliams;
- oro temperatūra ir saulės radiacija, kurių veikiama pakyla kelio dangos viršutinio sluoksnio temperatūra ir suprastėja fizikinės – mechaninės asfaltbetonio ir bitumo savybės.

Didžiausią įtaką kelio dangoms turi teigiamų ir neigiamų temperatūrų kaita. Asfalto dangos tamprumo modulis kylant jos temperatūrai mažėja, o krentant temperatūrai – didėja. Šis efektas yra svarbus vėžių atsiradimui (Braga 2005).

Dangos konstrukcijoje (dažniausiai – pagrindo sluoksnuose) užšalęs vanduo sąlygoja iškyklų susidarymą. Atšilus, konstrukcija tose vietose smarkiai susilpnėja dėl dangos sluoksnuose susidariusių oro ertmių, todėl greitai atsiranda plyšiai ir išdaužos. Kai kurių autorių teigimu, šaltis yra vienas iš pagrindinių veiksnių, sąlygojančių asfaltbetonio dangų irimą vidutinio ir šalto klimato šalyse (Čižas *ir kt.* 2000). Didelis kelio dangos prisotinimas vandeniu rudens ir žiemos periodais, periodiniai išalimai ir dažni atlydžiai žiemos metu, aukštas gruntinių vandenų lygis turi didelę įtaką asfaltbetonio dangų irimui.

Dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių iš birių medžiagų ir žemės sankasos gruntų stiprumui lemiamą įtaką turi sezoniniai drėgmės pokyčiai. Šiuo požiūriu kritinė padėtis susidaro pavasario polaidžio metu. Kelio dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių tamprumo ir sankasos deformacijos modulių reikšmės, apskaičiuotos pagal skirtingu metu laiku atliktų dangos įlinkių matavimo duomenis, ženkliai skiriasi.

Kelio dangos stiprio ir atskirų sluoksnių tamprumo modulio priklausomybė nuo sezoniškumo yra įvertinama ir projektuojant papildomus dangos konstrukcijos sluoksnius dangų stiprinimo atvejais. Tuo tikslu naudojami skirtingi aplinkos rodikliai skirtingais metų laikais (Fonad *ir kt.* 2002; Shoop *ir kt.* 2008; Wistuba *ir kt.* 2002).

Pagrindiniai klimato veiksniai, nuo kurių priklauso dangos darbas ir jos struktūros projektavimas, yra oro temperatūra ir krituliai. Kelio dangos konstrukcijos tarnavimo periodas skirtingose klimato sąlygose (kai kitos sąlygos identiškos) gali skirtis iki trijų kartų.

Temperatūros svyravimai turi trejopą poveikį medžiagoms ir visai dangos konstrukcijai:

- dangos asfalto sluoksnio tamprumo modulis kylant jos temperatūrai mažėja, o krentant temperatūrai – didėja. Šis veiksnys yra svarbus vėžių susidarymui.
- asfalto danga kylant jos temperatūrai plečiasi, o krentant temperatūrai – traukiasi. Dangoje gali susidaryti struktūriniai ir normaliniai (dažniausiai orientuoti skersine kryptimi) plyšiai.
- temperatūrai nukritus žemiau 0 °C, dangos konstrukcijoje esantis vanduo gali užšalti. Pagrindo sluoksniuose iš birių medžiagų užšalęs vanduo gali iššaukti iškylas. Rišikliais apdorotuose sluoksniuose vanduo susikaupia tam tikrose erdmėse – plyšiuose, duobėse ir pan., todėl jis užšalęs skatina šių pažaidų vystymąsi (VI seria badani na długoterminowych odcinkach testowych i modele degradacji nawierzchni. 1998; Ekdahl 1999).

Temperatūros svyravimų sukeltas neigiamas poveikis taip pat gali būti priskirtas ir prie vandens arba drėgnio sukeltamų neigiamų poveikių. Kitas vandens, esančio dangos konstrukcijoje, sukeltas neigiamas poveikis yra tas, kad jis sumažina pagrindo sluoksnių iš birių medžiagų tamprumo modulį, o tuo pačiu ir jų stiprumo savybes – atsparumą šlyčiai ir normaliniams įtempimams (Braga 2005).

Temperatūra veikia:

- a) asfalto plastinės savybės;
- b) asfalto temperatūrinius įtempius;
- c) žemės sankasos grunto įšalimą ir atšilimą.

Pagrindiniu asfalto, kaip kelių statybinės medžiagos, trūkumu yra didelė jo savybių priklausomybė nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, mažėja bitumo, esančio asfalto mišinyje, klampa, o tai susilpnina ir ryšius tarp mineralinių medžiagų ir sumažina asfalto dangos stiprumą.

Temperatūrai mažėjant vyksta atvirkštinis procesas: didėja bitumo klampa, o tuo pačiu didėja ir asfalto dangos stiprumas. Stiprumo kaita nuo temperatūros pokyčio yra gana didelė, ir tai labai pablogina asfalto dangų darbo sąlygas. Keičiantis stiprumui, keičiasi ir deformacinės asfalto dangos savybės. Asfalto dangų darbo sąlygos reikalauja, kad esant aukštomis aplinkos temperatūroms danga būtų pakankamai atspari plastinių deformacijų susidarymui, o esant žemoms temperatūroms – išliktų pakankamai plastiška.

Kelių oro sąlygų informacinėje sistemoje kaupiamų duomenų analizė rodo, kad žiemos mėnesiais esant oro temperatūrai apie -30 °C, kelio dangos paviršius atšąla iki -22 °C.

Vasaros sezono metu oro temperatūrai esant (25–30) °C, kelio dangos paviršius įkaista iki (40–45) °C (Čygas *ir kt.* 2004). Lietuvos teritorijoje slūgsantys gruntai nėra vienalyčiai, gruntų įvairovė lemia ir skirtingas inžinerines sąlygas. Pagrindiniais veiksniais, kurie apsprendžia gruntų deformacinių savybių ypatumus, dažniausiai laikomi ne tik jų granulimetrinė sudėtis bet ir poringumas bei drėgnio ir plastiškumo rodikliai. Teoriškai didėjant grunto drėgnumui ir atitinkamai keičiantis jo konsistencijai nuo kietos iki tokios, gruntų deformatyvumas didėja, o stiprumas – mažėja. Pagrindiniai žemės sankasos drėkinimo šaltiniai yra:

- atmosferiniai krituliai;
- paviršiaus vanduo;
- gruntinis vanduo.

Keliuose pagal drėkinimo sąlygas yra išskiriami trys vietovės tipai:

- sausos;
- drėgnos;
- įmirkusios.

Šie vietovės tipai skiriasi drėkinimo požymiu. Sausos vietos pasižymi tuo, kad paviršiaus vandens nuleidimas sutvarkytas, gruntinis vanduo nedrėkina žemės sankasos viršutinio sluoksnio. Drėgnose vietose dažniausia paviršiaus vandens nuleidimas nesutvarkytas, bet gruntinis vanduo taip pat kaip ir pirmuoju atveju nedrėkina žemės sankasos viršutinio sluoksnio. Dėl nesutvarkyto vandens nuleidimo šiose vietose pavasarį atsiranda balos. Įmirkusiose vietose gruntiniai vandenys arba nuleistas paviršiaus vanduo ilgą laiką (daugiau kaip 20 parų) drėkina žemės sankasos viršutinius sluoksnius. Taigi žemės sankasos drėkinimo laipsnis, charakterizuojamas santykinio drėgnumu, priklauso nuo vietovės drėkinimo sąlygų.

Gruntų iškylos dangos viduje ar jos apačioje susidaro dėl ledo susikaupimo didesnėse gruntų tuštumose, kurių tolimesnis išplitimas suformuoja ištisines ledo linzes, sluoksnius ir kitokio pavidalo ledo mases. Tyrimai rodo, kad ledo išsiskyrimas vyksta tik gruntuose, turinčiuose smulkių dalelių. Tokie gruntai laikomi šalčiui neatspariais. Priešingai šiems gruntams, švarus smėlis ir žvyras laikomi šalčiui atspariais. Atsparumo šalčiui laipsnis pagrindinai priklauso nuo smulkių dalelių kiekio, taip pat nuo dalelių formos, jų pasiskirstymo ir mineralinės sudėties.

Atšilimo periodas yra kritiškiausias momentas kasmetiniame aplinkos pokyčių cikle, veikiančiame dangas sezoninio šalčio poveikio zonose. Atšilimo periodu žymiai sumažėja žemės sankasos gruntų atsparumas. Grunto atsparumo sumažėjimas priklauso nuo temperatūros pasiskirstymo gruntuose atšilimo metu. Gilaus įšalo zonose visiškas pavasario

atšilimas yra žalingiausias atšilimo tipas, nes paveikia ne tik sankasos gruntus, bet ir apatinį pasluoksnį bei pagrindo sluoksnius.

Oro temperatūra, saulės radiacija, vėjas ir krituliai yra svarbiausi parametrai, lemiantys šalčio poveikį duotoje geografinėje zonoje. Pirmi trys faktoriai veikia dangos struktūros temperatūrinį režimą, įskaitant įšalo gylį, išalimo ir atšilimo ciklų skaičių ir jų trukmę. Krituliai pagrindinai veikia drėgmės režimą, bet turi įtakos temperatūriniams grunto savybių pokyčiams ir turi sąveiką su kitais klimatiniais faktoriais (Višniakas, I. *ir kt.* 2005; Pavement Performance Database User Reference Guide FHWA-RD-03-088).

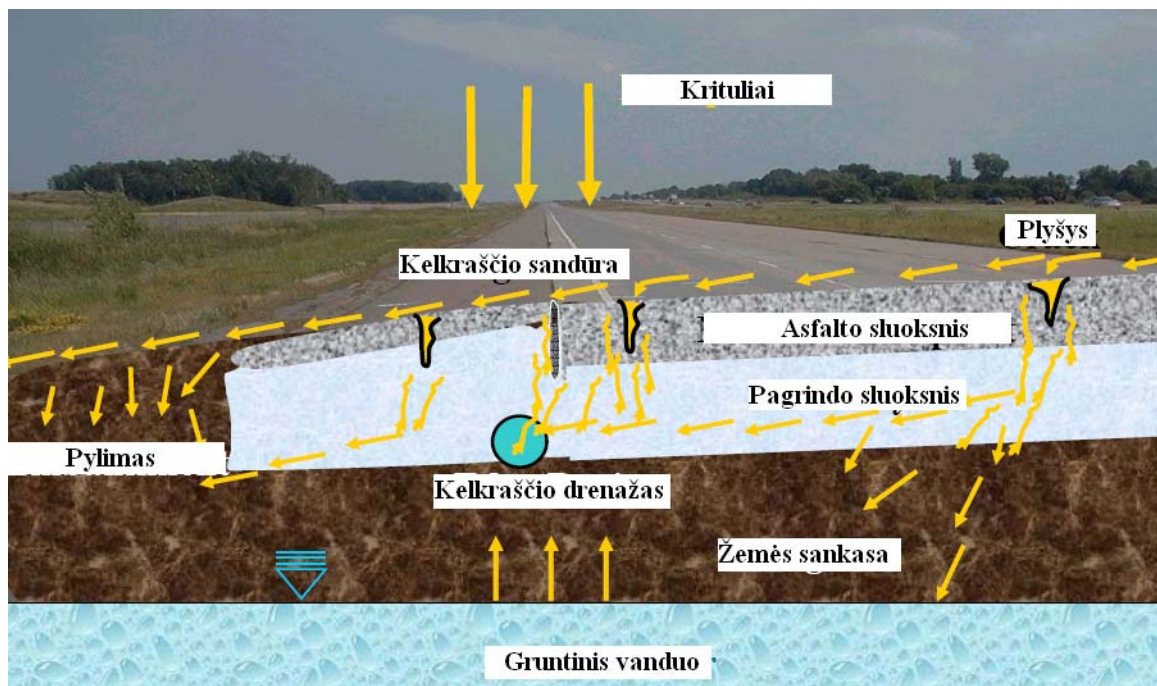
Šalčio poveikis sukelia iškyšas ir dangos struktūros susilpnėjimą atšilimo periodu. Šis susilpnėjimas nustatomas, atliekant įlinkio matavimus.

Temperatūra turi įtakos ir asfalto charakteristikoms. Dangos darbas įtakojamas trimis būdais:

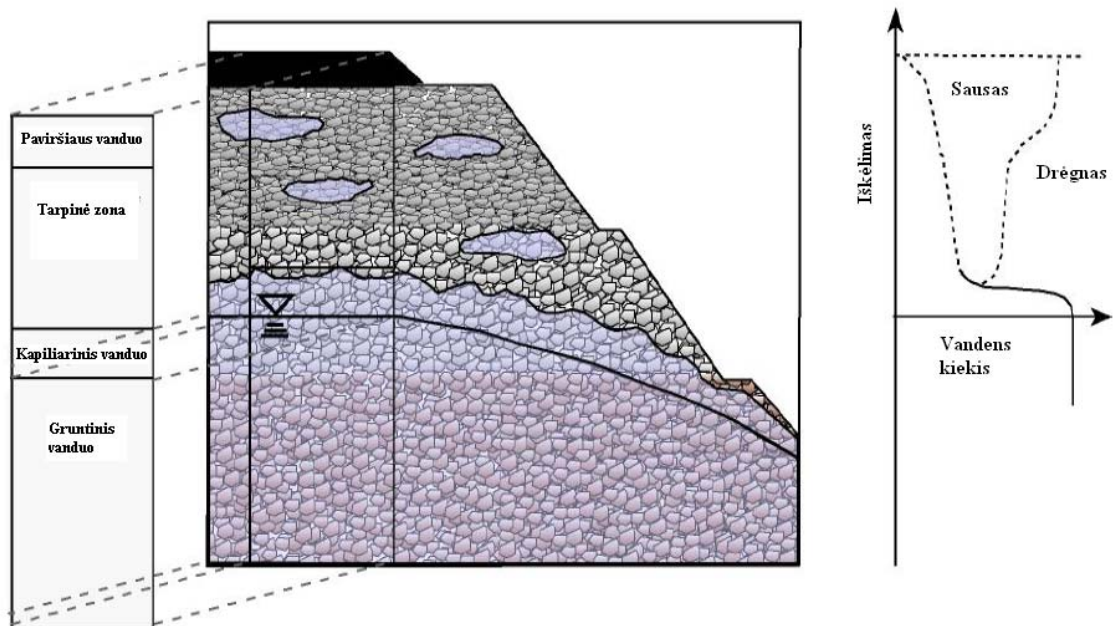
- plyšių nuo žemos temperatūros atsiradimu;
- nuovargio plyšių susidarymu;
- vėžių susiformavimu.

Drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijos stipriui

Vandens pertekliaus ir augančių eismo apkrovų derinys dažnai iššaukia priešlaikinę dangos struktūros irimą. Vanduo į dangos struktūrą patenka įvairiais būdais: per plyšius, dėl aukšto gruntinio vandens lygio ir kt. Vandens judėjimas kelio konstrukcijoje ir vertikalus vandens kiekio pasiskirstymas pateikti 2.8 pav. ir 2.9 pav.



2.8 pav. Vandens judėjimas dangos konstrukcijoje (COST Action 351 – WATMOVE 2007)



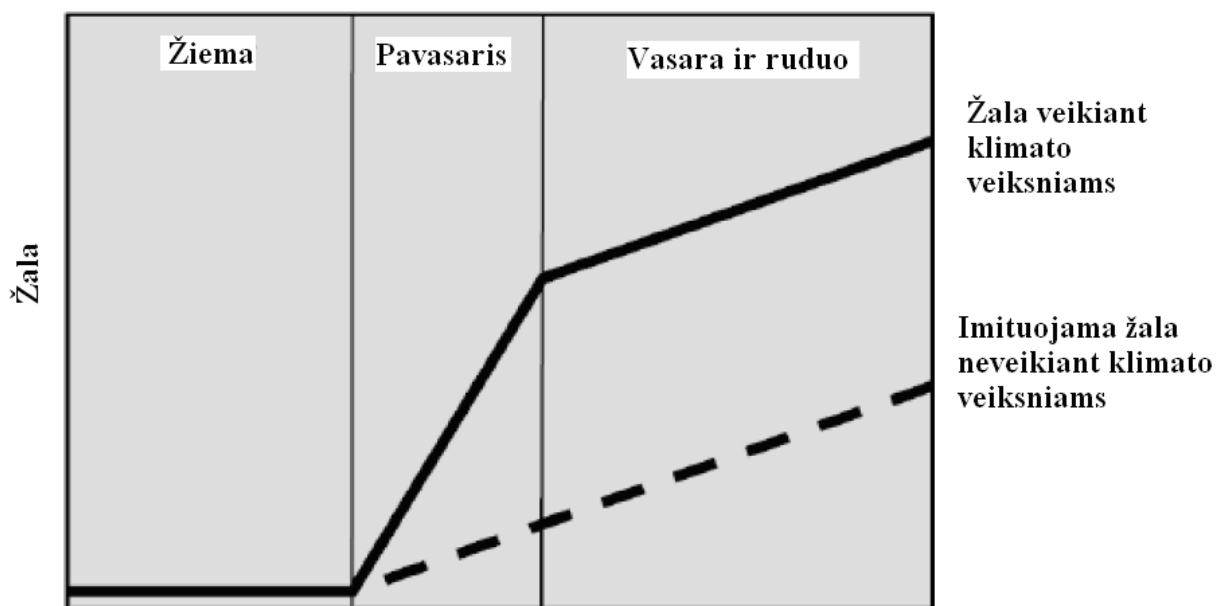
2.9 pav. Vertikalus vandens kiekio pasiskirstymas

Drėgmės, patekusios į dangos struktūrą, poveikis kelio dangai:

- sumažina nesurištų granuliuotų medžiagų atsparumą;
- sumažina žemės sankasos gruntų stiprumą;
- sukelia smulkių medžiagos dalelių išsiurbimą, ko išdavoje sumažėja dangos stabilumas.

Drėgno periodo metu sumažėjus žemės sankasos grunto ir dangos pagrindo stipriui, sumažėja ir visos dangos konstrukcijos stipris (Zollars *ir kt.* 2002).

Lietuvoje kritiškiausias yra pavasario periodas, kai žemės sankasa ir kelio konstrukcija atšyla (apie kovo mėnesį), ir konstrukcijos sluoksniai yra labiausiai prisotinti vandens. Vanduo dangos konstrukcijoje, ypač sluoksniuose iš birių medžiagų, turi įtakos jų tamprumo moduliui, o taip pat ir atsparumą apkrovoms. Tačiau drenavimo sąlygas apsprendžia ir kai kurie kelio techniniai rodikliai – skersinis profilis (sankasos aukštis, griovių gylis), dangos konstrukcija (šalčiui atsparaus drenuojančio sluoksnio storis), darbų ir medžiagų kokybė. Dangos konstrukcijos darbas veikiant ir neveikiant klimato veiksniams pateikta 2.10 pav.



2.10 pav. Kelio konstrukcijos elgsena veikiant ir neveikiant klimato veiksniams (COST Action 351 – WATMOVE 2007)

Iš 2.10 pav. pastebima, kad klimato veiksniai turi didelę įtaką kelio dangos konstrukcijos darbui. Ypač ženklus klimato veiksnių pokytis pastebimas pavasario mėnesį.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Pagrindiniai klimato veiksniai nuo kurių priklauso dangos stipris ir būklė yra saulės spinduliuotė, oro temperatūra, krituliai, vėjas, sniego danga ir sezoniniai pokyčiai.
2. Didžiausią įtaką kelio dangoms turi teigiamų ir neigiamų temperatūrų kaita. Esant tiek žemai, tiek ir aukštai temperatūrai, pasikeičia dangos medžiagų deformacinės savybės (plastinės);
3. Drėgno periodo metu sumažėjus žemės sankasos grunto ir dangos pagrindo stipriui, sumažėja ir visos dangos konstrukcijos stipris.

3. Temperatūros ir drėgnio įtakos asfalto dangos konstrukcijos stipriui tyrimai

3.1 Tyrimų susijusių su temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijai analizė

Asfalto dangos stipris yra nepastovus dydis priklausantis nuo nuolatinės temperatūros kaitos ir temperatūros pokyčių kiekviename dangos konstrukcijos sluoksnyje. Laszlo Petho 2008 m. (Vengrija) nagrinėjo temperatūros pokyčių įtaką dangos konstrukcijos standumui ir nuovargiui nustatant, kuris sezonas ar dienos metas turi didžiausią įtaką. Kadangi dangos konstrukciją sudarančių medžiagų savybės priklauso nuo temperatūros, tai buvo analizuojama kokiai temperatūrai esant atsiranda dangos konstrukcijos nuovargis.

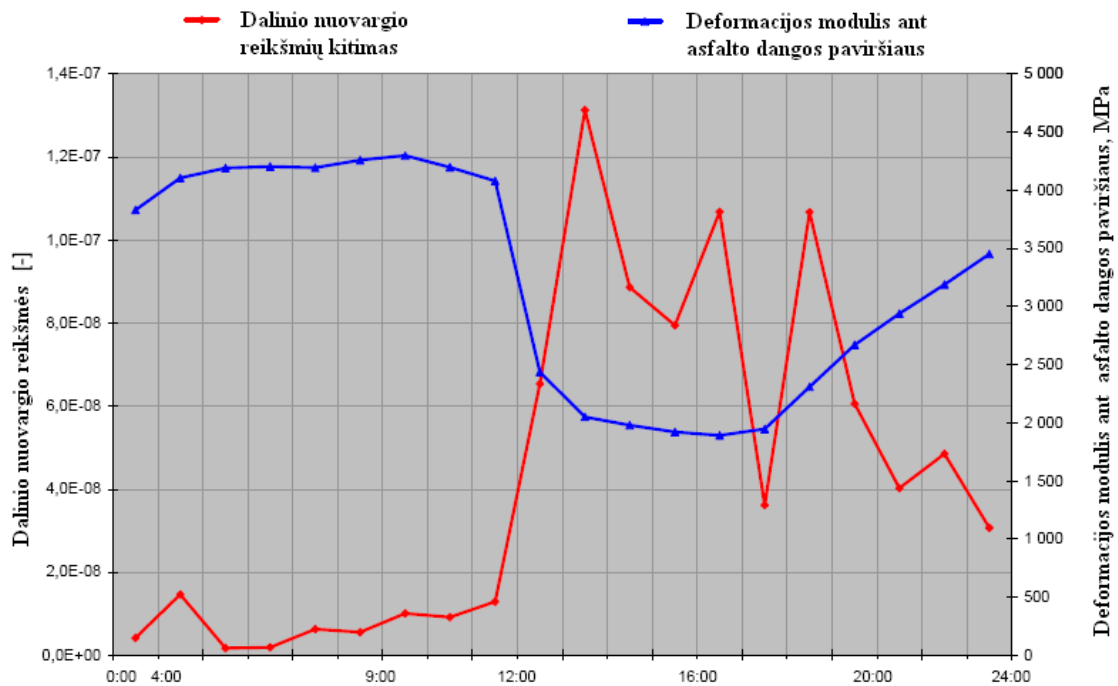
Vertikalus temperatūros pasiskirstymas kelio dangos konstrukcijoje priklauso nuo klimato sąlygų, šiluminių savybių dangos pagrinde ir žemės sankasoje, taip pat dangos konstrukcijos sluoksnio storio.

Vengrų asfalto mišinių gamyklos specialistai įrengė temperatūros daviklius (BBS-03), kurie buvo išdėstyti tokia gylyje: 0 cm, 2 cm, 7 cm, 14 cm, 29 cm, 49 cm nuo dangos paviršiaus, daviklių tikslumas 0,1 °C.

Buvo sukurti keturi skirtingi dangos konstrukcijos modeliai remiantis nustatytomis standumo reikšmėmis bei temperatūros davikliais išmatuota temperatūra. Tyrimo metu buvo galima tiksliai nustatyti temperatūrą esančią tam tikrame dangos konstrukcijos gylyje ir pagal temperatūros reikšmes gauti dangos konstrukcijos standumą.

Bandymui buvo naudojami keturių tipų asfalto mišiniai. Standumo reikšmės priklausomai nuo temperatūros buvo nustatomos regresine koreliacija. Esant temperatūrai nuo -20 °C iki +10 °C standumo ir temperatūros priklausomybė yra tiesinė, nuo +10 °C iki +50 °C – naudojamas 3-jų laipsnio daugianaris. Taip yra nustatoma koreliacija tarp standumo ir temperatūros reikšmių.

Svarbu yra tai, kad asfalto mišinys gali būti apibūdinamas nustatyto standumo reikšmėmis ir temperatūra. Standumo kitimas dėl temperatūros turi įtaką projektuojant dangos konstrukciją. Dangos konstrukcijos struktūros kitimas priklausomai nuo laiko ir temperatūros pateiktas 3.1 pav.



