

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lina ŠNEIDERAITIENĖ

AUTOMOBILIŲ KELIO VIRŠUTINĖS
DANGOS DOLOMITO UŽPILDO
SAVYBIŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2015–2021 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Daiva ŽILIONIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

prof. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

dr. Goran MLADENOVIC (Belgrado universitetas, Serbija, statybos inžinerija – T 002),

dr. Žymantas RUDŽIONIS (Kauno technologijos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

dr. Saulius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2021 m. birželio 14 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. gegužės 13 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-025-M mokslo literatūros knyga

doi:10.20334/2021-025-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021

© Lina Šneideraitienė, 2021

lina.sneideraitiene@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Lina ŠNEIDERAITIENĖ

RESEARCH OF THE DOLOMITE
AGGREGATE PROPERTIES OF THE
AUTOMOBILE ROAD SURFACING

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2021.

Supervisor

Prof. Dr Daiva ŽILIONIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Dr Goran MLADENOVIC (University of Belgrade, Serbia, Civil Engineering – T 002),

Dr Žymantas RUDŽIONIS (Kaunas University of Technology, Civil Engineering – T 002),

Dr Saulius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 14 June 2021**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 13 May 2021.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Lietuvoje automobilių kelio viršutinės dangos sluoksnyje dažniausiai naudojamas granito užpildas. Dolomitas, kaip vietinė medžiaga, yra visuotinai žinoma kaip medžiaga, kurį nėra tinkama naudoti automobilių kelio viršutinės dangos sluoksnyje. Todėl būtina įvertinti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją fizikinių ir mechaninių savybių verčių sklaidą bei automobilių kelio viršutinės dangos su šio tipo užpildu eksploatacines savybes.

Disertacijos tikslas – įvertinti dolomito užpildo, gaminamo taikant daugkartinio trupinimo technologiją, panaudojimo galimybes automobilių kelio viršutinėje dangoje. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūros ir šaltinių, autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir dešimt priedų. Įvade suformuluota tiriamoji problema, aprašytas darbo aktualumas, tyrimų objektas, pateiktas darbo tikslas ir darbo uždaviniai, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas ir darbo rezultatų praktinė reikšmė, pateikti ginamieji teiginiai, darbo rezultatų aprobavimas bei darbo struktūra. Pirmajame skyriuje pateikiama su disertacijos tema susijusių mokslinių darbų apžvalga. Aprašomos dolomito ir granito uolienų charakteristikos. Analizuojamos naudingosios iškasenos, užpildų, naudojamų automobilių kelių tiesyboje, gavyba ir gamyba. Apibendrintai pristatytos užpildų savybės, jų reglamentavimas ir įtaka asfalto mišinio elgsenai, nagrinėta asfalto mišinių projektavimo eiga, kelio dangos paviršiaus atsparumas slydimui. Antrajame skyriuje detalizuota technologija, pagal kurią gaminamas daugkartinio trupinimo dolomito užpildas. Pateikti daugkartinio trupinimo dolomito užpildų fizikinių ir mechaninių savybių tyrimų, atliktų pagal sudarytą eksperimentinių tyrimų planą ir sekas, rezultatai. Pristatyti automobilių kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui eksperimentinio natūrinio tyrimo Lietuvos valstybinės reikšmės kelių ruožuose su daugkartinio trupinimo dolomito užpildu rezultatai. Trečiajame skyriuje, remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais, įvertintos daugkartinio trupinimo dolomito užpildo fizikinės ir mechaninės savybės, lyginant su granito užpildu. Įvertintas, daugkartinio trupinimo dolomito užpildo, panaudoto automobilio kelio viršutinėje dangoje, dangos paviršiaus atsparumo slydimui verčių kitimas, vertinant per pirmuosius penkerius automobilio kelio viršutinės dangos eksploatacijos metus. Atliktas teorinis ekonominio efekto paskaičiavimas asfalto mišinių pagamintu su daugkartinio trupinimo dolomito užpildu. Disertacijos tema publikuoti 7 moksliniai straipsniai: 1 – mokslo žurnale, įtrauktame į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, 2 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėse, 4 – kituose recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose.