3.1 pav. Dangos konstrukcijos struktūros kitimas priklausomai nuo laiko ir temperatūros

Tyrimo metu nustatyta, kad asfalto dangos konstrukcijos nuovargis didėja didėjant temperatūrai. 3.1 pav. pavaizduota vienos vasaros dienos nuovargio kitimo reikšmės priklausomai nuo laiko ir temperatūros. Iš diagramos pastebima, kad nuovargio reikšmės ženkliai padidėja popietės metu lyginat su dangos konstrukcijos nuovargiu auštant. Toks nuovargio reikšmių pasiskirstymas priklauso nuo transporto priemonių eismo intensyvumo. Vidurdienį piko metu ir anksti vakare dangos konstrukciją veikia didesnės transporto priemonių apkrovos, todėl dangos konstrukcijos nuovargis padidėja. Aukštos temperatūros didėjimas sukelia net tik vėžių susidarymą, bet ir mažina dangos konstrukcijos laikomąją galią.

COST Action 351 WATMOVE (Water Movements in Road Pavements and Embankment) kasmetinėje ataskaitoje yra nagrinėjamas vandens judėjimas kelio dangos konstrukcijoje, kadangi vanduo esantis dangos konstrukcijoje yra viena iš priežasčių, sukeliančių dangos struktūros irimą. Analizuojamas vandens judėjimas, jo poveikis dangos konstrukciją sudarančioms medžiagoms bei vandens kiekio matavimai nurodant vandens susitelkimo vietą, tėkmę.

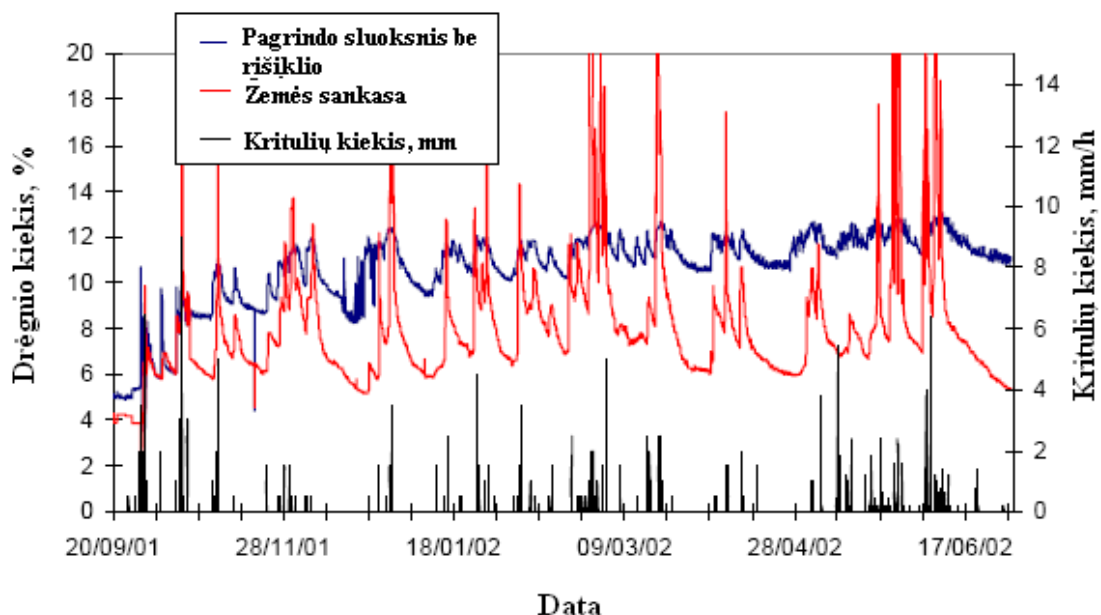
Ne tik didėjantis transporto priemonių skaičius, apkrovos daro neigiamą įtaką dangos konstrukcijai, bet ir klimato veiksniai. Iškritęs didelis kritulių kiekis ar padidėjęs vandens nuotėkis į dangos konstrukciją sutrumpina dangos konstrukcijos tarnavimo laiką. Todėl COST 351 ataskaitoje vienas iš pagrindinių tikslų buvo nustatyti vandens judėjimą ir

drėgnio pasiskirstymą dangos konstrukcijos sluoksniuose esant skirtingoms dangos konstrukcijoms bei klimato sąlygoms, 3.2 pav.



3.2 pav. Provėžų ir plyšių atsiradimas kelio dangos konstrukcijoje dėl blogo vandens drenažo (COST Action 351 – WATMOVE 2007)

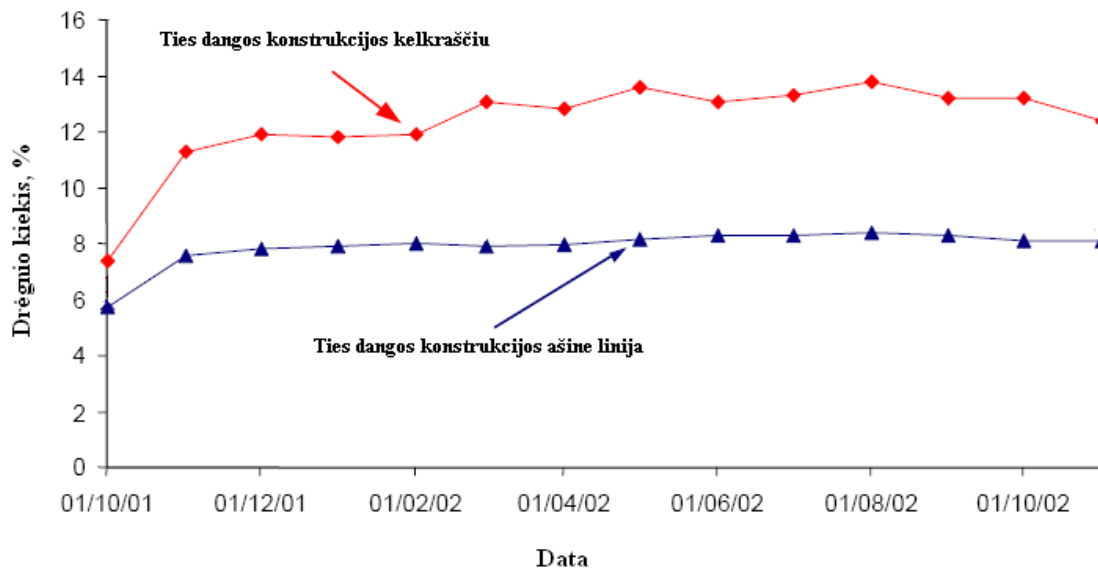
Ataskaitoje yra analizuojamas vandens ir dangos konstrukciją sudarančių medžiagių sąveika, ypač vandens poveikis nerišliems dangos konstrukcijos sluoksniams ir žemės sankasos gruntams. 3.3 pav. pavaizduotas vandens kiekio pokytis pagrindo sluoksnyje be rišiklio ir žemės sankasoje važiuojamosios dalies kelkraštyje mažo intensyvumo kelyje.



3.3 pav. Vandens kiekio pokytis pagrindo sluoksnyje be rišiklio ir žemės sankasoje (COST Action 351 – WATMOVE 2007)

Analizuojant 3.3 pav. pastebima, kad drėgnio kiekis dangos konstrukcijoje priklauso nuo klimato sąlygų, labiausiai nuo kritulių kiekio bei užšalimo ir atšilimo ciklų. Ženklus drėgnio kiekio padidėjimas iškritus dideliame kritulių kiekiui pasireiškia žemės sankasoje.

Kritulių kiekis didžiausią įtaką daro kelio dangos konstrukcijai ties važiuojamosios dalies kelkraščiu. Vidutinis mėnesio drėgnio kiekio pagrindo sluoksnyje be rišiklio ties dangos konstrukcijos ašine linija ir ties važiuojamosios dalies kelkraščiu pasiskirstymas pavaizduotas 3.4 pav.



3.4 pav. Vidutinis mėnesio drėgnio kiekis pagrindo sluoksnyje be rišiklio ties dangos konstrukcijos ašine linija ir važiuojamosios dalies kelkraščiu pasiskirstymas (COST Action 351 – WATMOVE 2007)

Drėgnio kiekis kelio konstrukcijoje nustatomas šiais metodais:

1. Ardomieji metodai:

- Gravitation method

2. Neardomieji metodai:

- Neutron scattering method (Neutronų sklaidos metodas) – tai tikslus metodas grunto drėgnio kiekio nustatymui;
- Time Domain Reflectometry techniques (TDR) – tai metodas, kai skleidžiami aukšto dažnio impulsai ir taip sudaromas elektromagnetinis laukas aplink zondą;
- Ground Penetrating Radar GPR (Grunto prasiskverbimo radaras) – elektromagnetinėmis bangomis nustatomas dangos sluoksnio storis ir

aptinkami tam tikri pokyčiai dangos konstrukcijoje (struktūros pasikeitimas, didelis drėgnio kiekis ir kt.).

- Capacitance measurements (Talpinės varžos matavimai)
- Nuclear Magnetic Resonance (Branduolinis magnetinis rezonansas) (COST Action 351 WATMOVE 2006).

Sezoninis dangos konstrukcijos stebėjimas Islandijoje

COST Action 351 WATMOVE ataskaitoje buvo atliekamas sezoninis dangos konstrukcijos stebėjimas Islandijoje. Islandijos kelių administracija (ICERA – Iceland Road Administration) atliko tyrimą, kurio metu analizavo klimato įtaką kelio dangos konstrukcijos stiprumui. Pagrindinis šio tyrimo tikslas buvo kaupti informaciją apie besikeičiančias aplinkos sąlygas (temperatūrą, drėgnį, šaltį ...) ir dangos konstrukcijos stiprumą. Bandomajame kelio ruože buvo įrengti temperatūros ir drėgnio davikliai, kurių įrengimo darbai pateikti 3.5 pav.



a)



b)



c)

3.5 pav. Temperatūros ir drėgnio daviklių įrengimo darbai:

a) šurfo kasimas

b) temperatūros ir drėgnio daviklių įrengimo vieta

c) temperatūros ir drėgnio daviklių įrengimo ir užtaisymo darbai

Vienas iš pažangesnių temperatūros matavimo metodų yra temperatūrinis savitosios varžos zondas, kuris pateiktas 3.6 pav.

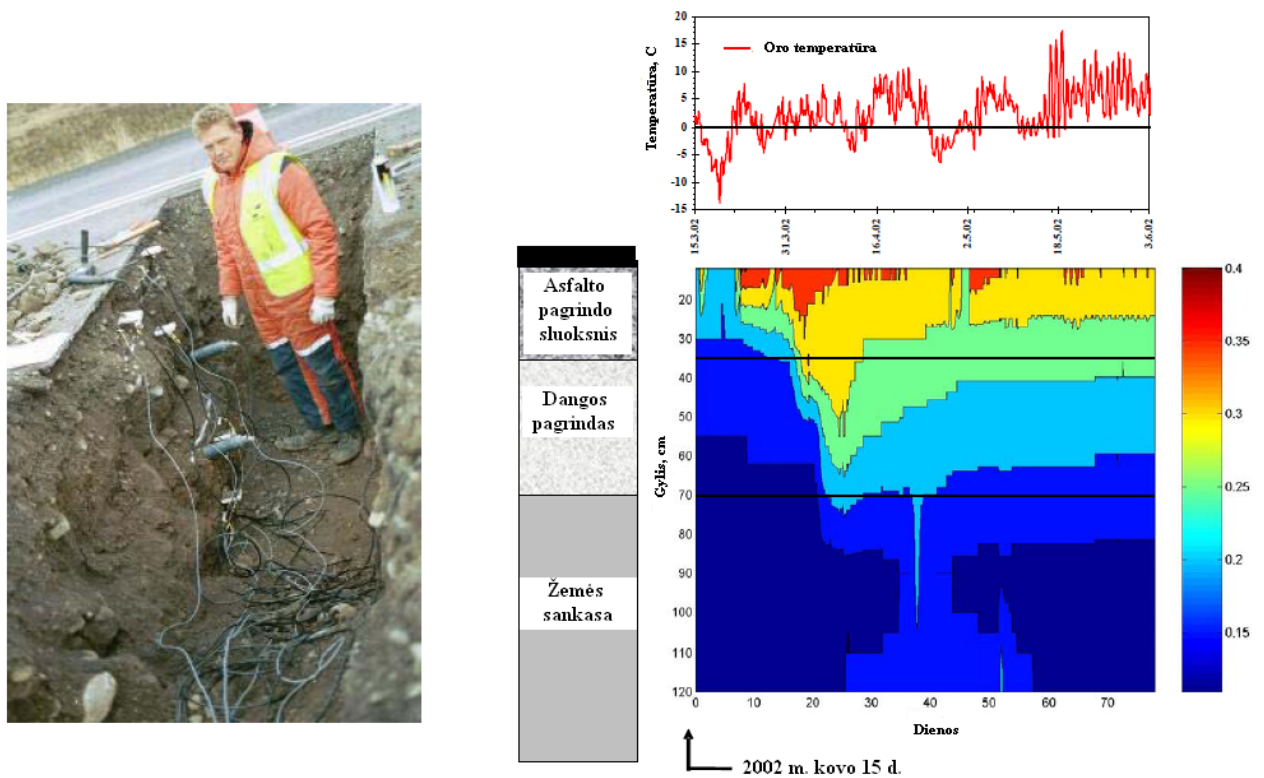


3.6 pav. Temperatūrinis savitosios varžos zondas

Eksperimento metu buvo matuojama ir stebima:

- gruntinio vandens lygis;
- šalčio prasiskverbimas;
- drėgnio (TDR) ir temperatūros stebėjimas;
- savitosios varžos tikrinimas;
- Meteorologiniai duomenys (krituliai, oro temperatūra ir kt.);
- FWD matavimai.

Vienas iš pagrindinių tikslų buvo sukaupti kuo daugiau žinių apie užšalimo ir atšilimo įtaka kelio dangos konstrukcijos stiprumui tam, kad sukurti metodus ašinės apkrovos sumažinimui. Buvo stebimi temperatūros pokyčiai, drėgnio kiekis ir elektrinis savitasis laidumas, matuojami kas vieną valandą. 3.7 pav. pateiktas vienas iš tyrimų pavyzdžių, nurodantis užšalimo ir atšilimo periodą, stebint nuo 2002 m.



3.7 pav. Drėgnio kitimas priklausomai nuo gylio ir laiko, stebint nuo 2002 m. kovo 15 d.

Nustatyta, kad oro temperatūra aukščiau 0°C vyrauja nuo kovo 19 d. ir to pasekoje, drėgnio kiekis viršutiniame pagrindo sluoksnyje ženkliai padidėja. Atodrėkio metu drėgnio kiekis didėja ir skverbiasi gilyn į kitus pagrindo sluoksnius bei žemės sankasą. Po mėnesio drėgnio kiekis sumažėja ir pavasario atodrėkis baigiasi (COST Action 351 WATMOVE 2006).

Temperatūros poveikis asfalto dangos konstrukcijai priklauso nuo daugelio priežasčių: transporto priemonių greičio, apkrovų, vietos aplinkos temperatūros, kritulių kiekio ir saulės spinduliuotės, visa tai gali ženkliai pakeisti temperatūros poveikį kelio dangai.

Škotijoje Transporto tyrimų laboratorijoje (TRL) tris vasaras buvo stebėta ir registruota vidutinė maksimali dienos temperatūra asfalto dangos paviršiuje. Didžiausios maksimalios dangos paviršiaus temperatūros reikšmės, užregistruotos atskirose vietovėse, buvo nuo 43°C iki 44°C . Šios temperatūros reikšmės buvo registruojamos karštomis vasaros dienomis, tačiau maksimali dienos temperatūra bandymų metu buvo retai užfiksuojama didesnė nei 45°C . Esant 45°C temperatūrai asfalto danga yra linkusi deformuotis. Trijų metų tyrimo analizės duomenimis nustatyta, kad temperatūra 25 mm gylyje nuo dangos paviršiaus retai pakyla aukščiau 40°C .

Tuo laiku, kai asfalto dangos temperatūra aukšta yra svarbus veiksnys. Todėl buvo atliekamas bandymas, kurio metu danga buvo kaitinama mažiausiai 4 val. 45°C

temperatūroje ir 1 val. atliekami bandymai esant tai pačiai dangos temperatūrai. Rezultatai parodė, kad asfalto dangos temperatūra aukštesnė nei 44,5 °C buvo 1 val. per 20 metų ir 3,5 val. per 100 metų. Taigi tikėtina, kad nuo aukštos temperatūros deformacijos asfalto dangos konstrukcijoje galėtų atsirasti tik kartą per 20 m. Buvo pradėta nagrinėti ar padidėjusi asfalto dangos temperatūra neturi neigiamos įtakos dangos paviršiaus stiprumui ir ar dangos plėtimasis ir susitraukimas neturi didelio poveikio asfalto dangos vientisumui.

Transporto tyrimų institutas padarė išvadą, jog mažai tikėtina, kad asfalto dangos konstrukcija ilgai veikiama aukštos temperatūros gali deformuotis 20 metų laikotarpyje.

Esant aukštesnėms kasmetinėms temperatūros reikšmėms, atliekant įvairius dangos konstrukcijos analizavimo metodus, reikia būtinai atsižvelgti į temperatūros poveikį. Nustatytos standumo reikšmės yra naudojamos analizei ir projektavimui. Kuo vidutinė asfalto dangos temperatūra yra aukštesnė, tuo dangos konstrukcijos medžiagos pasižymės mažesnėmis standumo savybėmis. Kuo mažesnis standumas, tuo storesnė turėtų būti dangos konstrukcija, nes tai prailgintų tarnavimo laiką. Dangos konstrukcijos projektuojamos 20 m., bet šiuo metu daug dangos konstrukcijų ir pagrindinių kelių yra suprojektuoti 40 m. laikotarpiui. Todėl prailginant dangos konstrukcijos eksploatavimo trukmę yra pagerinamos dangos konstrukcijos medžiagų standumo savybės, lyginant kokios buvo praeityje.

Yra manoma, kad provėžų susidarymo priežastis dangos konstrukcijoje yra ne aukša temperatūra, o sunkiasvorių transporto priemonių apkrovos poveikis. Ypatingai didelį neigiamą poveikį dangos konstrukcijai turi padidėjęs sunkiasvorių transporto priemonių skaičius su viengubais ratais, o ne su dvigubais ratais.

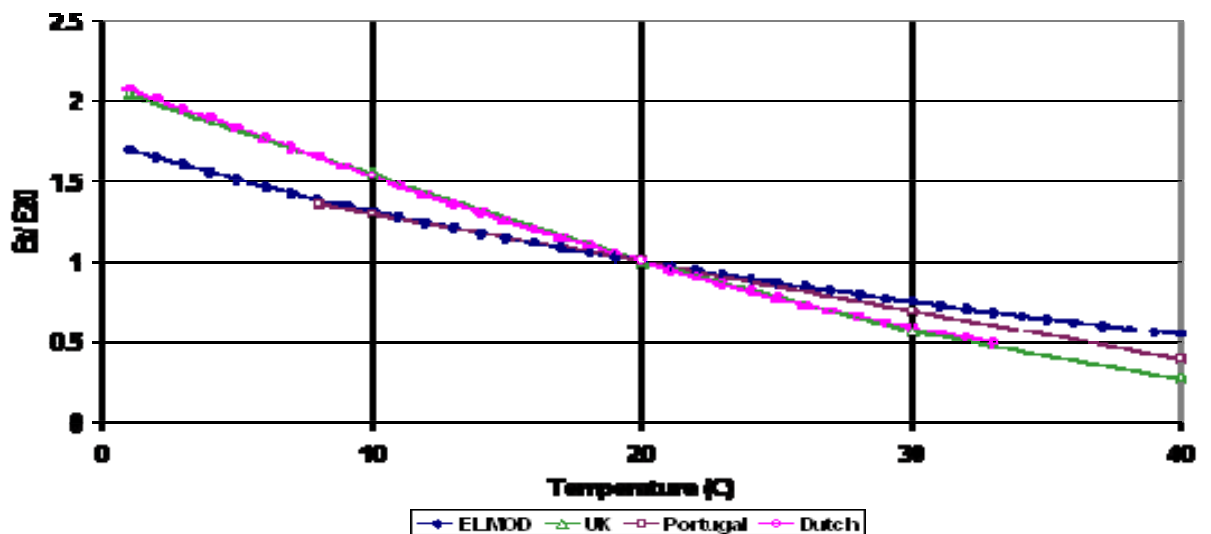
Todėl rekomenduojama, kad medžiagų su bitumu standumo savybės būtų reikalaujamos įrengimo ir eksploatavimo metu, tam kad sumažinti deformacijų atsiradimą dangos konstrukcijoje veikiant aukštai temperatūrai.

3.2 Temperatūros redukavimo metodai taikomi kitose šalyse

Daugelyje pasaulio šalių kelio dangos stiprio vertinimui plačiai naudojamas įlinkių matavimas krintančio svorio deflektometru. Išmatavus įlinkius galima greitai ir tiksliai nustatyti dangos konstrukcijos stiprį. Asfalto dangos sluoksnių standumas, o taip pat krintančio svorio deflektometru išmatuoti įlinkiai ir apskaičiuotos E_0 modulių reikšmės priklauso nuo dangos temperatūros. Dėl temperatūros pokyčių asfalto dangos E_0 modulis kylant jos temperatūrai mažėja, o krintant temperatūrai – didėja.

Matuojant kelio dangos įlinkius skirtingu metų laiku, skirtingomis dienomis ir įvairiu paros metu dėl klimatinių ir techninių veiksnių sunku užtikrinti analogiškas matavimo sąlygas: apkrovą, oro ir asfalto sluoksnio vidutinę temperatūrą. Todėl tam, kad gauti tikslius matavimų rezultatus šie parametrai pirmiausia turi būti perskaičiuojami (redukuojami) į jų ekvivalentines reikšmes esant standartinei temperatūrai ir apkrovai. Dangos temperatūrą reikia žinoti ne tik matavimo rezultatų redukavimui į standartines sąlygas, bet ir prieš pradedant matavimus. Jei dangos asfalto sluoksnio temperatūra yra per aukšta arba per žema, tai matavimo rezultatų redukavimas standartinei temperatūrai bus netikslus. Asfalto sluoksniai prie nustatytos standartinės temperatūros turintys labai skirtingus E_0 modulius, esant žemai temperatūrai gali turėti artimus E_0 modulius, o tai neišvengiamai iškreipia matavimo rezultatus. Idealiausia žinoti tikslią temperatūros kaitą asfalto sluoksnyje nuo viršaus iki apačios, bet praktika rodo, kad ir mažiau tikslūs asfalto sluoksnio temperatūros matavimai yra pakankami.

Kelio dangos konstrukcijos stipris bei jo priklausomybė nuo temperatūros ir sezoniškumo nagrinėjami daugelio šalių mokslininkų. Vienas iš didžiausių kelio dangų konstrukcijų bandymo poligonų buvo įrengtas 1989 metais Prancūzijos kelių ir tiltų tyrimų centre. Čia įvairių Europos šalių mokslininkai tyrė ir vertino trijų skirtingų kelio dangų konstrukcijų darbą, apkraunant jas skirtingo dydžio apkrovomis, fiksuojant dangų sluoksniuose įrengtų deformacijų, įtempių, temperatūros ir drėgmės daviklių parodymus. 2006 – 2007 metais kelio dangų konstrukcijų tyrimai, panaudojant šešis skirtingus daviklius buvo atlikti Maino universitete (Lauren, Y. *ir kt.* 2007) (Lauren J. *ir kt.* 2007). Davikliai buvo įrengti skirtinguose kelio dangos konstrukcijos sluoksniuose, siekiant nustatyti sezoniškumo įtaką kelio dangos konstrukcijos stipriui. Kelio dangos eksperimentinių konstrukcijų tyrimai, siekiant nustatyti jų atskirų sluoksnių stiprumo kitimą konstrukcijos užšalimo – atšilimo periodais, buvo atlikti JAV (Shoop, S. *ir kt.* 2008). Čia deflektometru (FWD) buvo tiriamos kelio dangų konstrukcijos stiprumas skirtingais metų periodais, siekiant nustatyti atskirų sluoksnių atsparumą šalčio poveikiui. COST 333 (European Cooperation In The Field of Scientific And Technical Research) darbe buvo atlikta asfalto sluoksnio standumo redukavimo kelio dangos temperatūrų analizė. Šio darbo ataskaitose pateiktos rekomenduojamų temperatūrų reikšmės kinta nuo +15 iki + 25 (°C), o dažniausiai pasitaikanti temperatūra yra +20 °C. Rekomenduota, kad redukavimo procedūra turi būti atlikta su išmatuotais įlinkiais, kai jie tiesiogiai naudojami apskaičiuojant deformacijas. Tačiau, jeigu įvairių sluoksnių standumo modulis yra gaunamas iš išmatuotų įlinkių, tai asfalto sluoksnio standumas gali būti redukuotas standartinėms sąlygoms (COST 336 Report, 1997). Šiuo metu Europoje naudojami temperatūros/asfalto sluoksnių standumo santykiai pavaizduoti 3.7 pav.



3.8 pav. Asfalto sluoksnio standumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros (COST 336 Report, 1997)

Šiame paveiksle pavaizduoti temperatūros ir asfalto sluoksnių standumo santykiai, kurie nustatyti Dynatest „ELMOD“ programa Danijoje, Jungtinėje Karalystėje, Portugalijoje, Olandijoje (COST 336 Report, 1997). Horizontali grafiko ašis rodo kelio dangos temperatūrą, o vertikali – redukcijos koeficientą.

Siekiant įvertinti kelio dangos stiprio priklausomybę nuo temperatūros ir atskirų sluoksnių E modulių priklausomybę nuo sezoniškumo, kuriant Lietuvos automobilių kelių dangų valdymo sistemą, buvo atlikti išsamūs tyrimai Lietuvos keliuose (Braga 2005; Puodžiukas *ir kt.*, 2002; Šiaudinis *ir kt.*, 2007; Šiaudinis 2007).

Ott Talvik ir Andrus Aavik rekomenduoja taikyti ir vertinti įlinkio dubens parametrų reikšmes: paviršiaus išlinkio indeksą (PII), pagrindo sluoksnių pažaidos indeksą (PPI) ir pagrindo grunto išlinkio indeksą (PGII).

- Paviršiaus išlinkio indeksas (PII) – tai įlinkio, matuoto po apkrovos plokšte (d_0) ir 300 mm atstumu nuo apkrovos pridėties centro (d_{300}), skirtumas: $d_0 - d_{300}$, $d_0 - d_r$, kur $r \in [450, 600]$ apibūdinantis dangos paviršiaus būklę.
- Pagrindo sluoksnių pažaidos indeksas (PPI) - tai įlinkio, matuoto 300 mm atstumu nuo apkrovos pridėties centro (d_{300}) ir 600 mm atstumu nuo apkrovos pridėties centro (d_{600}), skirtumas: $(d_{300} - d_{600})$, apibūdinantis pagrindo sluoksnių būklę.
- Pagrindo grunto išlinkio indeksas (PGII) - tai įlinkio, matuoto 1200 mm atstumu nuo apkrovos pridėties centro (d_{1200}) ir 1500 mm atstumu nuo apkrovos pridėties centro

(d_{1500}), skirtumas: ($d_{1200} - d_{1500}$), apibūdinantis žemės sankasos būklę. Amerikoje naudojama tokia formulė: ($d_{600} - d_{900}$), Suomijoje – ($d_{900} - d_{1200}$)

Standartiniais FWD matavimams naudojama ta pati apkrova ir apkrovos kritimo aukštis, tačiau apkrova veikianti dangos paviršių priklauso nuo vietovės sąlygų. Veikiama apkrova daro poveikį dangos standumui ir paviršiaus profiliui. Norint palyginti dangos įlinkių reikšmes reikia jas normalizuoti į standartinę apkrovą ($p_{\text{redukuojamas}}/p_{\text{išmatuotas}}$). Planuojama apkrova 50 kN, kai standartinė ašinė apkrova Estijoje 100 kN. 50 kN apkrova, kai apkrovos plokštės skersmuo lygus 300 mm, atitinka 707 kPa kontaktinį slėgį pagal *COST336:1999 Falling Weight Deflectometer*.

Asfalto dangos sluoksnio deformacijos modulis E_0 taip pat priklauso ir nuo temperatūros. Išmatuoti įlinkiai tos pačios dangos konstrukcijos esant skirtingai temperatūrai yra nevienodi priklausomai nuo asfalto dangos sluoksnio standumo. FWD matavimo metu asfalto dangos sluoksnio temperatūra gali kisti (+5...+35) °C intervalo ribose. Tuo tikslu, įlinkių reikšmės turi būti redukuojamos į standartinę asfalto dangos temperatūrą. Atsižvelgiant į Estijos nestandžių dangų rekomendacijas standartinė asfalto dangos temperatūra matavimų metu yra +10 °C. Matavimų duomenų redukavimas standartinei asfalto dangos temperatūrai +10 °C atliekamas nustatius asfalto dangos temperatūros redukcijos koeficientą K_T . Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_T = 0,000203 \cdot T^2 - 0,014841 \cdot T + 1,127603, \quad (3.1)$$

Čia: T – vidutinė dangos sluoksnių temperatūra, išmatuota tyrimų metu, °C.

Taigi FWD išmatuoti įlinkiai yra redukuojami į nustatytą apkrovą 50 kN ir standartinę

temperatūrą +10 °C pagal tokią formulę: $d_{r50kN} = d_r \cdot \frac{p_{\text{reduk}}}{p_{\text{išmat}}} \cdot K_T, \quad (3.2)$

Čia: d_{r50kN} – išmatuotas įlinkis redukuotas 50 kN apkrovai ir +10 °C standartinei temperatūrai nuo apkrovos pridėties taško; d_r – įlinkis apkrovos taške (μm); p_{reduk} – kontaktinis slėgis į kelio dangą atitinkantis 50 kN apkrovą; $p_{\text{išmat}}$ – kontaktinis slėgis į kelio dangą nuo apkrovos pridėties taško; K_T – temperatūros redukcijos koeficientas.

Estijos kelių duomenų banke sukauptų duomenų analizė paneigė hipotezę, kad egzistuoja priklausomybė tarp įlinkio dubens parametrų ir dangos defektų. Nustatyta stipri koreliacija tarp įlinkio dubens parametrų ir perskaičiuoto ekvivalentinio dangos tamprumo modulio. Taip pat nustatyta stipri viršutinių dangos sluoksnių rodiklių (PII ir PPI) priklausomybė nuo dangos ekvivalentinio tamprumo modulio (E_{ekv}). Tyrimo metu nustatyta pagrindo grunto išlinkio indekso PGII priklausomybė nuo E_{ekv} nebuvo labai stipri. Remiantis minėtomis priklausomybėmis ir reikalingu minimaliu konkrečios dangos ekvivalentiniu

moduliu, sudarytos lygtys įlinkio dubens parametrų ribinėms reikšmėms nustatyti atskiro tipo dangoms (Talvik, O. *ir kt.* 2009).

Seo, J. W. *ir kt.* (2009) vertinant nestandžių dangos konstrukcijos sluoksnių savybes rekomenduoja taikyti pseudo-static perskaičiavimo metodą. Pseudo-static procesas vadinamas DYN-BAL (Dynamic BALMAT-Back Analysis of Layer Modulus and AC Thickness) buvo sukurtas tam, kad apskaičiuoti dangos sluoksnio modulį po to kai dinaminis įlinkis yra paverčiamas į statinį.

Pietų Korėjoje atliekant FWD matavimus yra naudojama kintama apkrova, bet dažniausiai 40 kN. Apkrovos plokštės skersmuo 30 cm. Tyrimo rezultatai parodė, kad vyraujantis skirtumas tarp dinaminės analizės ir statinės analizės priklauso nuo medžiagų savybių, taip pat sumažina skirtumą tarp teorinių prognozių ir praktinio tyrimo. Perskaičiavimo procesas naudojamas įvertinti dangos struktūros savybes pagal paviršiaus įlinkio dubenį matuojant FWD. Tačiau naudojant perskaičiavimo metodiką paviršiaus įlinkio dubuo gaunamas veikiant statinei apkrovai ir ignoruojant dinaminės apkrovos poveikį (Seo, Joo-Won *ir kt.* 2009).

3.3 Tyrimų susijusių su temperatūros ir drėgnio įtaka asfalto dangos konstrukcijai analizė Lietuvoje

3.3.1 Kelių oro sąlygų informacinė sistema (KOSIS)

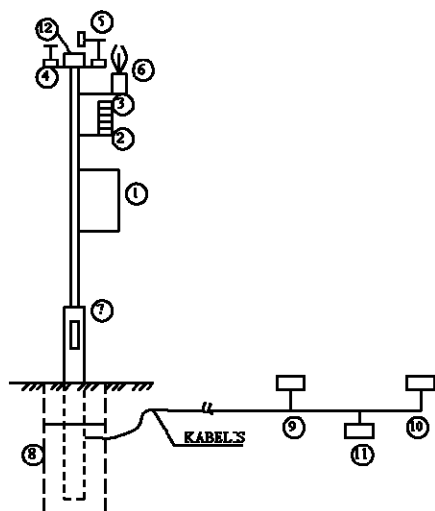
Norint išsamiau paanalizuoti temperatūros įtaką asfalto dangos konstrukcijai ir palyginti su kiekvienų metų temperatūros pokyčiais, nuo 1999 metų Lietuvos magistraliniuose ir krašto keliuose buvo pradėta rengti Kelių oro sąlygų informacinė sistema, kurios pagrindą sudaro automobilių keliuose įrengiamos meteorologinės stotelės.

KOSIS – tai kompiuterizuota sistema, kuri automatiškai registruoja automobilių kelių dangos fizinius parametrus bei meteorologines sąlygas keliuose ir atitinkamai informuoja apie važiavimo sąlygas. KOSIS galima išmatuoti oro temperatūrą, oro santykinę drėgmę, rasos taško temperatūrą, kritulių skaičių, kritulių kiekį ir tipą, kelio dangos paviršiaus temperatūrą, dangos konstrukcijos temperatūrą 7, 20, 50, 80, 110 ir 130 cm gyliuose, vėjo kryptį ir greitį, matomumą, užšalimo galimybę/būsena, duomenis suskirstant pagal datą, laiką ir stoteles. Labai svarbu žinoti šių parametrų išvestinę charakteristiką – kelio dangos konstrukcijos temperatūros įvairiuose gyliuose perėjimo per 0 °C ciklą skaičių bei bendrą įšalo gylį. Visi gaunami duomenys kaupiami ir apdorojami LR susisiekimo ministerijos Automobilių kelių direkcijos duomenų bazėje, kuri iš KOSIS duomenimis papildoma kelis kartus per metus. Šiuo metu veikia 48 meteorologinės stotelės (Laurinavičius *ir kt.* 2008).

Kelių oro sąlygų informacinės sistemos (KOSIS) funkcinę struktūrą sudaro:

- matavimo stotys, išdėstytos pagrindiniuose automobilių keliuose;
- GSM ryšio posistemis tarp matavimo stočių ir pagrindinio kompiuterio;
- pagrindinis sistemos kompiuteris, į kurį patenka iš matavimo stočių gaunama informacija;
- regioninės darbo stotys, kuriose prieinama vartotojams reikalinga informacija, apdorota ir pateikta pagrindinio kompiuterio;
- keičiamieji kelio ženklai, valdomi iš VĮ „Automagistrėlė“ arba pagrindinio kompiuterio.

Ryšys tarp pagrindinio kompiuterio ir regionų darbo stočių vyksta KOSI sistemos naudojamu vidiniu tinklu. Pagrindinis sistemos kompiuteris yra LAKD (Lietuvos automobilių kelių direkcija) patalpose. KOSIS matavimo stoties sudedamosios dalys pateiktos 3.9 pav.



Eksplikacija:

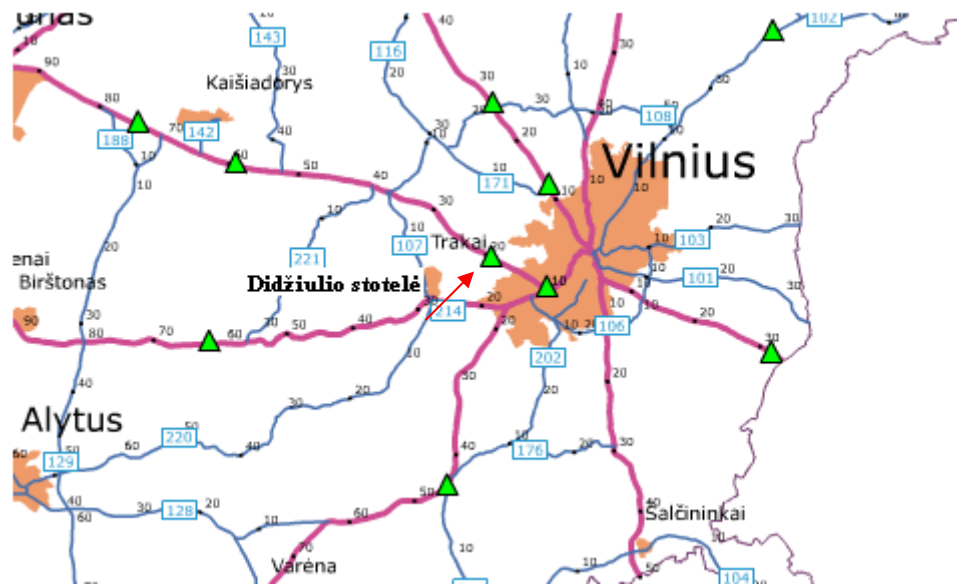
1. Aparatūros blokas
2. Daviklis santykinei oro drėgmei matuoti
3. Daviklis oro temperatūrai matuoti
4. Daviklis vėjo greičiui matuoti
5. Daviklis vėjo kryptčiai matuoti
6. Daviklis kritulių kiekiui, jų pobūdžiui ir intensyvumui matuoti
7. Metalinė atrama
8. Betoninis pamatas
9. Daviklis dangos paviršiaus temperatūrai matuoti
10. Pasyvus dangos būklės daviklis FP 2000 (prieš tai buvo daviklis kelio dangos paviršiaus užšalimo taškui matuoti)
11. Daviklis apatinių dangos sluoksnių temperatūrai matuoti
12. Daviklis matomumui matuoti
13. Video kamera
14. Nuotoliniai davikliai

3.9 pav. KOSIS matavimo stoties sudedamosios dalys

3.3.2 Kelių oro sąlygų informacinės sistemos 1999-2008 m. ir 2009 m. duomenų analizė

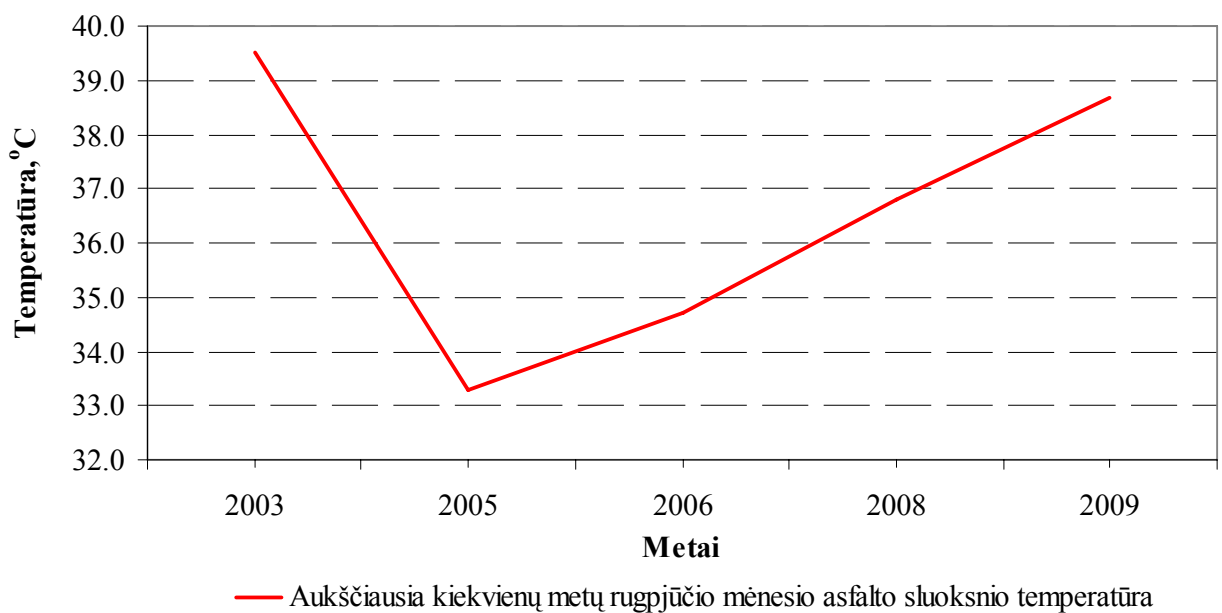
Analizei yra panaudota KOSIS matavimo duomenys iš Didžiulio stotelės, netoli Didžiulio ežero. Pateikiami oro temperatūros, kelio dangos konstrukcijos atskirų sluoksnių temperatūros duomenys nuo 1999 m. iki 2008 m. Tačiau iš Didžiulio stotelės gautos temperatūros reikšmės yra išmatuotos skirtinguose gyliuose nei temperatūros davikliais fiksuojamos reikšmės Pagirių bandomajame kelio ruože. Didžiulio stotelėje davikliai yra įrengti dangos paviršiuje, 7 cm, 20 cm, 50 cm, 80 cm, 110 cm ir 130 cm gyliuose nuo dangos

paviršiaus, o Pagirių bandomajame kelio ruože – dangos paviršiuje, 2 cm, 4 cm, 8 cm, 10 cm, 18 cm ir 130 cm gyliuose. KOSIS Didžiulio stotelės įrengimo vieta pateikta 3.10 pav.

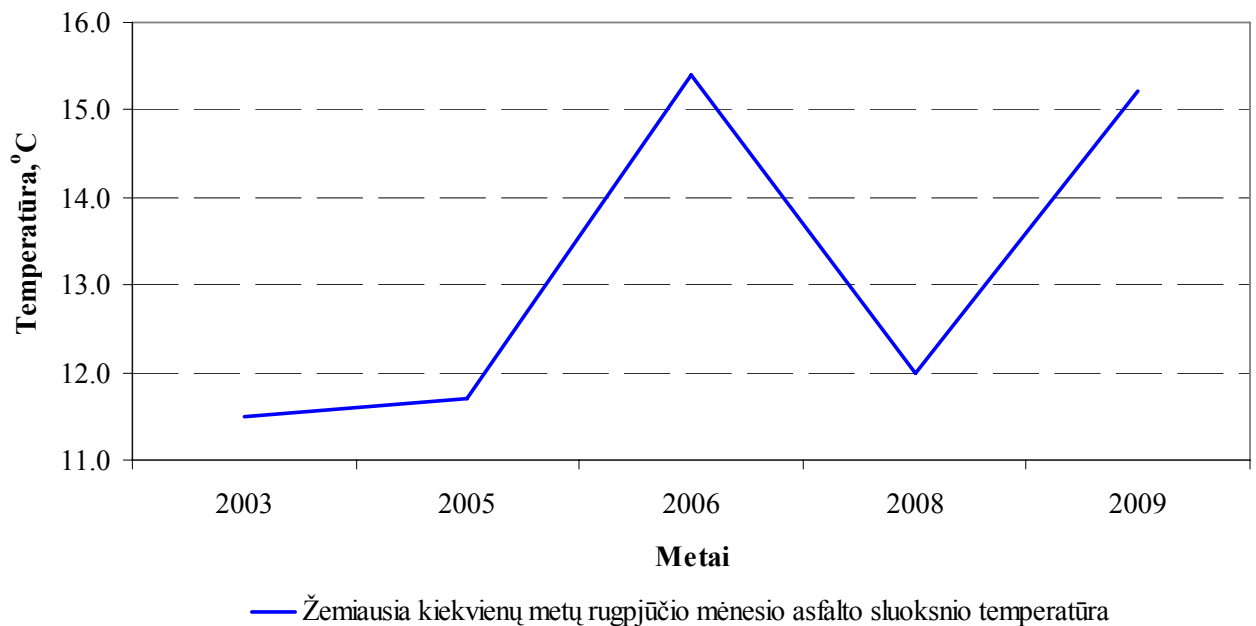


3.10 pav. KOSIS Didžiulio stotelės įrengimo vieta

3.11 pav., 3.12 pav. pateikta nuo 2003 m. iki 2008 m. rugpjūčio mėnesių asfalto sluoksnio temperatūra 7 cm gylyje, o 2009 m. duomenys pateikti temperatūros daviklių, įrengtų bandomajame kelio ruože 10 cm gylyje.



3.11 pav. Aukščiausia kiekvienų metų rugpjūčio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose

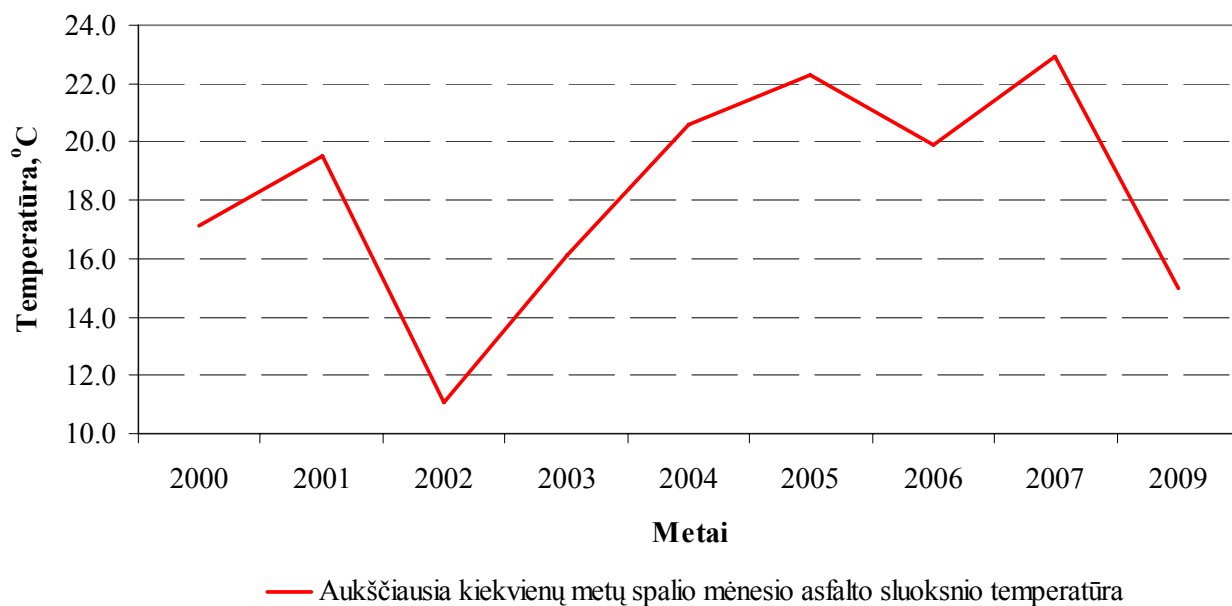


3.12 pav. Žemiausia kiekvienų metų rugpjūčio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose

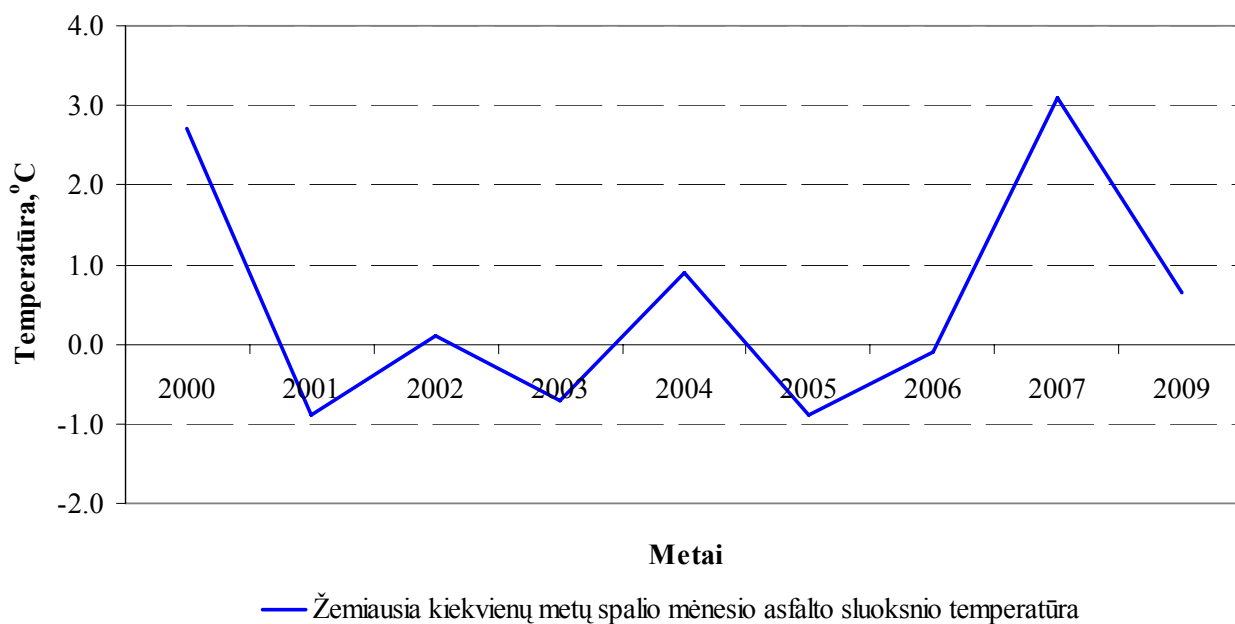
Iš 3.11 pav. pateikto grafiko matome, kad aukščiausia kiekvienų metų rugpjūčio mėnesio asfalto sluoksnio temperatūra 7 cm gylyje užfiksuota 2003 m. (39,5 °C), žemiausia 2005 m. (33,3 °C). Nuo 2005 m. asfalto sluoksnio temperatūra tolygiai kyla iki 2009 m. (38,67 °C), tačiau nebuvo pasiektos tokios aukštos temperatūros reikšmės kaip 2003 m.