Abstract

The granite aggregate is the most often used for road surfacing in Lithuania. Dolomite, as a native material, is commonly known as a material that is not suitable for use on road surfacing. Therefore, it is necessary to evaluate the dispersion of the values of physical and mechanical properties of dolomite aggregate produced using the multiple crushing technology, and the performance of the road surfacing that has this type of aggregate.

The dissertation aims to evaluate the options for the dolomite aggregate produced by multiple crushing technology for road surfacing. The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, references, a list of scientific publications by the author publications on the dissertation subject, a summary in English, and ten annexes. The research problem is formulated in the introduction, the object and relevance of the work are described, the aim and objectives of the work, research methodology, scientific novelty and scientific significance of the work results, the defended statements, and the structure of the work are presented. The first chapter provides an overview of scientific works related to the topic of the thesis. Characteristics of dolomite and granite rocks are described. Minerals are examined as well as the extraction and production of aggregates used in the road construction. The properties of the aggregate its influence on the asphalt mixture and regulations are summarized. The design process of asphalt mixtures is detailed, and the skid resistance to the surface dressing is presented. The technology of the production of the dolomite aggregate of multiple crushing technology is detailed. The results of the research of physical and mechanical properties of multiple crushing technology dolomite aggregates, performed under the developed experimental research plan and sequences, are presented. The results of an experimental specific study of the skid resistance of Lithuanian road surface of multiple crushing dolomite aggregate are presented. In the third chapter, the physical and mechanical properties of the multiple crushing technology dolomite aggregate in comparison to the granite aggregate are evaluated based on the results of the experimental study. The change of the values during the first five years of operation of the skid resistance of road surfacing with the multiple crushing technology dolomite aggregate was estimated. Theoretical calculation of the economic effect of asphalt mixtures made using the multiple crushing technology dolomite aggregate was performed. On the topic of the dissertation, 7 scientific articles were published: 1 – in the scientific journal included in the *Clarivate Analytics Web of Science*, 2 – in the *Clarivate Analytics Proceedings* database publications, 4 – in the material of the scientific conferences.

Sąvokos

Aktyvintieji mineraliniai milteliai (angl. *Activated Mineral Powder*) – karbonatinės uolienos, sumaltos kartu su paviršių aktyvinančių medžiagų ir bitumo mišiniu, dalelės, kurių daugiau kaip 70 % yra smulkesnės nei 0,063 mm.

Asfalto mišinys (angl. *Asphalt Mixture*) – bituminis mišinys, susidedantis iš mikroužpildo, smulkiojo bei stambiojo užpildo ir bituminio rišiklio. Prireikus gali būti dedama priedų.

Asfalto viršutinis sluoksnis (angl. *Road Surface*) – šiam sluoksniui įrengti naudojamas skaldos ir mastikos asfaltas arba asfaltbetonis, arba mastikos asfaltas, arba poringasis asfaltas.

Atsparumas slydimui (angl. *Skid Resistance*) – kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui rodiklis.

Atsparumas smūgiams (*SZ*) (angl. *Impact Value*) – vertė *SZ*, išmatuojanti užpildų atsparumą dinaminiam gniuždymui, yra lygi penktadaliui bandomo mėginio, einančio per penkis nurodytus bandymo sietus, masės koeficientų sumos, kai bandoma pagal 6 dalį (EN 1097-2).

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

Dolomitas (angl. *Dolomite*) – karbonatų klasės mineralas, kalcio magnio karbonatas $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Dolomito užpildas (angl. *Dolomite Aggregate*) – užpildas, pagamintas naudojant daugkartinio trupinimo technologija ir kurio atsparumo smūgiams rodiklis (*SZ*) yra mažesnis arba lygus 18 %.

Fizikinės savybės (angl. *Physical Properties*) – medžiagų santykį su fizikiniais procesais apibūdinančios savybės.

Gamtinis užpildas (angl. *Natural Aggregate*) – gamtoje randama mineralinė medžiaga, išgauta tik mechaninio perdirbimo būdu. Gamtiniam užpildui priskiriamas žvyras, smėlis, skaldytas žvirgždas ir žvyras, akmenis ir uolienos skalda ir kt.