Analizuojant 3.12 pav. žemiausių asfalto sluoksnio temperatūrų kitimą kiekvienų metų rugpjūčio mėnesiais nustatyta, kad žemiausios asfalto sluoksnio temperatūros yra 2003 m. (11,5 °C), 2005 m. (11,7 °C) ir 2008 m. (12 °C), o 2006 m. (15,4 °C) ženklus asfalto sluoksnio temperatūros pakilimas. Nuo 2008 m. iki 2009 m. žemiausios asfalto sluoksnio temperatūros reikšmės tolygiai kyla iki 15,2 °C.

Atlikus spalio mėnesio aukščiausių asfalto sluoksnio temperatūrų kitimo analizę, kai sukaupiti duomenys buvo nuo 2000 m. iki 2009 m. pastebėta, kad nuo 2000 m. (17,1 °C) asfalto sluoksnio temperatūra tolygiai kilo iki 2001 m. (19,5 °C), po to įvyko ryškus temperatūros kritimas. Nuo 2002 m. (11,1 °C) asfalto sluoksnio temperatūra 7 cm gylyje pradėjo tolygiai kilti iki 2005 m. (22,3 °C). 2006 m. (19,9 °C) pastebimas nežymus temperatūros sumažėjimas, 2007 m. asfalto sluoksnio temperatūra vėl pakilo iki 22,9 °C. Tačiau 2009 m. įvyko staigus aukščiausios asfalto sluoksnio temperatūros kritimas iki 14,98 °C. Aukščiausia ir žemiausia kiekvienų metų spalio mėnesio temperatūra 7 cm (2003 m., 2005 m., 2006 m. ir 2008 m.) ir 10 cm (2009 m.) gyliuose nuo dangos paviršiaus pateikta 3.13 pav. ir 3.14 pav.



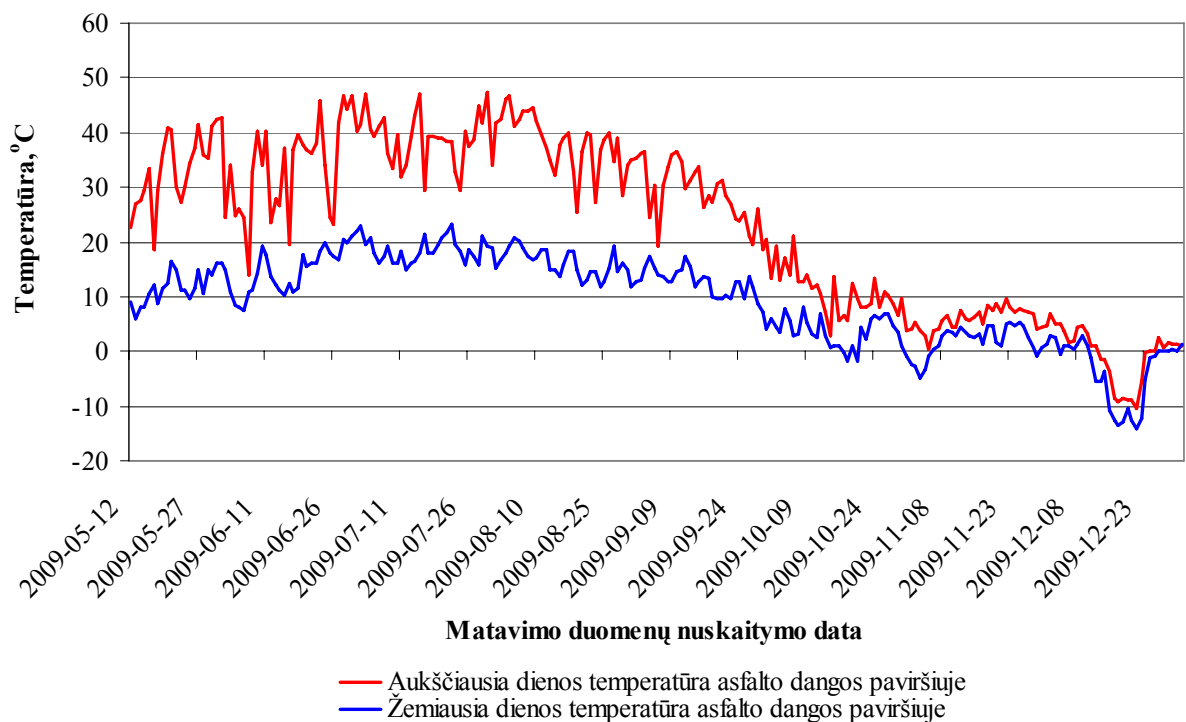
3.13 pav. Aukščiausia kiekvienų metų spalio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose



3.14 pav. Žemiausia kiekvienų metų spalio mėnesio temperatūra asfalto sluoksnio 7 cm ir 10 cm gyliuose

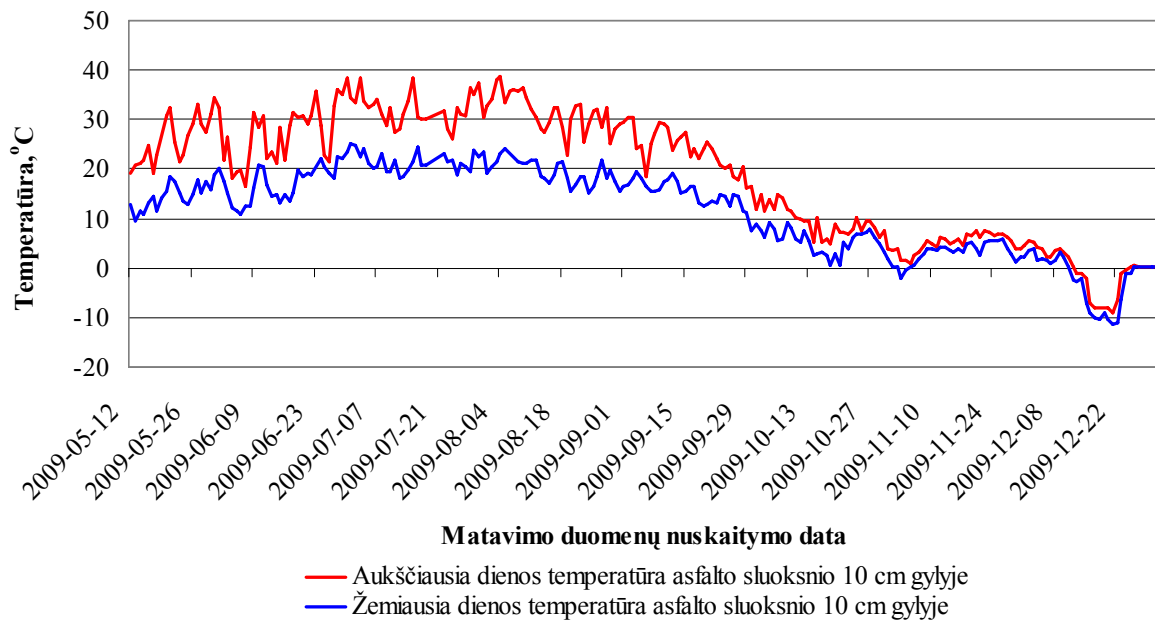
Analizuojant grafiką (3.14 pav.) nustatyta, kad žemiausia temperatūra kiekvienų metų asfalto sluoksnio 7 cm gylyje buvo 2001 m. ir 2005 m. ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Žemiau $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ asfalto sluoksnio temperatūros reikšmės taip pat vyravo 2003 m. ir 2006 m. Aukščiausios temperatūros reikšmės 2000 m. – ($+2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2004 m. – ($0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ir 2007 m. – ($3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tačiau 2009 m. temperatūra nukrito iki ($+0,66\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Išsamesnei temperatūros ir drėgnio matavimo rezultatų analizei duomenys apdoroti Microsoft Excel programa. (3.15 - 3.17) pav. pateiktas bandomojo kelio ruožo 12-tos dangos konstrukcijos kiekvienos dienos nuo 2009 m. gegužės mėn. 12 d. iki 2009 m. gruodžio mėn. 31 d. aukščiausių ir žemiausių temperatūros reikšmių pasiskirstymas asfalto dangos paviršiuje, 10 cm ir 125 cm gyliuose. Kitų dangos konstrukcijų sluoksnių aukščiausios ir žemiausios temperatūros reikšmės pateiktos prieduose. (3.17 - 3.19) pav. pateikta kiekvienos dienos nuo 2009 m. gegužės mėn. 12 d. iki 2009 m. gruodžio mėn. 31 d. didžiausių ir mažiausių drėgnio reikšmių kitimas dangos konstrukcijos 53 cm, 85 cm ir 130 cm gyliuose.



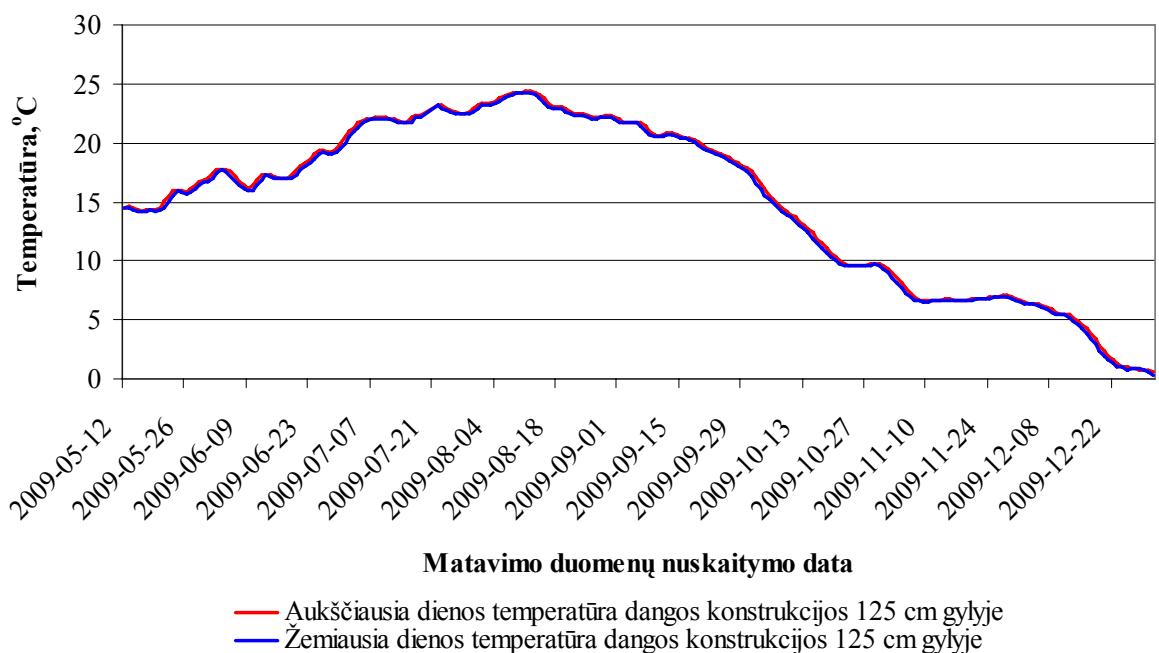
3.15 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros asfalto dangos paviršiuje

Analizuojant asfalto dangos paviršiaus aukščiausias ir žemiausias kiekvienos dienos temperatūros reikšmes 3.15 pav. nustatyta, kad aukščiausia temperatūra asfalto dangos paviršiuje - (+47,26 °C) liepos mėnesio pabaigoje, žemiausia – (-14,16 °C) gruodžio mėnesio pabaigoje. Aukščiausių ir žemiausių temperatūrų ženklus kitimo tendencija pasireiškė rugsėjo mėnesį. Asfalto dangos paviršiaus aukščiausia dienos temperatūra nepakilo aukščiau 0 °C gruodžio mėnesio viduryje, žemiausia dienos temperatūra nepakilo aukščiau 0 °C – spalio mėnesio viduryje.



3.16 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm nuo dangos paviršiaus)

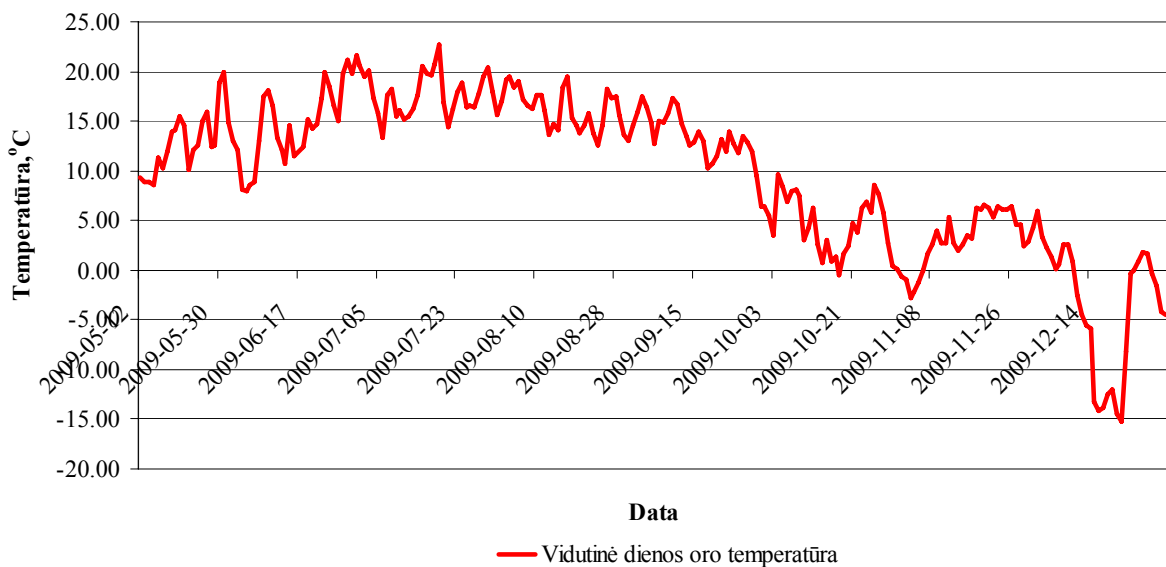
Asfalto pagrindo sluoksnio aukščiausių ir žemiausių temperatūros reikšmių kitimas (3.16 pav.) kiekvieną mėnesį yra panašus kaip ir asfalto dangos paviršiuje, tačiau aukščiausia temperatūra asfalto pagrindo sluoksnyje rugpjūčio mėnesio pradžioje – (+38,67 °C), žemiausia – gruodžio mėnesio pabaigoje (-11,51 °C).



3.17 pav. Kiekvienos dienos aukščiausios ir žemiausios temperatūros žemės sankasoje (125 cm nuo dangos paviršiaus)

Analizuojant kiekvienos dienos aukščiausias ir žemiausias temperatūros reikšmes dangos konstrukcijos 125 cm gylyje (3.17 pav.) pastebima, kad aukščiausi ir žemiausi temperatūrų skirtumai yra nežymūs. Temperatūra žemės sankasoje yra pastovesnė. Žemiausia temperatūra yra teigiama (+0,35) °C gruodžio mėnesio pabaigoje, o aukščiausia temperatūra užfiksuota – (+24,2 °C) rugpjūčio mėnesio viduryje. Žemės sankasoje nuo temperatūros ir drėgnio daviklių įrengimo, t. y. gegužės mėnesio, temperatūra tolygiai kilo iki rugpjūčio mėnesio vidurio ir po to krito iki gruodžio mėnesio pabaigos.

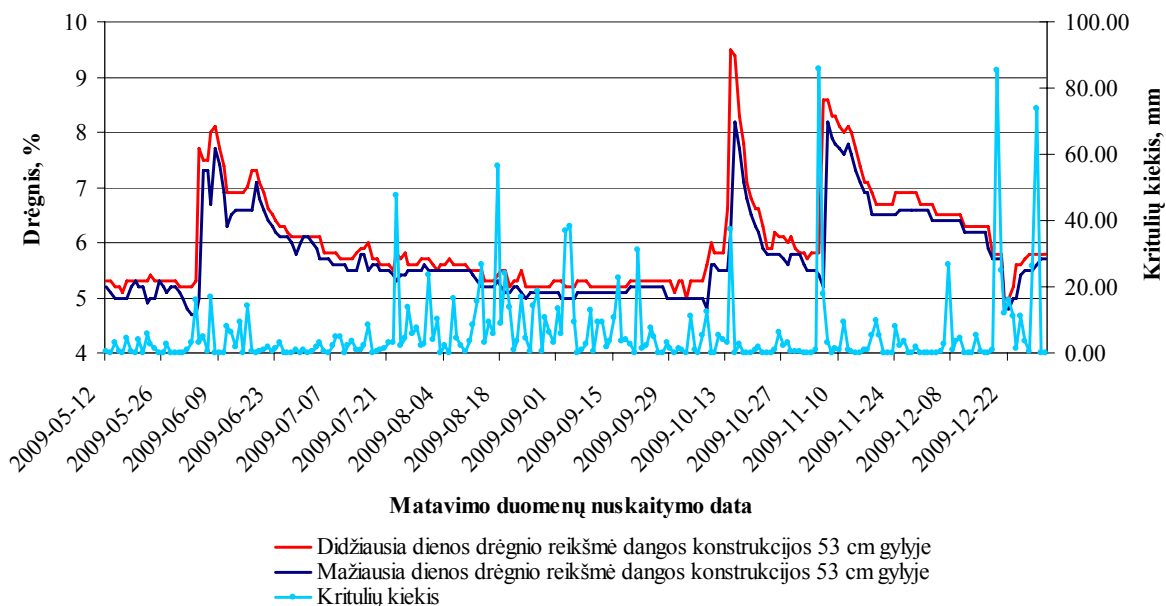
Naudojantis Kelių oro sąlygų informacinės sistemos (KOSIS) duomenimis atlikta analizė. Vertinta oro temperatūros ir kritulių kiekio įtaka kelio konstrukcijos sluoksniams. Analizei yra naudojami Didžiulio matavimo stotelės duomenys. Vidutinė kiekvienos dienos temperatūra analizuojamu periodu pateikta 3.18 pav.



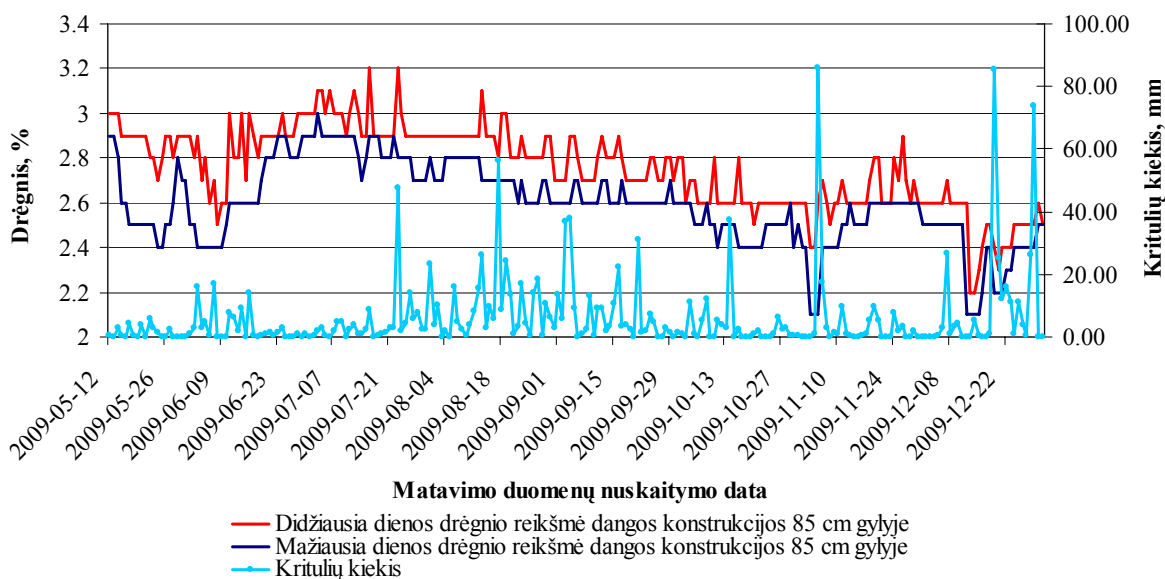
3.18 pav. Kiekvienos dienos vidutinė oro temperatūra Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis

Analizuojant vidutinį oro temperatūros kitimą pastebima, kad aukščiausia vidutinė dienos temperatūra - liepos mėnesio pabaigoje (+22,65 °C), mažiausia – gruodžio mėnesio pabaigoje (-15,26 °C).

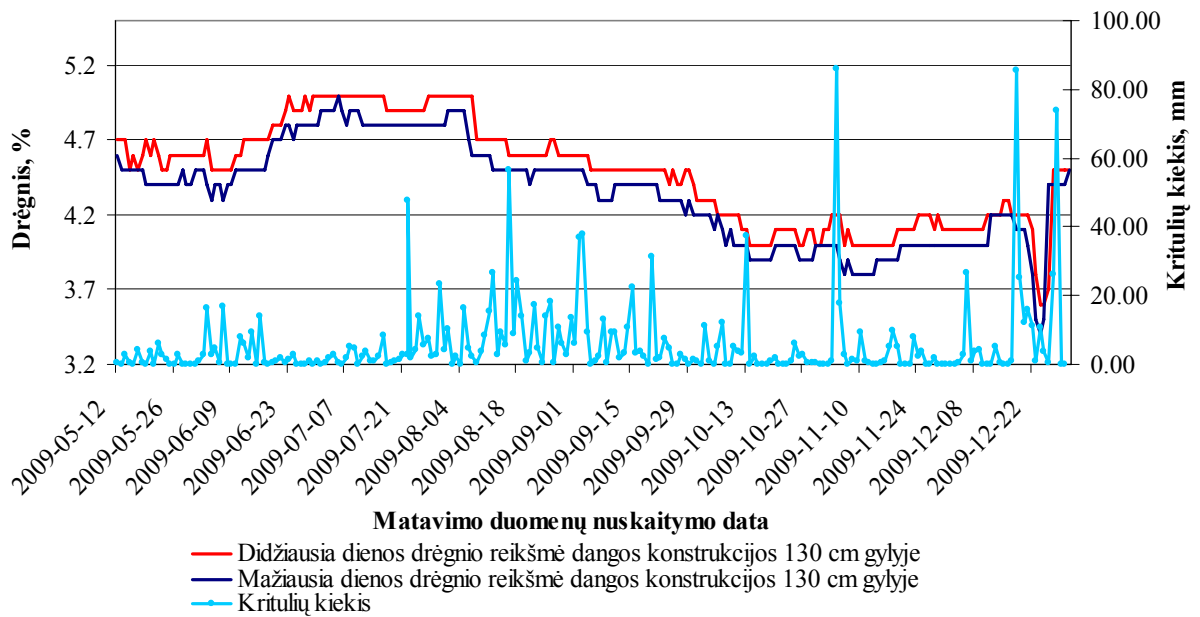
Analizuojant drėgnio pasiskirstymą apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus), apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje (85 cm nuo dangos paviršiaus) bei žemės sankasoje (130 cm nuo dangos paviršiaus) nustatyta, kuris sluoksnis yra labiausiai veikiamas kritulių kiekio. 3.20 pav.-3.22 pav. pateikta kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio 12-oje dangos konstrukcijoje pasiskirstymą.



3.20 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus) pasiskirstymas



3.21 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje (85 cm nuo dangos paviršiaus) pasiskirstymas



3.22 pav. Kritulių kiekio, pagal Didžiulio oro sąlygų stotelės duomenis, ir drėgnio žemės sankasoje (130 cm nuo dangos paviršiaus)

Drėgnio kitimą dangos konstrukcijos sluoksniuose lemia iškritusių kritulių kiekis per parą. Todėl (3.20 - 3.22) pav. kartu su drėgnio pasiskirstymu kelio konstrukcijos sluoksniuose pateiktas ir kritulių kiekis per parą. Iš pateiktų diagramų pastebėta, kad kritulių kiekis labiausiai veikia apsauginį šalčiui atsparų sluoksnį. Šiame sluoksnyje nustatytas ženklus drėgnio kitimas.

Analizuojant didžiausias kiekvienos dienos drėgnio reikšmes apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus) nustatyta, kad didžiausias drėgnis (9,5 %) išmatuotas spalio mėnesio viduryje, lapkričio (8,6 %) ir birželio mėnesio pradžioje (8,1 %). Vidutinis didžiausias drėgnis apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje - (6,1 %).

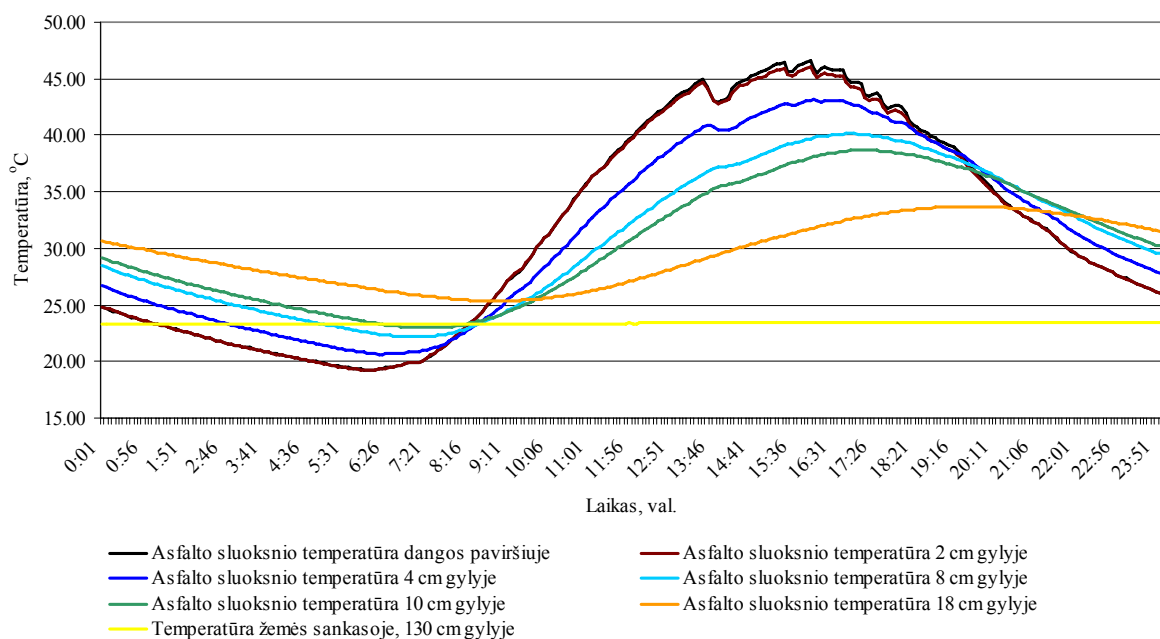
Analizuojant kiekvienos dienos mažiausias drėgnio reikšmes nustatyta, kad mažiausias drėgnis yra birželio bei spalio mėnesio pradžioje (4,7 %) bei gruodžio mėnesio pabaigoje (4,8 %). Vidutinis mažiausias grunto drėgnis apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje - 5,8 %. Pastovus drėgnis apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje vyrauja visą gegužės mėnesį ir nuo liepos mėnesio iki spalio mėnesio (~5,5 %).

Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje (85 cm nuo dangos paviršiaus) drėgnis yra žymiai mažesnis nei apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje. Didžiausias drėgnis liepos mėnesio viduryje – 3,2 %, vidutinis didžiausias dienos drėgnis – 2,8 %. Mažiausias drėgnis išmatuotas lapkričio ir gruodžio mėnesio pradžioje - 2,1 %, vidutinis mažiausias drėgnis - 2,6 %.

Pačioje žemės sankasoje, t. y. 130 cm nuo dangos paviršiaus, pastovus didžiausias drėgnis vyrauja nuo birželio mėnesio pabaigos iki rugpjūčio mėnesio pradžios (~ 5 %), gruodžio mėnesio pabaigoje nustatytas ženklus drėgnio sumažėjimas (~ 3,6 %). Žemės sankasoje vyrauja mažesnis drėgnis nei žemės sankasos ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio sąlyčio vietoje.

Visuose trijuose dangos konstrukcijos sluoksniuose, kuriuose įrengti drėgnio davikliai, drėgnio kitimo tendencija yra panaši, tačiau didesni drėgnio pokyčiai pastebimi apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje.

HOBOWare programa dangos konstrukcijos temperatūrą ir drėgnį galima analizuoti metais, mėnesiais, savaitėmis ar dienomis. Todėl 3.23 pav. pateikta vienos iš karščiausių 2009 m. dienų – (atlikto eksperimento diena) rugpjūčio mėn. 4 d. (oro temperatūra 19,87 °C) 12-tos dangos konstrukcijos, kurioje įrengti temperatūros davikliai, temperatūros kitimo grafikas kas 5 min. 3.25 pav. pateiktas 2009 spalio 14 d. vieno iš drėgniausio apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio periodo drėgnio kitimo grafikas.

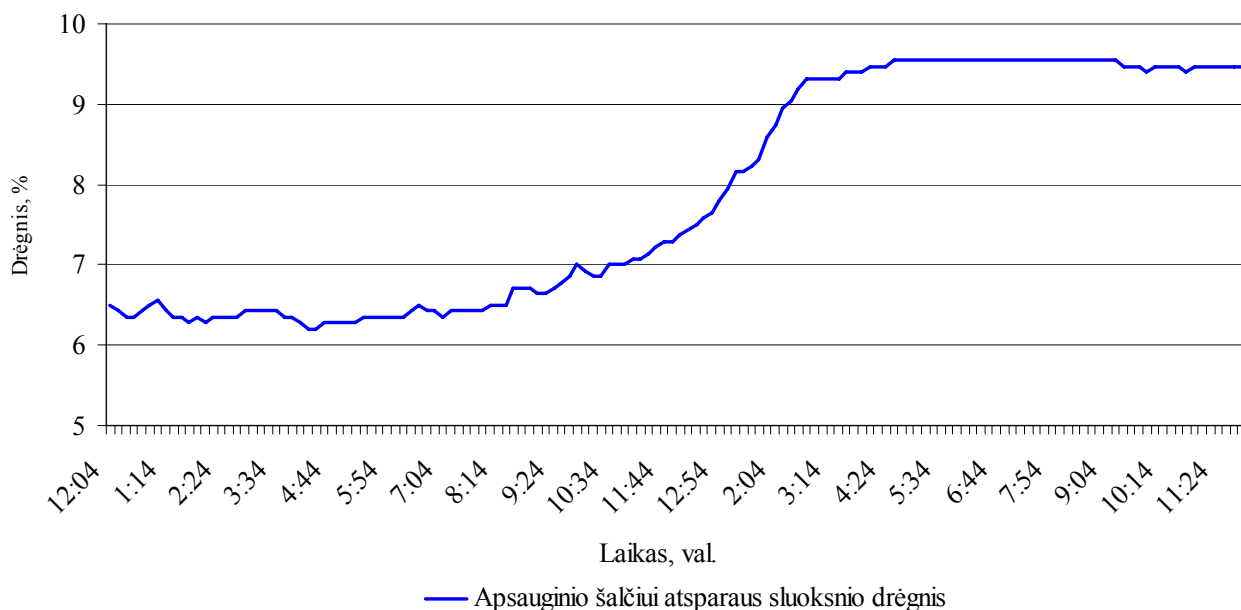


3.23 pav. 12-toje dangos konstrukcijoje visuose dangos konstrukcijos sluoksniuose išmatuota temperatūra 2008 m. rugpjūčio mėn. 4 d.

Iš grafiko (3.23 pav.) matome, kad visuose sluoksniuose, pradedant asfalto viršutiniu sluoksniu ir baigiant žemės sankasa, temperatūros reikšmės pasiskirstę tolygiai. Anksčiausiai žemiausią temperatūrą pasiekia asfalto viršutinis sluoksnis +19,25 °C 6.01 val. ryto ir kyla kol pasiekia aukščiausią dienos temperatūrą +46,00 °C 16.01 val. Visuose kituose dangos

konstrukcijos sluoksniuose, atsižvelgiant į viršutinio asfalto sluoksnio temperatūros kitimą, temperatūra tolygiai didėja ir mažėja. Pastoviausia temperatūra vyrauja žemės sankasoje.

Išanalizavus apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio kelių mėnesių drėgnio kitimo grafiką, išskirta apsauginiam šalčiui atspariam sluoksniui drėgniausia diena ir analizuojamas drėgnio pasiskirstymas paros bėgyje. Apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje 2009 m. spalio 14 d. išmatuotas drėgnis pateiktas 3.24 pav. Matoma, kad spalio 14 d. naktį apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje mažiausias drėgnis – (6,2 %), o po pietų 16 val. 34 min. įvyko ženklus drėgnio padidėjimas iki 9,5 %, kuris tęsėsi visą likusią dieną. Tokį drėgnio pasiskirstymą apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje lėmė iškritęs didelis kritulių kiekis tą dieną (37,2 mm/parą), oro temperatūra +1,11 °C.



3.24 pav. 12-toje dangos konstrukcijoje apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje 2009 m. spalio 14 d. išmatuotas drėgnis

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Daugelio šalių mokslininkai atlieka įvairius tyrimus, susijusius su temperatūros ir drėgnio poveikiu kelio dangos konstrukcijai:
 - Vengrijoje buvo įrengti temperatūros davikliai, kuriais buvo galima tiksliai nustatyti temperatūrą, esančią tam tikrame dangos konstrukcijos gylyje, ir pagal temperatūros reikšmes gauti dangos konstrukcijos standumą.
 - COST Action 351 WATMOVE ataskaitoje yra nagrinėjamas vandens judėjimas, jo poveikis dangos konstrukcijai sudarančioms medžiagoms bei vandens kiekio matavimai nurodant vandens susitelkimo vietą, tėkmę.
 - Islandijos kelių administracija (ICERA – Iceland Road Administration) atliko tyrimą, kurio metu analizavo klimato įtaką kelio dangos konstrukcijos stiprumui. Tuo tikslu buvo įrengti temperatūros ir drėgnio davikliai, kurie registravo temperatūros ir drėgnio reikšmes tam tikrame dangos konstrukcijos gylyje.
 - Škotijoje Transporto tyrimų laboratorijoje (TRL) tris vasaras buvo stebėta ir registruota vidutinė maksimali dienos temperatūra asfalto dangos paviršiuje. Nagrinėjama aukštos temperatūros įtaka dangos paviršiaus stiprumui ir analizuota ar dangos plėtimasis ir susitraukimas neturi didelio poveikio asfalto dangos vientisumui.
2. Siekiant teisingai ir ekonomiškai pagrįstai pasirinkti dangų stiprinimo būdus, esamos kelio dangos konstrukcijos būklę rekomenduojama vertinti pagal krintančio svorio deflektometro matavimo duomenis.
3. Matuojant kelio dangos įlinkius krintančio svorio deflektometru skirtingu metų laiku ir įvairiu paros metu, būtina vertinti kelio dangos stiprio ir E_0 modulio priklausomybę nuo dangos temperatūros ir apkrovos.
4. Atliekant kelio dangos stiprio ir E_0 modulio reikšmių vertinimus, gautus matavimo rezultatus reikia redukuoti į jų ekvivalentines reikšmes esant standartinei temperatūrai ir apkrovai.
5. Norint išsamiau išanalizuoti temperatūros įtaką asfalto dangos konstrukcijai ir palyginti kiekvienų metų nuo 2000 m. iki 2009 m. temperatūros pokyčius, buvo naudojami Kelių oro sąlygų informacinės sistemos duomenys:
 - Lyginant Didžiulio stotelės temperatūros reikšmes asfalto sluoksnio 7 cm gylyje ir temperatūros davikliais išmatuotas temperatūras 10 cm gylyje, buvo atsižvelgiama į tai, kad temperatūros reikšmėms turėjo įtakos skirtinga kelio konstrukcija, vietovės sąlygos ir klimato veiksniai. Todėl atlikus temperatūros reikšmių palyginimą kiekvienų metų rugpjūčio ir spalio mėnesiais pastebėta, kad iki 2009 m. temperatūros

reikšmės tolygiai didėjo, spalio mėnesį – nuo 2007 m. iki 2009 m. asfalto sluoksnio temperatūra mažėjo.

- Atlikus bandomojo kelio ruožo 12-oje dangos konstrukcijoje temperatūros ir drėgnio matavimus buvo nustatyta kiekvienos dienos nuo 2009 m. gegužės mėn. 12 d. iki 2009 m. gruodžio mėn. 31 d. aukščiausių ir žemiausių temperatūros reikšmių pasiskirstymas asfalto dangos paviršiuje, asfalto viršutiniame sluoksnyje, asfalto viršutinio ir apatinio sluoksnių sąlytyje, asfalto apatinio ir pagrindo sluoksnių sąlytyje, asfalto pagrindo sluoksnyje, asfalto pagrindo ir pagrindo iš dolomitinės skaldos sąlytyje, žemės sankasoje, taip pat didžiausių ir mažiausių drėgnio reikšmių kitimas apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje, žemės sankasoje.
- Stebint kelio konstrukcijos sluoksnių kiekvienos dienos temperatūrų kitimą nustatyta, kad aukščiausia temperatūra asfalto dangos paviršiuje – (+47,26) °C liepos mėnesio pabaigoje, žemiausia – (-14,16 °C) gruodžio mėnesio pabaigoje. Temperatūra žemės sankasoje yra pastovesnė nei kituose dangos konstrukcijos sluoksniuose. Aukščiausia temperatūra žemės sankasoje užfiksuota – (+0,135 °C) kovo mėnesio pabaigoje, žemiausia – (-0,675 °C) kovo mėn. pradžioje. Aukščiausia temperatūra asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm nuo dangos paviršiaus) rugpjūčio mėnesio pradžioje – (+38,67 °C), žemiausia – (-11,51 °C) gruodžio mėnesio pabaigoje.
- Atliekant kelio konstrukcijos sluoksnių kiekvienos dienos drėgnio kitimo analizę nustatyta, kad didžiausias drėgnis (9,5 %) išmatuotas spalio mėnesio viduryje apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus), mažiausias drėgnis – (2,1 %) lapkričio ir gruodžio mėnesio pradžioje apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio ir žemės sankasos sąlyčio vietoje (85 cm nuo dangos paviršiaus).
- Drėgnio pasiskirstymą kelio konstrukcijos sluoksniuose lemia iškritęs kritulių kiekis, kuris didžiausią įtaką daro apsauginiam šalčiui atspariam sluoksniui. Iškritus 37,2 mm kritulių kiekiui per parą, drėgnis apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje padidėjo nuo 6,2 % iki 9,5 %.

4. Temperatūros įtakos asfalto dangos konsrtukcijos stipriui eksperimentinis tyrimas

4.1. Tyrimo objektas ir metodika

2007 m Pagirių gyvenvietėje, privažiavimo prie karjero kelyje, buvo įrengtas pirmas eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomasis ruožas, vadinamas „Lietuvos automobilių kelių eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomasis ruožas“. Bandomajam ruožui įrengti parinkta vieta Pagirių gyvenvietėje atitinka visas tokiam eksperimentui reikalingas sąlygas: turi pakankamą krovinio transporto eismo intensyvumą, randasi atviroje vietovėje, neturi horizontalių kreivių plane bei vertikalų kreivių išilginiame profilyje, pasižymi vienodomis drėkinimo sąlygomis visoje ruožo trasoje.

Bandomojo kelio ruožo eksperimentinių dangų konstrukcijų skersinio profilio parametrai pagal STR 2.06.03:2001 atitinka III kelio kategoriją ir III dangos konstrukcijos klasę. Bandomąjį ruožą, kurio bendras ilgis yra 710 m, plotis 7 m, sudaro 23 vienodo ilgio (30 m) ir vienas 20 m ilgio ruoželiai. Kiekviename ruoželyje įrengta skirtingos sudėties dangos konstrukcija. Trys 30 m ilgio ruoželiai yra vienodos dangos konstrukcijos, tačiau jose įrengtos skirtingų rūšių geosintetinės medžiagos asfalto ir dangos pagrindo sluoksniuose. Bandomojo kelio ruožo skirtingų dangos konstrukcijų išdėstymas pavaizduotas 4.1 pav., konstrukcijos sunumeruotos nuo 1 iki 27. Eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomojo ruožo schema pateikta 3.1 pav.

Eksperimentiniam tyrimui palyginamaisiais rodikliais buvo pasirinktos temperatūros reikšmės išmatuotos 12-oje kelio dangos konstrukcijoje. Darbe numatyta įvertinti kelio dangos konstrukcijos sluoksniams įrengti temperatūros įtaką. Tolimesni šio eksperimento tyrimų rezultatai, jų analizė ir vertinimas leis parinkti labiausiai Lietuvos klimatinės sąlygas atitinkančias kelio dangos konstrukcijas.

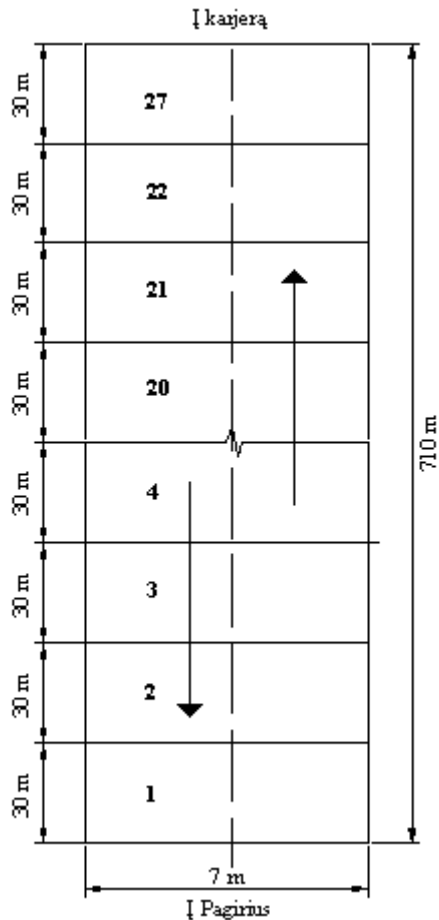
Matavimo įranga:

- 7 temperatūros davikliai;
- 3 drėgnio davikliai
- krintančio svorio deflektometras Dynatest FWD 8000.

Priemonės:

- HOBOWare Pro programine įranga;
- kompiuteris;
- lazerinis termometras;
- elektroninis termometras TE-100;

- chronometras.

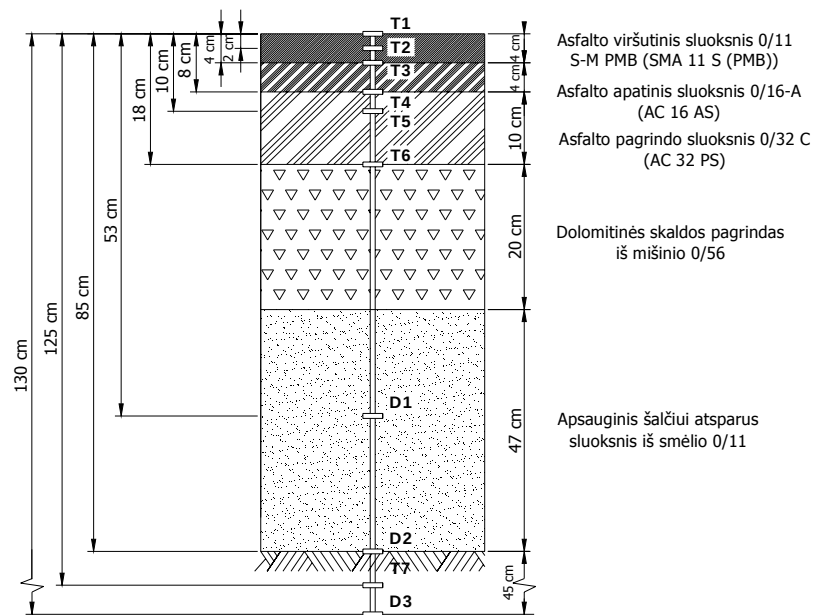


4.1 pav. Bandomojo kelio ruožo schema

Tyrimo metodika:

Eksperimentinio tyrimo metu buvo siekiama stebėti temperatūros kitimą nuo 5 °C iki 33 °C, matuotą asfalto dangos paviršiuje ir 10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus. Kiekvieną kartą temperatūrai pakylant 1 °C buvo naudojamas krintančio svorio deflektometras Dynatest FWD 8000 kelio dangos stiprumui diagnozuoti. Šio tyrimo rezultatai padės nustatyti asfalto dangos sluoksnių temperatūros įtaką asfalto dangos stiprumui.

Temperatūros ir drėgnio davikliai 12-oje dangos konstrukcijoje buvo įrengti 2009 m. gegužės 12 d. kelio ašyje PK 3+40. Šią dangos konstrukciją sudaro: asfalto viršutinis sluoksnis 0/11 S-M PMB (SMA 11 S PMB), asfalto apatinis sluoksnis 0/16-A (AC 16 AS), asfalto pagrindo sluoksnis 0/32-C (AC 32 PS), pagrindo sluoksnis iš dolomitinės skaldos mišinio 0/56 ir apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis iš smėlio 0/11. Bandomojo kelio ruožo 12-ta dangos konstrukcija ir joje įrengtų temperatūros ir drėgnio daviklių išdėstymas pateiktas 4.2 pav.



4.2 pav. 12-ta dangos konstrukcija su įrengtais temperatūros ir drėgmės davikliais

Temperatūros davikliai „12-Bit Temperature Smart Sensor“ buvo įrengti 7 skirtinguose gyliuose nuo dangos paviršiaus: T1 temperatūros daviklis įrengtas asfalto viršutinio sluoksnio paviršiuje; T2 – asfalto viršutiniame sluoksnyje, t.y. 2 cm nuo dangos paviršiaus; T3 – asfalto viršutinio ir apatinio sluoksnių sąlytyje (4 cm nuo dangos paviršiaus); T4 – asfalto apatinio ir pagrindo sluoksnių sąlytyje (8 cm nuo dangos paviršiaus), T5 – asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm nuo dangos paviršiaus); T6 – asfalto pagrindo ir pagrindo iš dolomitinės skaldos sąlytyje (18 cm nuo dangos paviršiaus); T7 - temperatūros daviklis įrengtas žemės sankasoje (125 cm nuo dangos paviršiaus). Tame pačiame pjūvyje, kur buvo įrengti temperatūros davikliai, įrengti 3 drėgnio davikliai „Soil Moisture Smart Sensor“: D1 drėgnio daviklis įrengtas apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus); D2 – žemės sankasos paviršiuje (85 cm nuo dangos paviršiaus); D3 – žemės sankasoje (130 cm nuo dangos paviršiaus). Temperatūros ir drėgnio davikliai pateikti 4.3 ir 4.4 pav., o jų įrengimas pateiktas 4.5 ir 4.6 pav.



4.3 pav. Temperatūros daviklis „12-Bit Temperature Smart Sensor“



4.4 pav. Drėgnio daviklis „Soil Moisture Smart Sensor“



a)



b)



c)

4.5 pav. Gręžimo darbai drėgnio ir temperatūros daviklių įrengimo vietoje:

- a) gręžimo įrangos paruošimas,
- b) ertmės 12-toje dangos konstrukcijoje gręžimas,
- c) išgręžto gręžinio ertmė.



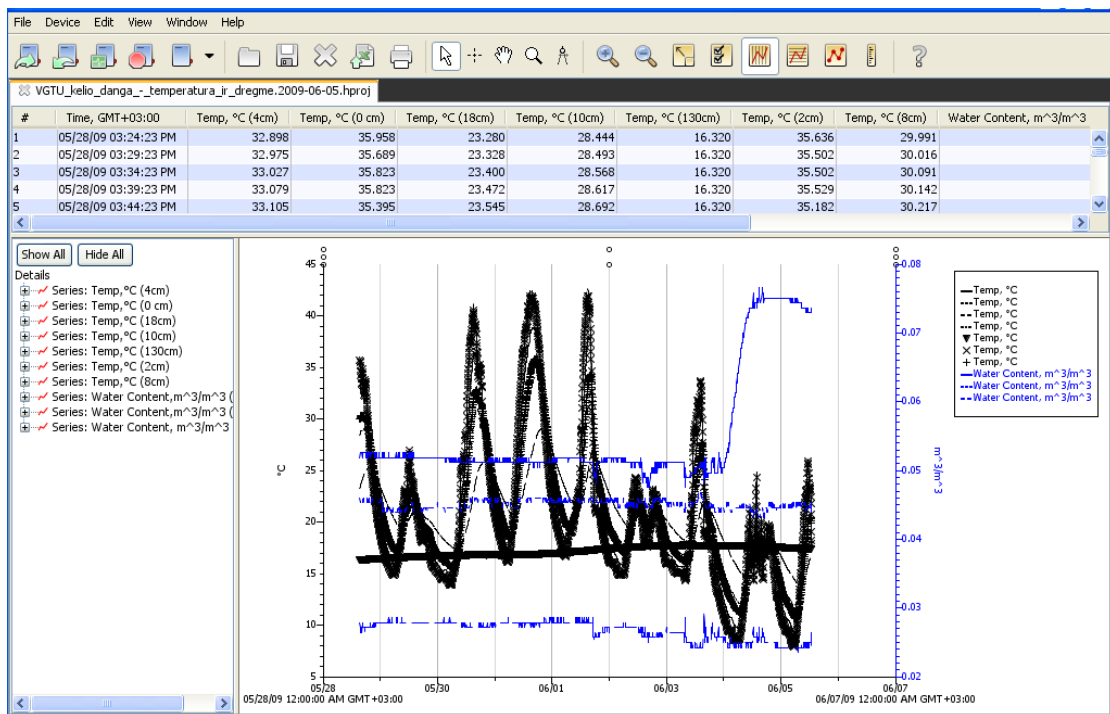
4.6 pav. Iškarta asfalto dangoje temperatūros ir drėgnio daviklių laidų nuvedimui nuo kelio vidurio į kelkraštį

Temperatūros daviklių matavimo ribos yra nuo $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, duomenų nuskaitymui - nuo $(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$ iki $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Matavimo tikslumas $< \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nuo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

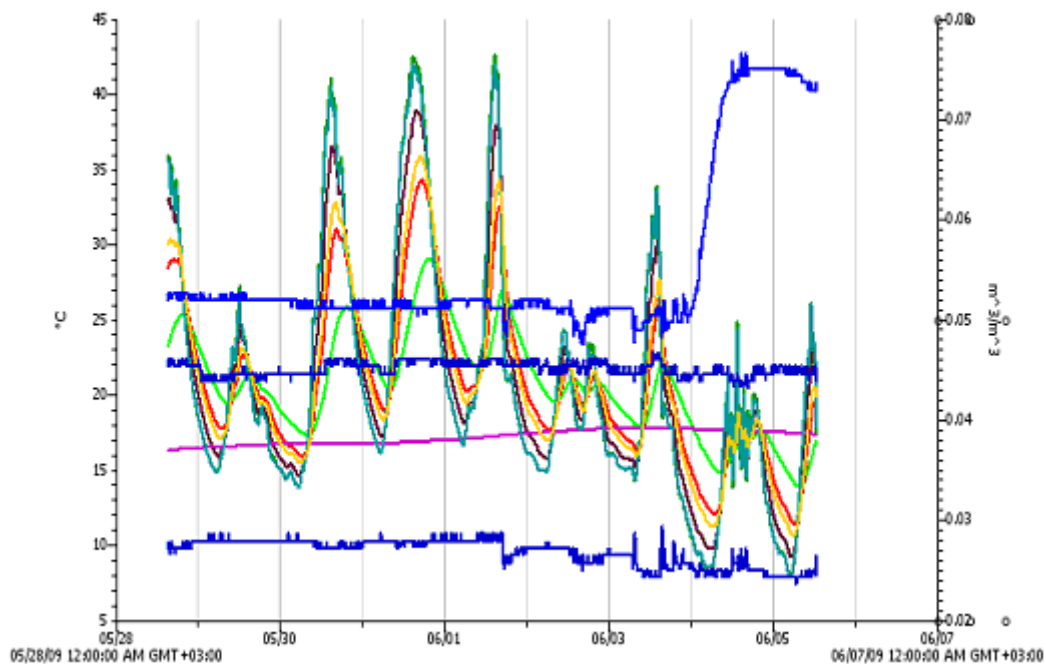
Drėgnio daviklių matavimo tikslumas $\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Drėgnio matavimo vienetai (m^3/m^3), t.y. vandens esančio grunto porose santykis su kietųjų dalelių mase. Atliekant kelio konstrukcijos sluoksnių analizę yra patogiau drėgnį išreikšti procentine išraiška. Pateiktas drėgnio daviklio tikslumas užtikrinamas grunto temperatūrai kintant nuo 0°C iki $+50^\circ\text{C}$. Ribose nuo -40°C iki 0°C ir nuo $+50^\circ\text{C}$ iki $+75^\circ\text{C}$ yra daug mažesnis.

HOBOWare programa yra nustatomi duomenų atrinkimo ir nuskaitymo intervalai. Temperatūros ir drėgnio davikliai nustatyti tokiais intervalais: nuskaitymo intervalas - 10 min, o duomenų atrinkimo intervalas - 1 min., t.y. HOBOWare programa registruoja duomenis kas 1 min, juos kaupia ir po 10 min suskaičiuoja vidurkį. Vidurkio vertė yra išsaugoma kaip matavimo vertė.

12-tos dangos konstrukcijos davikliais išmatuotos temperatūros ir drėgnio reikšmės eksperimento metu buvo fiksuojamos kas 5 min. HOBOWare programa skirta duomenų registravimui, kaupimui ir grafinėi analizei. Pradinių duomenų pateikimas HOBOWare programoje pavaizduotas 4.7 ir 4.8 pav. Šiuose paveiksluose pateiktos temperatūros ir drėgnio reikšmės yra 5 min vidurkiai.



4.7 pav. Pradiniai temperatūros ir drėgnio duomenys Hoboware programos lange



4.8 pav. Koreguoti temperatūros ir drėgnio duomenys Hoboware programos langas

Ekperimentinis tyrimas:

Buvo atlikti du eksperimentiniai tyrimai tam, kad pasiekti asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) aukščiausią ir žemiausią reikšmes. Pirmą kartą eksperimentinis tyrimas buvo atliktas 2009 m. rugpjūčio 4 d., antrą kartą – 2009 m. spalio 5 d. Buvo siekiama stebėti temperatūros kitimą nuo 5 °C iki 35 °C, matuojant elektroniniu TE-100 termometru asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) ir lyginant su temperatūros davikliais išmatuotomis temperatūrų reikšmėmis tame pačiame gylyje.

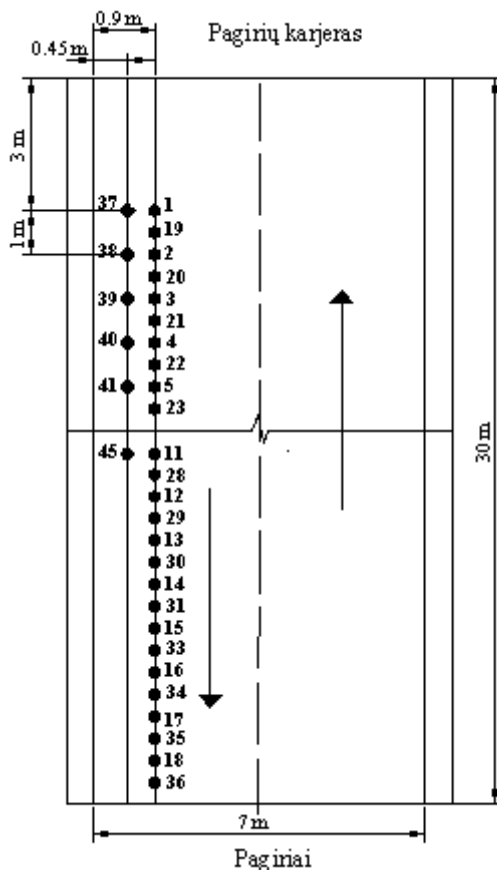
Matavimo dieną buvo naudojamas krintančio svorio deflektometras Dynatest FWD 8000 kelio dangos stiprumui nustatyti. Matavimai šiuo prietaisu įgalina nustatyti bet kurio dangos konstrukcijos sluoksnio deformacijos modulį neardant kelio dangos. Matavimų su FWD atlikimo metu buvo matuojama oro ir asfalto temperatūra. Šie duomenys yra toliau naudojami analizuojant gautus rezultatus.

Pirmo eksperimentinio tyrimo matavimai buvo pradėti 6 val. 33 min. Atlikto tyrimo pradžios laikas keliomis minutėmis (1-3 min) skyrėsi nuo temperatūros daviklių fiksuojamo laiko, todėl temperatūros davikliais išmatuotos reikšmės buvo interpoliuojamos pagal eksperimentinio tyrimo pradžios laiką.

Matavimo taškai buvo pasirinkti pagal georadaru nustatytą asfalto dangos sluoksnių storių matavimo taškus. Eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas dešinėje kelio pusėje važiuojant link Pagirių gyvenvietės, 3 m nuo 12-tos dangos konstrukcijos pradžios; 0,9

m ir 0,45 m nuo važiuojamosios dalies krašto. Matavimo taškai buvo pažymėti kas 1 m, po to matuota tarpuose kas 0,5 m.

Pirmame eksperimentiniame tyrime buvo matuojami 45 taškai po 3 kartus kiekvieną kartą temperatūrai pakylant 1 °C. Skaičiavimuose paimtos tos E_0 modulio reikšmės, kurios atlikus visų E_0 modulio reikšmių koreliacinę analizę, buvo artimiausios. Atliktų matavimų 2009 m. rugpjūčio 4 d. schema pavaizduota 4.9 pav.



4.9 pav. Eksperimentinio tyrimo 2009 m. rugpjūčio 4 d. matavimo schema

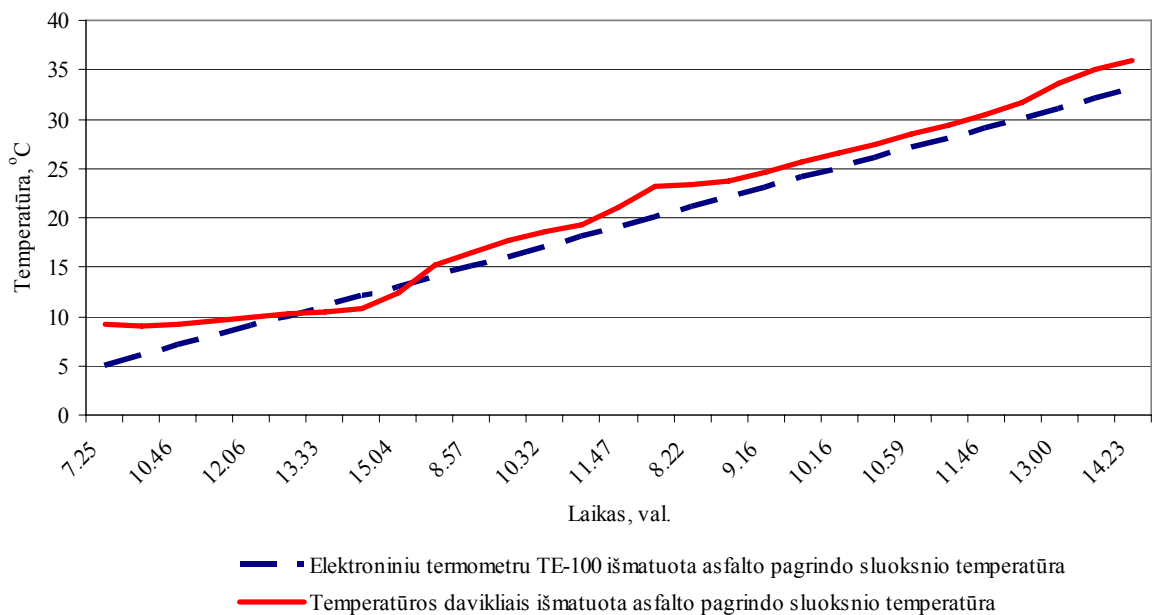
Matavimo schemoje pažymėtuose taškuose buvo matuojama su krintančio svorio deflektometru Dynatest FWD 8000. Visi 9 davikliai (geofonai) paprastai yra fiksuojami įprastais atstumais: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, mm nuo apkrovos pridėties centro, tačiau keičiantis dangos konstrukcijos storiams davikliai buvo išdėstyti kitokia tvarka, t. y. pagal kiekvienos dangos konstrukcijos sluoksnių storius.

Eksperimentinio tyrimo metu esant aukštai oro temperatūrai nebuvo pasiekta žema asfalto dangos temperatūra, todėl buvo atlikti pakartotini matavimai rudenį 2009 m. spalio 5 d.

100 ir temperatūros davikliais išmatuotų asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros reikšmių palyginimas pateiktas 4.1 lentelėje ir 4.11 pav.

4.1 lentelė. Elektroniniu termometru TE-100 ir temperatūros davikliais, išmatuotos asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros reikšmės

Matavimo Eil. Nr.	Elektroniniu termometru TE-100 asfalto dangos sluoksnių temperatūra (FWD), x_1	Davikliais išmatuotų asfalto dangos sluoksnių temperatūrų reikšmės, x_2	$\Delta (x_2 - x_1)$
	T_{AC} 10 cm gylyje	10 cm gylyje	
1	5	9	4
2	6	9	3
3	7	9	2
4	8	10	2
5	9	10	1
6	10	10	0
7	11	10	-1
8	12	11	-1
9	13	12	-1
10	14	15	1
11	15	16	1
12	16	18	2
13	17	19	2
14	18	19	1
15	19	21	2
16	20	23	3
17	21	23	2
18	22	24	2
19	23	25	2
20	24	26	2
21	25	27	2
22	26	27	1
23	27	28	1
24	28	29	1
25	29	30	1
26	30	32	2
27	31	34	3
28	32	35	3
29	33	36	3



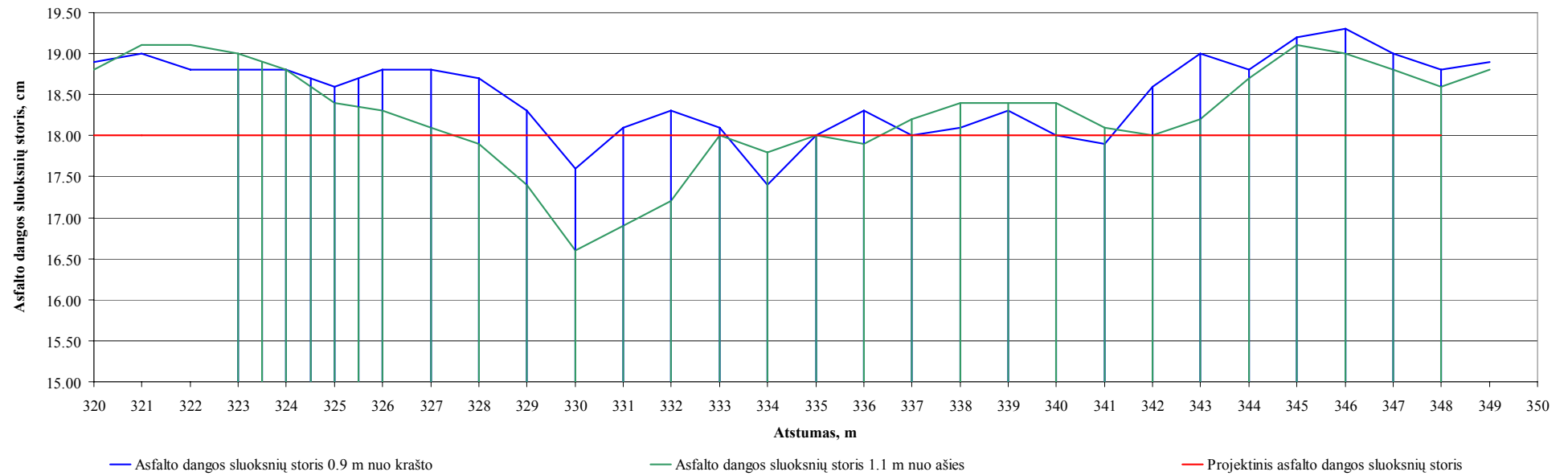
4.11 pav. Elektroniniu termometru TE-100 asfalto dangos sluoksnių temperatūros ir davikliais išmatuotų asfalto dangos sluoksnių temperatūros reikšmių palyginimas

Pagal pateiktą diagramą 4.11 pav. pastebima, kad intervale (+11...+13) °C davikliais išmatuota temperatūra yra mažesnė, nei elektroniniu termometru TE-100 išmatuota temperatūra tokiam pačiame gylyje. Visuose kituose matavimo taškuose temperatūros davikliais išmatuota temperatūra yra didesnė arba lygi elektroniniu termometru TE-100 išmatuotai temperatūrai. Tai galima paaiškinti elektroninio termometro TE-100 tikslumu, kuris yra lygus $\pm 0,5$ °C ir asfalto dangos sluoksnio storio skirtumais (temperatūros davikliai įrengti kelio dangos viduryje).

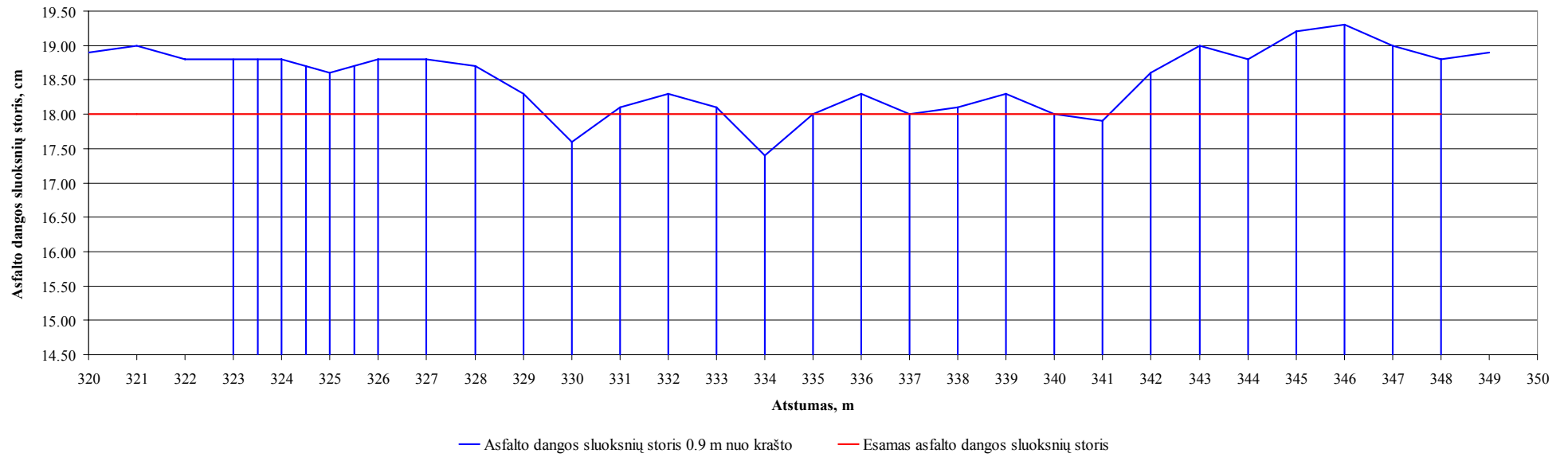
Bandomajame kelio ruože 12-oje kelio dangos konstrukcijoje matuojant georadaru buvo nustatyti asfalto dangos sluoksnių storiai. Asfalto dangos sluoksnių storiai buvo matuojami kas 1 metrą nuo PK 3+20 iki PK3+50. 4.12 pav. ir 4.13 pav. pateiktos diagramos asfalto dangos sluoksnių storiai dešinėje ir kairėje kelio pusėje 0,9 m nuo krašto ir 1,1 m nuo kelio ašies. Iš 4.12 pav. diagramos matome, kad projektinis 12-tos dangos konstrukcijos asfalto dangos sluoksnio storis kairėje kelio pusėje žymiai skiriasi nuo išmatuoto georadaru. Didžiausias nuokrypis nuo projektinio asfalto dangos sluoksnio storio nustatytas 1,1 m nuo kelio ašies ties PK 3+30, išmatuotas asfalto dangos sluoksnių storis skiriasi 1,4 cm, mažiausias nuokrypis – 1,1 m nuo kelio ašies ties PK 3+33 – PK3+35 bei 0,9 m nuo kelio ašies ties PK 3+35 ir PK3+40.

Nepaisant asfalto dangos sluoksnio storių netikslumų, storiai neviršija leistino $\leq -15\%$ nuokrypio nuo pakloto asfalto sluoksnio storio. Kadangi bandomasis ruožas įrengtas pagal STR R-35-01 *Automobilių kelių asfaltbetonio ir žvyro dangos*, tai taikomas leistinas pakloto asfalto sluoksnio nuokrypis $\leq -15\%$.

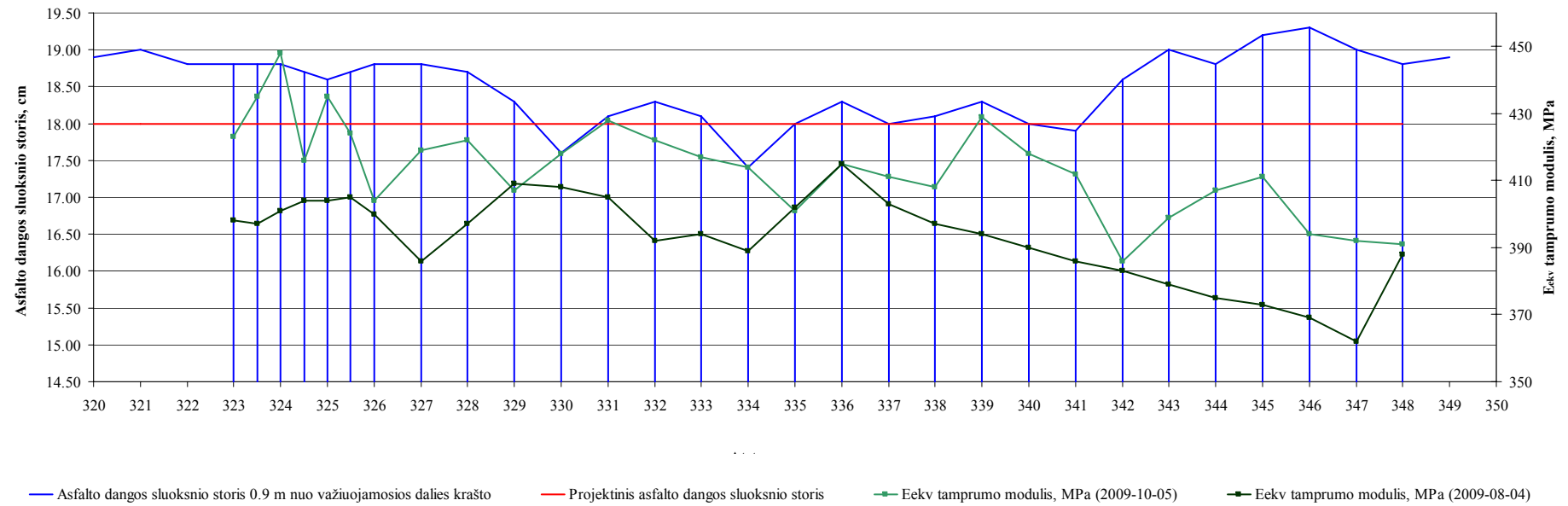
Analizuojant asfalto dangos sluoksnių storį tik kairėje kelio pusėje 0,9 m nuo krašto (4.13 pav.), kai kurios asfalto dangos sluoksnių reikšmės yra mažesnės nei projektinis asfalto dangos sluoksnio storis. Visuose kituose taškuose asfalto sluoksnio storiai yra didesni už projektinį ir skiriasi nuo 0,60 cm iki 1,30 cm. Didžiausias nuokrypis nuo projekcinio asfalto dangos sluoksnių storio reikšmės yra ties PK346, mažiausias – ties PK334. Tačiau asfalto dangos sluoksnių storiai neviršija leistino $\leq -15\%$ nuokrypio nuo pakloto asfalto sluoksnio storio.



4.12 pav. Kairės pusės asfalto dangos sluoksnių storiai



4.13 pav. Kairės pusės asfalto dangos sluoksnių storiai 0,9 m nuo krašto



4.14 pav. Bandomojo kelio ruožo 12-tos dangos konstrukcijos kairės pusės E_{ekv} tamprumo modulio reikšmių kitimas priklausomai nuo dangos konstrukcijos matuojamo taško padėties (asfalto sluoksnio storio)

Atlikus bandomojo kelio ruožo 12-tos dangos konstrukcijos kairės pusės deformacijos modulio reikšmių kitimą priklausomai nuo asfalto sluoksnio storio nustatyta, kad deformacijos modulis, matuotas spalio mėnesį, yra didesnis nei rugpjūčio mėnesį. Pagal pateiktą diagramą (4.14 pav.) matoma, kad deformacijos modulio reikšmės priklauso ne tik nuo asfalto sluoksnio storio bet ir nuo dangos konstrukciją sudarančių medžiagų, temperatūros. Analizuojant asfalto sluoksnio storį ties temepatūros daviklių įrengimo vieta, nustatyta, kad asfalto sluoksnio storis yra 16,60 cm, matuojant 1,1 m nuo kelio ašies.

4.3. Temperatūros redukavimo +20 °C koeficiento nustatymas

Paskutinį dešimtmetį Lietuvos kelių dangų konstrukcijų įlinkių, išmatuotų krintančio svorio deflektometru ir apskaičiuotų E_0 modulio reikšmių redukavimas +20 °C temperatūrai buvo atliekamas pagal sekančią metodiką:

- išmatuoti įlinkiai redukuojami į nustatytą (užduotą) apkrovą pagal tiesinę priklausomybę. Dažniausiai užduota apkrova lygi 50 kN. Ši užduota apkrova, kai apkrovos plokštės skersmuo lygus 300 mm, atitinka 707 kPa kontaktinį slėgį;
- matavimų duomenų redukavimas standartinei asfalto dangos temperatūrai +20°C atliekamas nustačius asfalto dangos temperatūros redukcijos (pataisos) koeficientą. Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k_T = 10^{-\alpha(T-20)} \quad (3.3)$$

čia: k_T – temperatūros redukcijos koeficientas; T – vidutinė dangos temperatūra, išmatuota tyrimų metu, °C;

$$\alpha = 0,000169 \cdot h_{asf}^{1,4635}, \quad (3.4)$$

h_{asf} – asfalto sluoksnio storis, cm.

- E_0 modulio reikšmės dangos paviršiuje apskaičiuojamos pagal formulę:

$$E_0 = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot q \cdot a}{D_0}, \quad (3.5)$$

čia: q – slėgis į kelio dangą (kPa); a - plokštės, kurią veikia apkrova spindulys (mm); D_0 - įlinkis apkrovos taške (μm), t.y. išmatuotas įlinkis redukuotas 50 kN apkrovai ir +20 °C standartinei temperatūrai; μ - Puasono koeficientas, priimtas 0,35.

Ši metodika buvo taikoma keletą metų eksploatuojamoms kelio dangoms, bet keičiantis kelių tiesimo medžiagoms, joms senstant keitėsi ir asfalto sluoksnio standumas. Pastebėta, kad kuo daugiau tyrimo temperatūra skiriasi ir yra aukštesnė nei standartinė, tuo daugiau abejonių sukelia matavimo rezultatų redukavimas standartinei +20 °C temperatūrai.

Bandomajame kelio ruože vienoje iš dangos konstrukcijų įrengti temperatūros davikliai leido patikrinti šiuo metu Lietuvoje galiojančią kelių dangų konstrukcijų įlinkių ir apskaičiuotų E_0 modulio reikšmių redukavimo $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai metodiką realiomis sąlygomis. Tyrimo patikimumo užtikrinimui buvo patikslinti asfalto dangos sluoksnio storiai: paimti kernai ir atlikti matavimai georadaru.

Įvertinus gautų eksperimentinio tyrimo duomenų sklaidą, standartinę nuokrypį, bei matematinius-statistinius rodiklius, gavome tokį temperatūros redukcijos koeficientą:

$$k_T = 10^{-0,000221 \cdot h_{asf}^{1,0229} \cdot (T-20)} \pm 9 \text{ MPa}, \quad (3.6)$$

čia: T – asfalto pagrindo sluoksnio temperatūra 10 cm gylyje, matuojama tyrimų metu, $^{\circ}\text{C}$;

$$\alpha = 0,000221 \cdot h_{asf}^{1,0229}, \quad (3.7)$$

h_{asf} – bendras asfalto dangos sluoksnio storis, cm.

$$k_T = \frac{E_f}{E_{20}}, \quad (3.8)$$

$$E_{20} = \frac{E_f}{k_T}, \quad (3.9)$$

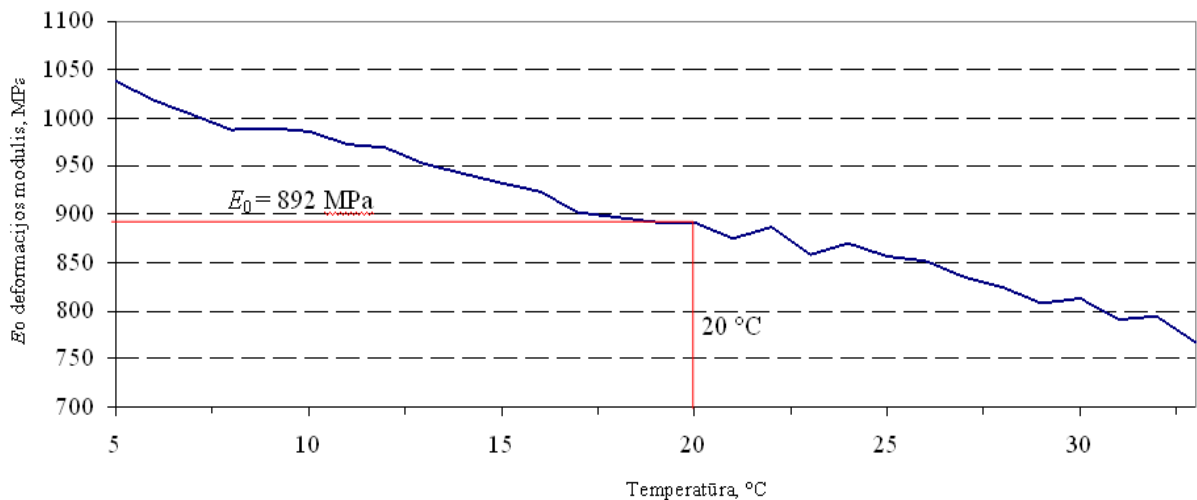
čia: k_T – temperatūros redukcijos koeficientas; E_{20} – dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotas deformacijos modulis prie $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros, MPa; E_f – dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio deformacijos modulio reikšmė, gauta tyrimų metu, MPa.

Panaudojus temperatūros redukcijos koeficientą k_T , gautos deformacijos modulio reikšmės pateiktos 3.1 lentelėje.

4.2 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotos E_0 modulio reikšmės, taikant temperatūros redukcijos koeficientą

Matavimo Eil. Nr.	Georadaru nustatytas asfalto dangos sluoksnio storis k. p., 0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto	Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio temperatūra (FWD)	Temperatūros redukcijos koeficientas, k_T	E_0 modulio reikšmės, gautos atliekamo bandymo metu D_0 , MPa	Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulis, redukuotas taikant temperatūros redukcijos koeficientą, MPa
		T_{AC} 10 cm gylyje			
1	18,80	5	1,17	1038	890
2	18,80	6	1,15	1018	882
3	17,60	7	1,13	1002	885
4	18,00	8	1,12	987	878
5	18,30	9	1,12	989	886
6	18,30	10	1,10	985	892
7	17,90	11	1,09	973	891
8	18,80	12	1,09	969	893
9	18,7	13	1,07	952	887
10	18,70	14	1,06	942	886
11	18,60	15	1,05	932	886
12	18,30	16	1,04	924	888
13	18,10	17	1,03	902	876
14	19,30	18	1,02	897	878
15	18,7	19	1,01	892	883
16	18,80	20	1,00	892	892
17	18,10	21	0,99	874	883
18	17,40	22	0,98	886	903
19	18,30	23	0,97	858	884
20	18,10	24	0,96	869	904
21	18,70	25	0,95	856	901
22	18,50	26	0,94	851	904
23	17,85	27	0,93	834	893
24	18,20	28	0,92	825	893
25	18,15	29	0,92	807	882
26	18,15	30	0,91	813	897
27	18,60	31	0,89	791	884
28	18,80	32	0,88	794	898
29	17,60	33	0,88	767	869

4.1 lentelėje pateikta georadaru nustatyti asfalto dangos sluoksnių storiai kairėje kelio pusėje, 0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto; elektroniniu termometru TE-100 išmatuota asfalto pagrindo sluoksnio temperatūra. Taip pat pateiktos asfalto sluoksnio tamprumo modulio reikšmės, perskaičiuotos esant 707 kPa slėgiui.



4.15 pav. E_0 modulio reikšmės, gautos tyrimų metu

Iš diagramos (4.15 pav.) matyti, kad prie standartinės +20 °C asfalto sluoksnio temperatūros, E_0 modulis lygus 892 MPa, todėl pritaikius temperatūros redukcijos koeficientą, apskaičiuotos E_{T_0} modulio reikšmės (dangos temperatūros ribos $T = (+5...+30)$ °C bus lygios E_{020} modulio reikšmėms.

Tyrimo metu gauti matavimo rezultatai buvo patikrinti matematiniais – statistiniais metodais. Nustatyta gautų reikšmių koreliacija, patikimumo intervalai ir kiti statistiniai parametrai.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

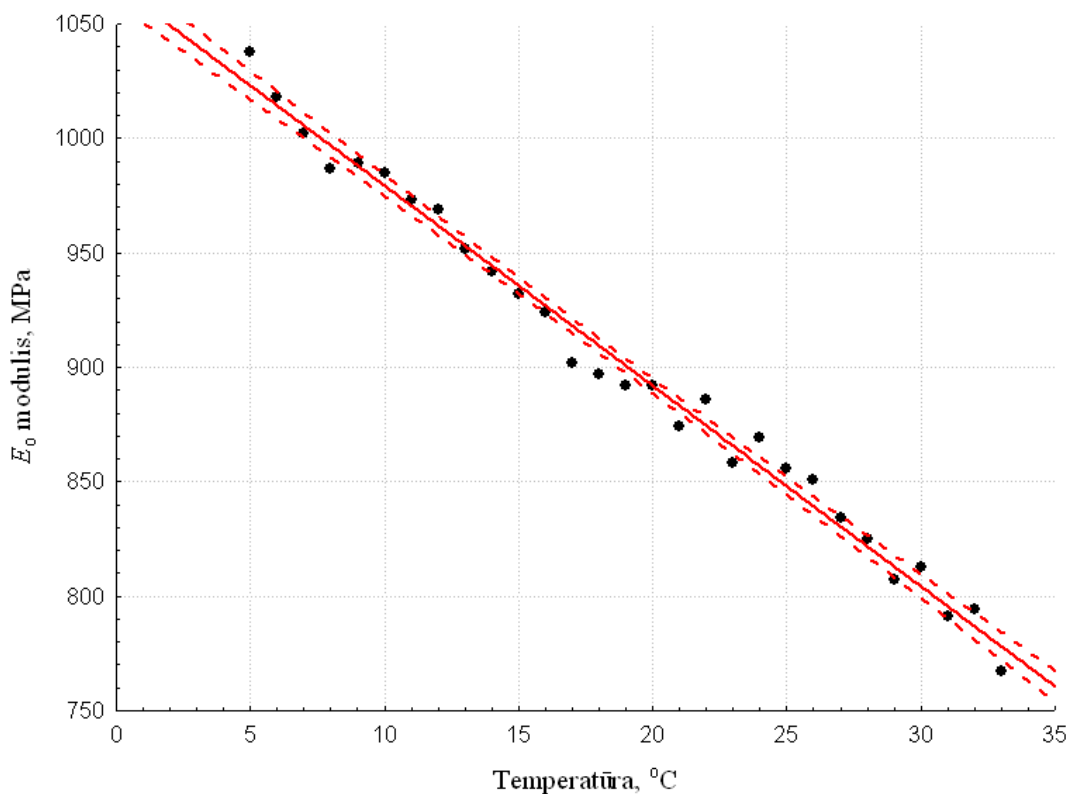
1. Bandomojo kelio ruožo 12-tos dangos konstrukcijos drėgnio ir temperatūros matavimai skirti įvertinti kelio konstrukcijos hidroterminio režimo kaitą eksploatuojant kelią skirtingu metų laiku.
2. Eksperimentinio tyrimo metu buvo siekiama stebėti temperatūros kitimą nuo 5 °C iki 33 °C, matuotą asfalto dangos paviršiuje ir 10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus. Kiekvieną kartą temperatūrai pakylant 1 °C buvo naudojamas krintančio svorio deflektometras Dynatest FWD 8000 kelio dangos stiprumui diagnozuoti.
3. Atlikus eksperimentinį tyrimą buvo nustatyta, kad asfalto pagrindo sluoksnio temperatūra, išmatuota elektroniniu TE-100 termometru, nuo temperatūros, matuotos temperatūros davikliais, skyrėsi nuo -1 °C iki + 4 °C. Temperatūros davikliais išmatuota temperatūra yra didesnė arba lygi elektroniniu termometru TE-100 išmatuotai temperatūrai.

4. Bandomajame kelio ruože 12-oje kelio dangos konstrukcijoje matuojant georadaru buvo išmatuoti asfalto dangos sluoksnių storiai ir nustatyta, kad išmatuoto georadaru asfalto dangos sluoksnio storis kairėje kelio pusėje ženkliai didesnis už projektinį storį.
5. Asfalto sluoksnio storis ties temperatūros daviklių įrengimo vieta yra lygus 16,60 cm, kur projektinio asfalto sloksnio storis yra lygus 18,00 cm.
6. Atliekant kelio dangos stiprio ir E_0 modulio reikšmių vertinimus, gauti matavimo rezultatai yra redukuojami į jų ekvivalentines reikšmes esant standartinei temperatūrai ir apkrovai. Atlikto eksperimentinio tyrimo metu nustatytas temperatūros redukcijos koeficientas, kuris yra lygus: $k_T = 10^{-0.000221 \cdot h_{asf}^{1.0229} \cdot (T-20)}$.

5. Eksperimentinio tyrimo matavimų rezultatų vertinimas

5.1. Gautų tyrimų rezultatų vertinimas matematiniais-statistiniais metodais

Tyrimo metu išmatuotų dangos konstrukcijos E_o modulio, asfalto sluoksnio storio ir asfalto sluoksnio temperatūra įvertinami matematiniais-statistiniais metodais. 5.1 pav. ir 5.2 pav. pateikta asfalto sluoksnio temperatūrų, išmatuotų 10 cm gylyje, ir deformacijos modulio reikšmių E_o , gautų tyrimo metu, koreliacija ir E_o patikimumo intervalai.



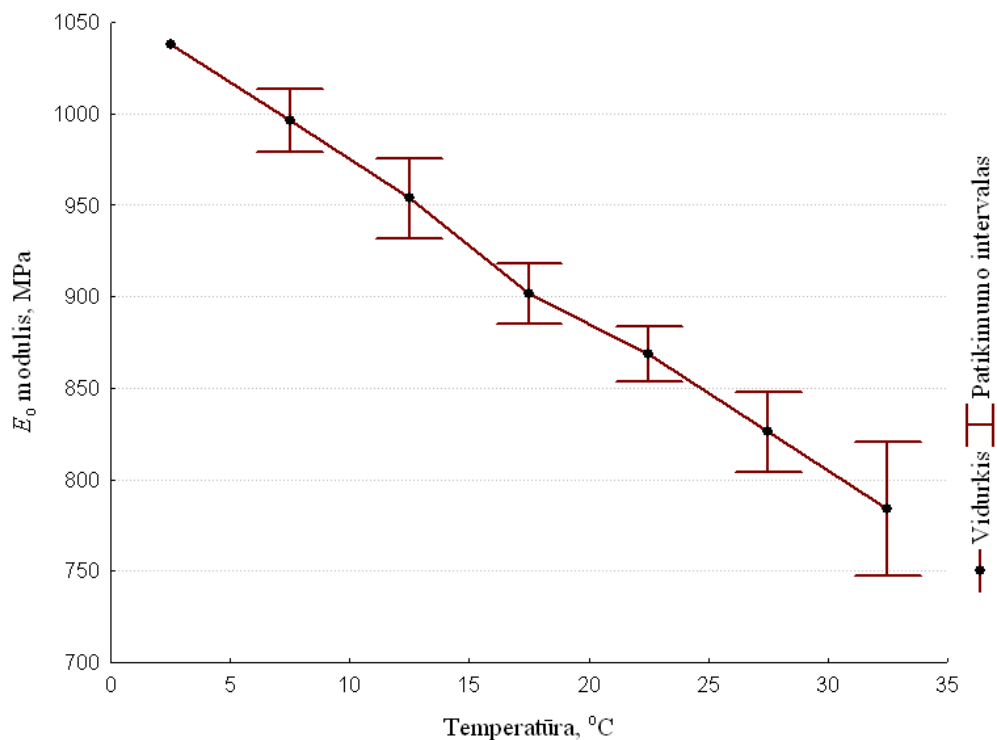
5.1 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio temperatūros 10 cm gylyje ir E_o modulio reikšmių, gautų tyrimo metu, koreliacija

5.1 lentelė. Koreliacijos koeficiento reikšmės

	Koreliacija, reikšmingumo lygmuo $p < ,05000$ N=29	
	Temperatūra, °C	E_o modulis, MPa
Temperatūra, °C	1,0000	-,9939
	p= ---	p=0,00
E_o modulis, MPa	-,9939	1,0000
	p=0,00	p= ---

Iš 5.1 pav. matoma, kad didėjant temperatūrai (X), E_o modulio reikšmės (Y) mažėja. Koreliacijos koeficientas parodo tarpusavio ryšio stiprumą tarp nagrinėjamų veiksnių. Šiuo analizuojamu atveju koreliacijos koeficientas $r = -0,9939$, o tai parodo labai stiprų ryšį tarp kintamųjų. Kadangi koreliacijos koeficientas neigiamas, tai reiškia ryšys yra atvirkštinis. Priklausomybę tarp kintamųjų aprašo lygtis $Y = 1066,9005 - 8,7498 \cdot X$.

Iš rezultatų patikimumo intervalo diagramos (5.2 pav.) pastebima, kad didžiausias E_o modulio reikšmių skirtumas yra nuo 30°C iki 33°C , o mažiausias - tarp 15°C - 25°C temperatūrų. Nustatyta, kad didėjant asfalto pagrindo sluoksnio temperatūrai, dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_o modulio reikšmės mažėja.



5.2 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_o reikšmių, išmatuotų tyrimų metu, patikimumo intervalai

Analizuojant temperatūros įtaką stiprumui, t.y. E_o modulio reikšmėms, apskaičiuojama kiekvieno kintamojo vidurkis, moda, imties standartinis nuokrypis, variacijos ir koreliacijos koeficientai, minimali ir maksimali reikšmės. Iš 5.2 lentelės matoma, kad imtyje dažniausia pasitaikanti E_o modulio reikšmė (Moda) yra 892 MPa, kuri imtyje pasitaikė du kartus, visos kitos reikšmės yra skirtingos. Minimali E_o modulio reikšmė – 767 MPa, maksimali – 1038 MPa.

5.2 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio, išmatuoto tyrimo metu, ir asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros statistiniai parametrai

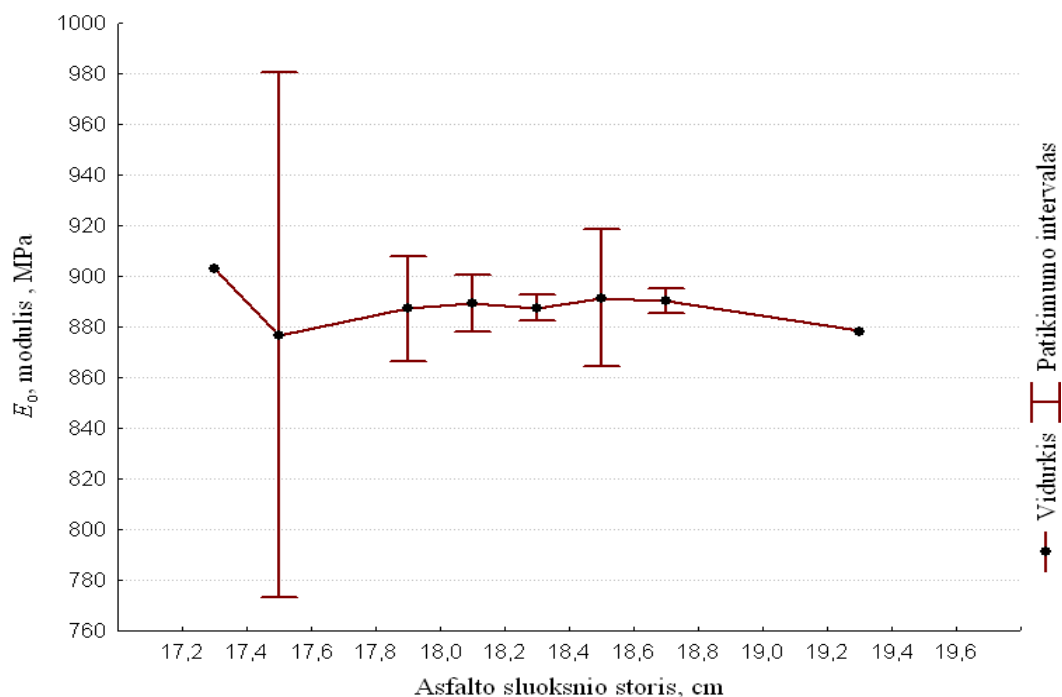
	Vidurkis	Moda	Reikšmių pasikartojimo dažnis	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Imties standartinis nuokrypis
Temperatūra, °C	19,0000	Multiple	1	5,0000	33,000	8,51469
E_0 modulis, MPa	900,6552	892,0000	2	767,0000	1038,000	74,95536

Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio reikšmių išsibarstymo sklaidą apibūdina variacijos koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v = \frac{\sigma_N}{\bar{X}}; \quad (5.1)$$

$$v = \frac{\sigma_N}{\bar{X}} = \frac{74,95536}{900,6552} = 0,0832$$

E_0 modulio variacijos koeficientas lygus 0,0832, tai sudaro 8 %, vadinasi variacija maža, nes mažiau už 10 %. Tačiau redukuojant E_0 modulio reikšmes turi įtakos tyrimo metu išmatuota asfalto pagrindo sluoksnio temperatūra ir asfalto dangos sluoksnių storis atitinkamame matavimo taške. Todėl redukuotam E_0 moduliui, priklausančiam nuo asfalto sluoksnio storio, yra nurodomi patikimo intervalai, kurie pateikti 5.3 pav. ir 5.4 pav.



5.3 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio, priklausomai nuo asfalto sluoksnio storio, patikimumo intervalai

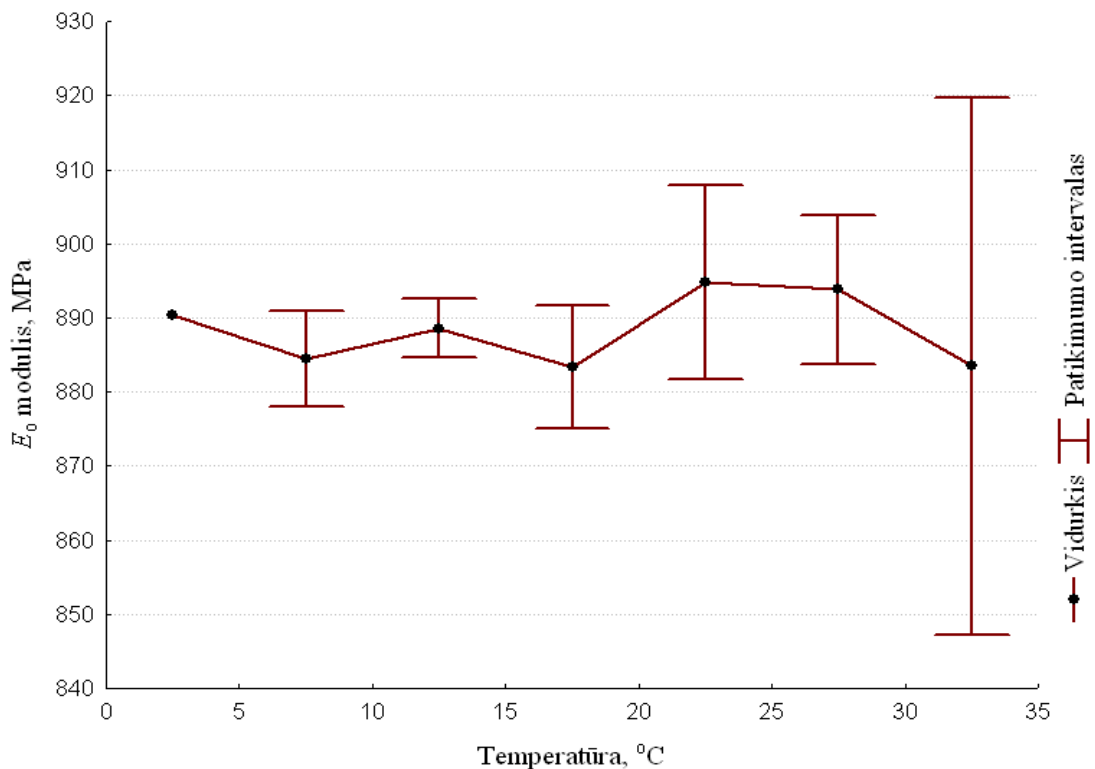
Iš patikimumo intervalo diagramos matoma, kad didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas yra esant (17,4-17,6) cm asfalto sluoksnio storiams, mažiausias – (19,2-19,4) cm.

5.3 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuoto E_0 modulio ir asfalto sluoksnio storio statistiniai parametrai

	Vidurkis	Moda	Reikšmių pasikartojimo dažnis	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Imties standartinis nuokrypis
Asfalto sluoksnio storis, cm	18,3500	18,80000	5	17,4000	19,3000	0,441386
E_0 modulis, MPa	888,5001	Multiple	1	868,5453	903,9734	8,634804

Iš 5.3 lentelės matome, kad vidutinė E_0 modulio reikšmė yra 889 MPa, maksimali reikšmė 904 MPa, o minimali – 869 MPa. Vidutinę duomenų sklaidą apie vidurkį parodo imties standartinis nuokrypis, kuris yra lygus 8,63 MPa.

Vidutinė asfalto pagrindo sluoksnio reikšmė yra 18,35 cm, dažniausiai pasitaikanti reikšmė imtyje yra lygi 18,80 cm. Minimalus asfalto dangos sluoksnio storis yra 17,4 cm, o maksimalus – 19,3 cm.



5.4 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotų deformacijos modulio reikšmių, priklausomai nuo asfalto sluoksnio temperatūros, patikimumo intervalai

Iš redukuotų E_0 modulio reikšmių patikimumo intervalo matome, kad didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas yra nuo 30 °C iki 33 °C, o mažiausias - nuo 0 °C iki 5 °C temperatūrų.

Redukavus dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio reikšmes prie 20 °C temperatūros, 5.4 lentelėje pateikiamos E_0 modulio ir asfalto pagrindo temperatūros vidurkio, modos, imties standartinio nuokrypio, variacijos ir koreliacijos koeficientų reikšmės.

5.4 lentelė. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuoto E_o modulio ir temperatūros asfalto pagrindo sluoksnyje statistiniai parametrai

	Vidurkis	Moda	Reikšmių pasikartojimo dažnis	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Imties standartinis nuokrypis
Temperatūra	19,0000	daugialypė	1	5,0000	33,0000	8,514693
E_o modulis, MPa	888,5001	daugialypė	1	868,5453	903,9734	8,634804

Iš 5.4 lentelės matoma, kad moda yra daugialypė, t.y. E_o modulio reikšmės imtyje yra skirtingos. Minimali redukuoto E_o modulio reikšmė – 869 MPa, maksimali – 904 MPa.

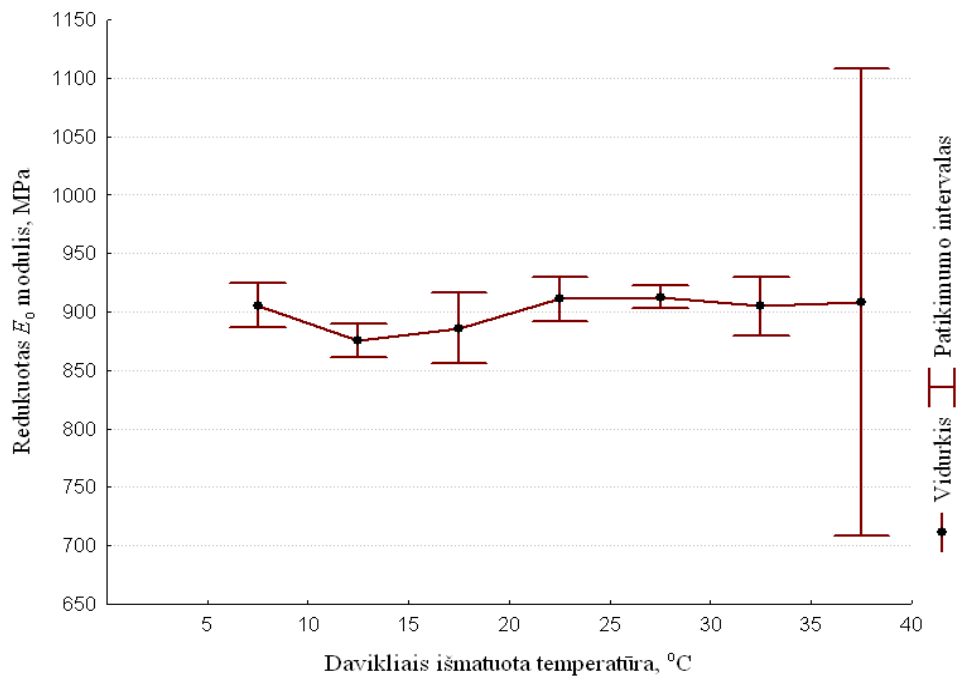
Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotų E_o modulio reikšmių išsibastymo sklaidą parodo variacijos koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v = \frac{\sigma_N}{\bar{X}} = \frac{8,634804}{888,5001} = 0,00972,$$

Taigi dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_o modulio variacijos koeficientas yra lygus 0,00972. Tai sudaro 0,97 %, vadinasi variacija maža, kadangi mažiau už 10 %.

Temperatūros davikliais išmatuotos asfalto pagrindo sluoksnio temperatūros ir gauto asfalto dangos sluoksnio redukuoto E_o modulio tarpusavio ryšys

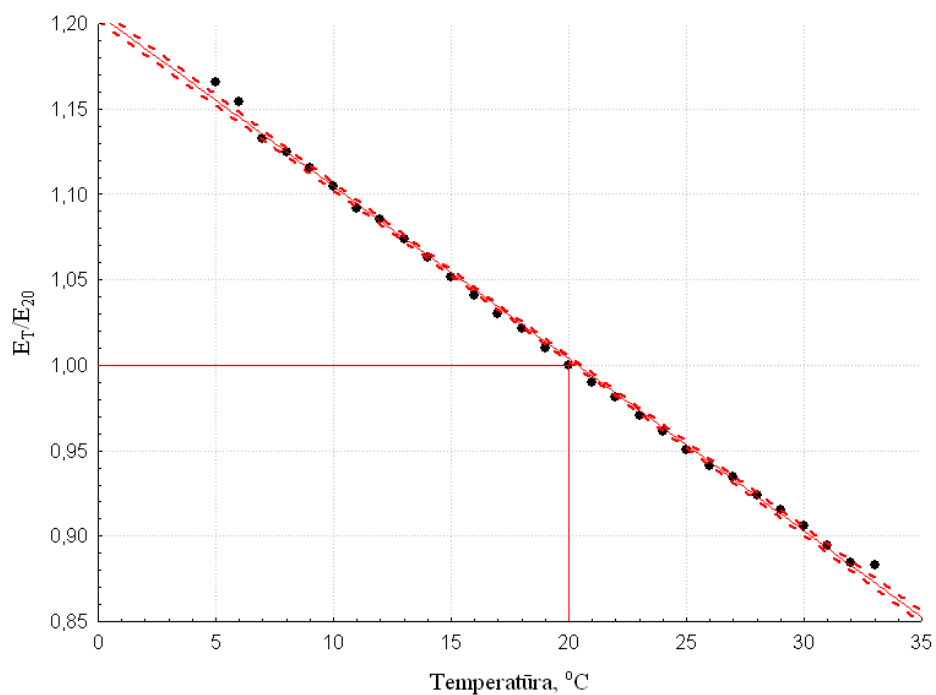
Kadangi eksperimentinio tyrimo metu asfalto sluoksnio temperatūra buvo matuojama ne tik elektroniniu termometru, bet ir davikliais, tai E_o modulio reikšmės yra redukuojamos prie atitinkamos asfalto sluoksnio temperatūros ir gauti rezultatai įvertinami matematiniais-statistiniais metodais. 5.5 pav. pateikta asfalto sluoksnio E_o modulio reikšmės, redukuotos prie temperatūros davikliais išmatuotų temperatūrų, patikimumo intervalai.



5.5 pav. Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotų E_0 modulio reikšmių patikimumo intervalai

Iš patikimumo diagramos pastebima, kad didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas yra prie 35 °C - 40 °C, o mažiausias - prie 30 °C -35 °C.

Įvertinus asfalto dangos sluoksnio storį, asfalto pagrindo sluoksnio temperatūrą, 5.7 pav. analizuojamas temperatūros redukcijos koeficiento priklausomybė nuo asfalto sluoksnio 10 cm gylyje temperatūros, kitimas.



5.6 pav. Temperatūrinio redukcijos koeficiento priklausomybė nuo asfalto sluoksnio temperatūros 10 cm gylyje

Pagal pateiktą diagramą matoma, kad prie 20 °C temperatūros, temperatūros redukcijos koeficientas lygus 1. Koreliacijos koeficientas $r = -0,9989$, tai parodo labai stiprų ryšį tarp kintamųjų.

5.2. Temperatūros redukavimo koeficiento patikrinimas

Redukuojant E_0 modulio reikšmės prie 20 °C, buvo naudojami georadaru nustatyti asfalto dangos sluoksnio storių reikšmės kairėje kelio pusėje, 0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto; elektroniniu termometru TE-100 išmatuota asfalto sluoksnio temperatūra 10 cm gylyje. Taip pat buvo naudojamos dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio reikšmės, perskaičiuotos esant 707 kPa slėgiui.

$$\text{Gautas temperatūrinis redukcijos koeficientas: } k_T = 10^{-\alpha(T-20)}, \quad (5.2)$$

$$\text{čia: } \alpha = 0,000221 \cdot h_{asf}^{1,0229}.$$

Temperatūrinio redukcijos koeficiento formulėje buvo naudojami asfalto sluoksnio storiai išmatuoti 0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto, tai patikrinimui buvo parinkti asfalto sluoksnio storiai, matuoti 1,1 m nuo ašies, kairėje kelio pusėje.

Asfalto sluoksnio storis toje vietoje kur įrengti temperatūros davikliai yra 18.30 cm (0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto) ir 17.40 cm (1,1 nuo ašies).

Perskaičiuotos deformacijos modulio reikšmės su pakeistais asfalto sluoksnio storiais, panaudojus temperatūros redukcijos koeficientą, pateikta 5.5 lentelėje.

5.5 lentelė. Asfalto dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio redukuotos E_0 modulio reikšmės, pakeitus asfalto sluoksnio storius

Matavimo Eil. Nr.	Georadaru nustatytas asfalto dangos sluoksnio storis k.p., 1,1 m nuo ašies	Dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio temperatūra (FWD)	Temperatūros redukcijos koeficientas, k_T	Deformacijos modulio reikšmės, gautos atliekamo bandymo metu D_1 , MPa	Dangos konstrukcijos E_0 modulis, redukuotas taikant temperatūros redukcijos koeficientą, MPa
		T_{AC} 10 cm gylyje			
1	18,80	5	1,17	1038	890
2	18,30	6	1,15	1018	886
3	16,60	7	1,12	1002	891
4	17,20	8	1,12	987	882
5	17,90	9	1,11	989	889
6	18,40	10	1,11	985	891
7	18,10	11	1,09	973	891
8	18,60	12	1,08	969	894
9	18,35	13	1,07	952	888
10	18,80	14	1,06	942	886
11	18,40	15	1,05	932	887
12	17,20	16	1,04	924	890
13	17,40	17	1,03	902	877
14	18,20	18	1,02	897	879
15	18,75	19	1,01	892	883
16	18,10	20	1,00	892	892
17	16,90	21	0,99	874	882
18	17,80	22	0,98	886	903
19	17,90	23	0,97	858	883
20	18,40	24	0,96	869	904
21	18,35	25	0,95	856	900
22	17,65	26	0,94	851	901
23	16,75	27	0,94	834	889
24	17,6	28	0,93	825	891
25	18,05	29	0,92	807	882
26	18,4	30	0,90	813	899
27	18,40	31	0,90	791	883
28	18,30	32	0,89	794	895
29	16,60	33	0,89	767	862

5.6 lentelė. Statistiniai parametrai redukuoto E_0 modulio reikšmių, perskaičiuotų su pakeistais asfalto sluoksnio storiais, matuotais 1,1 m nuo ašies kairėje kelio pusėje.

	Vidurkis	Moda	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Imties standartinis nuokrypis
Asfalto sluoksnio storis, cm	17,9379	18,40000	16,6000	18,8000	0,656105
Redukuota E_0 modulio, MPa	888,5853	daugialypė	862,2958	904,4971	8,699043

Pagal gautus statistinius duomenis matoma, kad redukuoto E_0 modulio, perskaičiuoto pakeitus asfalto sluoksnio storį, imties standartinis nuokrypis yra 8,70 MPa.

Redukuoto asfalto sluoksnio E_0 modulio, gauto naudojant asfalto sluoksnio storius, išmatuotus 0,9 m nuo važiuojamosios dalies krašto, vidutinė duomenų sklaida apie vidurkį yra lygi 8,63 MPa, o asfalto sluoksnio redukuoto E_0 modulio, perskaičiuoto pakeitus asfalto sluoksnio storį (1,1 m nuo ašies, kairė kelio pusė), vidutinė duomenų sklaida apie vidurkį lygi 8,70 MPa. Matome, kad panaudojus temperatūros redukcijos koeficiento formulę, E_0 modulio standartinis nuokrypis yra labai panašus.

E_0 modulio reikšmės, redukuotos pakeičiant asfalto sluoksnio temperatūras, matuotas elektroniniu termometru ir temperatūros davikliais, yra taip pat panašios.

Taigi galima teigti, kad pakeitus asfalto sluoksnio storius, asfalto sluoksnio temperatūras ir pritaikius temperatūros redukcijos koeficientą, gautos E_0 modulio reikšmės yra labai artimos. Daroma prielaida, kad temperatūros redukcijos koeficiento formulė yra teisinga.

5.3. Penktojo skyriaus išvados

1. Tyrimo metu išmatuotų dangos konstrukcijos asfalto sluoksnio E_0 modulio, asfalto sluoksnio storio ir asfalto sluoksnio temperatūra įvertinami matematiniais-statistiniais metodais. Nustatyta, kad didėjant temperatūrai, E_0 modulio reikšmės mažėja. Gautas stiprus koreliacinis ryšys tarp E_0 modulio ant asfalto dangos paviršiaus ir temperatūros, išmatuotos 10 cm gylyje. Koreliacijos koeficientas: $r = -0,9939$.
2. Sudarant patikimumo intervalo diagramą nustatyta, kad didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas yra nuo 30°C iki 33°C , o mažiausias - nuo 15°C - 25°C temperatūrų.
3. Nustatyta, kad redukuojant E_0 modulio reikšmes turi įtakos tyrimo metu išmatuota asfalto pagrindo sluoksnio temperatūra ir asfalto dangos sluoksnių storis atitinkamame matavimo taške. Iš patikimumo intervalo diagramos gauta, kad didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas yra esant (17,4 - 17,6) cm, o mažiausias – (19,2 - 19,4) cm asfalto sluoksnio storiams.

4. Analizuojant asfalto sluoksnio E_0 modulio reikšmes, redukuotas prie temperatūros davikliais išmatuotų temperatūrų, iš patikimumo intervalo gauta, kad prie 20 °C temperatūros, temperatūros redukcijos koeficientas lygus 1. Gautas labai stiprus koreliacinis ryšys tarp kintamųjų (koreliacijos koeficientas $r = -0,9989$).
5. Atlikus temperatūros redukcijos koeficiento formulės patikrinimą, pakeitus asfalto sluoksnio storius ir asfalto sluoksnio temperatūros reikšmes, išmatuotas temperatūros davikliais, gauta, kad temperatūros redukcijos koeficiento formulė yra teisinga.

Bendrosios išvados

1. Norint tiksliau nustatyti automobilių kelių asfalto dangos konstrukcijos elgseną Lietuvos klimato sąlygomis, reikia atsižvelgti į temperatūros ir drėgno, kaip vieną iš svarbiausių klimato veiksnių, įtaką kelio asfalto dangos konstrukcijos stipriui.
2. Visi projektavimo metodai naudojami Europoje ir pasaulyje yra pritaikyti atsižvelgiant į klimato veiksnius ir medžiagas, naudojamas atskirai kiekvienoje šalyje. Tai sudaro nepalankias sąlygas, kai vienos šalies metodas taikomas kitoje šalyje. Naudojant kitose šalyse taikomus kelių dangų stiprio tyrimo modelius būtina juos pritaikyti konkrečios šalies specifikai.
3. Vienas iš racionaliausių kelio dangos konstrukcijos stiprio nustatymo prietaisų yra krintančio svorio deflektometras, leidžiantis išmatuoti įlinkių dubenį ir įvertinti dangos gebėjimą atlaikyti automobilių apkrovų poveikį. Kelio dangos konstrukcijos stiprio matavimai krintančio svorio deflektometru šiuo metu yra labiausiai paplitę pasaulyje.
4. Atlikus temperatūros ir drėgno bandomojo kelio ruožo 12-oje dangos konstrukcijoje matavimus buvo nustatyta kiekvienos dienos nuo 2009 m. gegužės mėn. 12 d. iki 2009 m. gruodžio mėn. 31 d. aukščiausių ir žemiausių temperatūrų pasiskirstymas asfalto dangos paviršiuje, asfalto pagrindo sluoksnyje (10 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) ir žemės sankasoje (125 cm gylyje nuo dangos paviršiaus). Atlikta drėgno kitimo analizė apsauginiame šalčiui atspariame sluoksnyje (53 cm nuo dangos paviršiaus), žemės sankasos paviršiuje (85 cm nuo dangos paviršiaus), žemės sankasoje (130 cm nuo dangos paviršiaus).
5. Atlikto eksperimentinio tyrimo metu nustatytas temperatūros redukcijos koeficientas:
$$k_T = 10^{-0.000221 \cdot h_{asf}^{1.0229} \cdot (T-20)}$$
, kurio panaudojimas leidžia krintančio svorio deflektometru nustatytas asfalto dangos sluoksnių standumo vertes redukuoti standartinei +20 °C temperatūrai.
6. Tyrimo metu išmatuoti dangos konstrukcijos E_0 modulis, asfalto sluoksnio storis ir asfalto sluoksnio temperatūra įvertinami matematiniais-statistiniais metodais. Gautas stiprus koreliacinis ryšys tarp E_0 modulio ant asfalto dangos paviršiaus ir temperatūros, išmatuotos 10 cm gylyje. Koreliacijos koeficientas: $r = -0,9939$. Nustatytas didžiausias E_0 modulio reikšmių skirtumas nuo 30 °C iki 33 °C, mažiausias – nuo 15 °C iki 25 °C temperatūrų.
7. Įvertinus asfalto dangos sluoksnio storį, asfalto pagrindo sluoksnio temperatūrą, gauta temperatūros redukcijos koeficiento priklausomybė nuo asfalto sluoksnio 10 cm

gylyje temperatūros, kitimas. Nustatyta, kad prie 20 °C temperatūros, temperatūros redukcijos koeficientas lygus 1, gautas koreliacijos koeficientas parodo stiprų ryšį tarp kintamųjų (koreliacijos koeficientas $r = -0,9989$).

Rekomendacijos

Atsižvelgiant į šio magistro darbo rezultatus ir išvadas, rekomenduojama:

1. Panaudoti krintančio svorio deflektometrą, nustatant kelio dangos būklę Lietuvos automobilių keliuose. Tam turi būti sukurti ir patvirtinti esamos dangos konstrukcijos sluoksnių ekvivalentinio tamprumo modulio E_o skaičiavimo metodika ir kiti norminiai dokumentai.
2. Atlikti kelio dangos konstrukcijos stiprumo matavimus 2 kartus per metus spalio ir rugpjūčio mėnesiais, tam kad pasiekti žemiausią ir aukščiausią asfalto sluoksnio temperatūras.
3. Matuojant kelio dangos įlinkius krintančio svorio deflektometru skirtingu metų laiku ir įvairiu paros metu, būtina vertinti kelio dangos stiprio ir E_o modulio priklausomybę nuo dangos temperatūros ir apkrovos. Tuo tikslu rekomenduojama taikyti eksperimentiniu tyrimu nustatytą redukcijos koeficientą: $k_T = 10^{-0.000221 \cdot h_{asf}^{1.0229} \cdot (T-20)}$, kai asfalto dangos sluoksnio temperatūra kinta (+5 ... +25) °C intervalo ribose, o asfalto sluoksnių bendras storis kinta (17 – 20) cm intervalo ribose.

Literatūra

- Atitinkančio Lietuvos sąlygas automatizuoto automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų projektavimo metodo tyrimai, pertvarkymas ir pritaikymas (1 etapas). Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Mokslo darbo ataskaita. 2001 m.
- Baltzer, S.; Jansen J. M. 1994. *Temperature Corection of Asphalt - Moduli for FWD Measurements. Proc. Of the 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*. Minesota: University of Minesota, v 1, p. 754 - 767.
- Braga, A. 2005. *Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams* [Models of Pavement Deterioration and their Adaptation to Lithuanian Automobile Roads]. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija-02T. Vilnius: Technika. 156 p.
- Braga A.; Puodžiukas V.; Čygas D.; Laurinavičius A. 2003. *Investigation of automobile roads pavement deterioration trends in Lithuania*. Journal of Civil Engineering and Management: IX, (I). p. 3–9.
- COST Action 351 – WATMOVE. *Water Movement in Roadpavements and Embankments*, 2007.
- COST Action 351 WATMOVE - *Water Movements in Road Pavements and Embankments. Water Flow, Theory, Measurement and Application to Highway Engineering*. Constanta - September, 13th 2006.
- Čižas A.; Viršilas V.; Žekevičius J. 2000. *Aiškinamasis medžiagų atsparumo uždavinynas*. Vilnius: TEV. 296 p.
- Čygas D.; Laurinavičius A. 2004. *Lietuvos kelių oro sąlygų informacinės sistemos duomenų bazės tobulinimas, papildymas ir palaikymas, rezultatų analizė ir vertinimas*. Mokslo tyrimo darbo ataskaita. Vilnius: VGTU. 91 p.
- Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A. ir kt. 2007. *Lietuvos automobilių kelių eksperimentinių konstrukcijų bandomasis ruožas (I)*, Vilnius.
- Dynatest 8000 FWD Test System. Dynatest Engineering A/S. 1995. 185 p.
- Ekdahl. P. 1999. *Sensitivity Analysis of Two Deterioration Models for Flexible Pavements*. Lund University, Lund, 102 p.
- Fonad, M. B.; Mostafa, A. H. 2002. Effect of the Variability of seasonal moduli adjustment factors on the mechanistic–empirical overlay design. Proceedings of *The 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Selected Papers: (24–26 June 2002, Lisbon, Portugal)*: p. 295–302.

- Hoffman, M. S.; Thompson, M. P. 1982. *Backcalculating Nonlinear Resilient Moduli from Deflection Data*. In Transportation Research Record 852, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p 42-51.
- Hudson W. R.; Elkins G. E.; Uddin W.; Reilley K. T. 1987. *Evaluation of Pavement Deflection Measuring Equipment*. Federal Highway Administration. FHWA - TS-87-208. 78 p.
- Jazdauskas, G. 2004. *Deflektometro naudojimas kelių dangų tyrimams*. Lietuvos keliai 2004/1. Vilnius: Ex Arte. p. 56-59.
- Lauren J. Swett. 2007. Seasonal Variations of Pavement Layer Moduli Determined Using Situ Measurements of Pavement Stress and Strain. A Thesis for the Degree of Master of Science. The University of Maine. 319 p.
- Laurinavičius, A. 2004. Nauja habilitacijos tvarka. Lietuvos keliai 2004/2. Vilnius: Ex Arte. p. 62-65.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. 2008. *Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas TRA asfaltas 08*. Vilnius.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. 2008. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės IT asfaltas 08*. Vilnius.
- Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos. [Žiūrėta 2010 m. vasario 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.meteo.lt/klim_lt_klimatas.php?tipas=krituliai>.
- Lietuvos Respublikos Vyriausybė. Dėl Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos įgyvendinimo iki 2012 metų nacionalinės strategijos patvirtinimo, 2008.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. 2007. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07*. Vilnius.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. Įlinkių matavimo naudojant Benkelmano siją instrukcija. Vilnius, 1995 m.
- LST 1360.5:1995 *Automobilių kelių gruntai*. 1995. Bandymo metodai. Bandymas štapu. 14 p.
- Palšaitis, E.; Sakalauskas, K.; Vidugiris, L. 1990. *Kelių eksploatacija*. Vilnius: mokslas.
- Palšaitis, E.; Vidugiris, L. 1999. *Automobilių kelių projektavimas*. Vilnius.
- Puodžiukas, V.; Pakalnis, A. 2002. *Determination of seasonal factors of structural condition values of bituminous pavements*. Journal of Civil Engineering and Management 8(2), p.133-137.
- Ruotoistenmäki Antti, Spo Harri. Tien rakenteellinen kunto. VTT Yhdyskuntateknikka, Tutkimusraportti 480. Espoo, 1999, 31p. (Fin.)

- Рокас, С. Ю.; Сакалаускас, К. А.; Станкус, Е. А. 1983. Отчет о научно – исследовательской работе, следования точности и стабильности технологического процесса приготовления асфальтбетонных смесей Вильнюс: 263с.
- Sakalauskas, L. 2006. *Informacinės technologijos inžinerijoje*. Paskaitų konspektas. Vilnius. 143 p.
- Seo, Joo-Won; Kim, Soo-II; Choi, Jun-Sung; Park, Dae-Wook. 2009. Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of Falling Weight Deflectometer, *Construction and Building Materials* 23(10): 3206-3213.
- Shoop, S.; Affleck, R.; Haehnel, R.; Janoo, V. 2008. Mechanical Behavior Modeling of Thaw-weakened Soil, *Cold Regions Science and Technology* 52(2): 191–206. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.023.
- Sivilevičius, H.; Daugėla, P. 2007. Žalingos vandens įtakos kelio dangos konstrukcijai ir automobilio važiavimo sąlygoms analizė. *Dešimtoji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija. Mokslas – Lietuvos ateitis. TRANSPORTAS*.
- System oceny stanu nawierzchni „SOSN“. Wytyczne stosowania. Warszawa, 1989, 48 p.
- Staged pavement design, a Danish construction practice. Vejteknisk Institut, 1995, 14 p.
- Statybinė klimatologija RSN 156-94. Vilnius: Aplinkos ministerija 1995. 136 p.
- Šiaudinis, G. 2007. *Lietuvos automobilių kelių nestandžių dangų konstrukcijų stiprumo nustatymo metodikos sukūrimas* [Methods for determining the structural strenght of flexible pavements on Lithuanian's roads]. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija-02T. Vilnius: Technika. 23 p.
- Šiaudinis G.; Čygas D. 2007. Effects on the Structural Strength of Asphalt pavements, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2 (2): Vilnius: Technika, p. 67-72. ISSN 1822-427X (print), ISSN 1822-4288 (online). (Thomson ISI Web of Science).
- Talvik, O; Aavik, A. 2009. A Use of FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4 (4): 196-202. (Thomson ISI Web of Science).
- Technical advisory. Texas department of transportation. 2008. [Žiūrėta 2009 m. lapkričio 14 d.]. Prieiga per internetą: <ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/tips/falling_weight_deflectometer.pdf>.
- Wistuba M.; Litzka J. 2002. Consideration of Climatic conditions in pavement design. Proceedings of *The 6 th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Selected Papers: (24–26 June 2002, Lisbon, Portugal)*: p. 373–380.

Visuotinė lietuvių enciklopedija XII Lietuva. Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. Vilnius, 2007.

Višniakas, I.; Slivinskas, K. 2005. Patikimumo teorija. *Objektų kokybės vertinimo ir patikimumo skaičiavimų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika. 91 p.

Zollars, J.; Dai S. 2002. *Resilient Modulus of Minnesota Road Research Project*. Transportation Research Record. No 1786, Washington, D.C., p. 20-28.

PRIEDAI