Granitas (angl. *Granite*) – magminių intruzinių uolienų grupė.

Ilgamžiškumas (angl. *Durability*) – medžiagos ir/ar konstrukcijos savybė išlikti nepakitusia ilgą laiką.

Kategorija (angl. *Category*) – užpildo savybės lygis, išreikštas verčių intervalu arba ribine verte. Tarp skirtingų savybių kategorijų nėra jokios tarpusavio priklausomybės.

Mechaninės savybės (angl. *Mechanical Properties*) – medžiagų atsparumą, deformavimą ir irimą apibūdinančios savybės.

Mikroužpildas (angl. *Filler*) – užpildas, kurio didžioji dalis prabyra pro 0,063 mm akučių dydžio sieta.

Naudingosios iškasenos (angl. *Minerals*) – tai žemės gelmėse esančių natūralių organinių ar neorganinių medžiagų sandėliai, pvz., energetinis kuras, metalų rūdos, pramonei ir statybai naudojamos naudingosios iškasenos, išskyrus vandenį.

Paviršiaus apdaras (angl. *Surface Dressing*) – dangos paviršiaus apdaras plonu sluoksniu, susidedančiu iš ne mažiau kaip vieno rišiklio sluoksnio ir vieno skaldelės sluoksnio.

Užpildas (angl. *Aggregate*) – grūdelių pavidalo medžiaga, naudojama statyboje. Užpildas gali būti gamtinis (natūralus), dirbtinis arba perdirbtas.

Užpildų mišinys (angl. *Aggregate Mixture*) – stambiojo ir smulkiojo užpildų mišinys. Mišinys gali būti pagamintas neatskiriant smulkiojo ir stambiojo užpildų frakcijų arba sumaišius stambųjį ir smulkųjį užpildus.

Žymėjimai

Santrumpos

AC 11 VS – asfaltbetonis, skirtas asfalto viršutiniams sluoksniams, veikiamiems sunkiąja apkrova, kurio užpildo viršutinio sieto akutės dydis yra 11 mm;

CEN – *European Committee for Standardization* (Europos standartizacijos komitetas);

$D_{(P)}$ – dolomito užpildas, pagamintas iš Lietuvos Respublikoje telkinyje Petrašiūnai 2 išgautos dolomito uolienos nenaudojant daugkartinio trupinimo technologijos ir kurio atsparumo smūgiams rodiklis (SZ) yra mažesnis arba lygus 22 %;

$D_{(S)}$ – panaudotas $D_{(I-III)}$ dolomito užpildas ekonominiam efektui skaičiuoti;

DL – AB „Dolomitas“ laboratorija;

$D_{(I-III)}$ – dolomito užpildas, pagamintas iš Lietuvos Respublikoje telkinyje Petrašiūnai 2 išgautos dolomito uolienos naudojant daugkartinio trupinimo technologiją ir kurio atsparumo smūgiams rodiklis (SZ) yra mažesnis arba lygus 18 %;

$D_{(IV)} - D_{(I-III)}$ dolomito užpildas, panaudotas automobilių kelio viršutinėje dangoje;

ES – Europos Sąjunga;

$G_{(I)}$ – granito užpildas, pagamintas Baltarusijos Respublikoje;

$G_{(II)}$ – granito užpildas, pagamintas Norvegijos Karalystėje;

$G_{(III)}$ – granito užpildas, pagamintas Ukrainos Respublikoje;

$G_{(IV)} - G_{(I-III)}$ granito užpildas, panaudotas automobilių kelio viršutinėje dangoje;

IT ASFALTAS 08 – Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės;

KPT SDK 19 – Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės;

LAKIS – Lietuvos automobilių kelių informacijos sistemos duomenų bazė;

MA – mineraliniai milteliai (aktyvintieji);

MD – mikroužpildas (dolomito);

SMA 11 S – skaldos ir mastikos asfaltas, skirtas sluoksniams, veikiamiems sunkiaja apkrova, kurio užpildų viršutinio sieto akutės dydis yra 11 mm;

Suminis VMPEI – suma VMPEI aut./parą nuo asfalto dangos viršutinio sluoksniu įrengimo iki natūrinio tyrimo automobilių kelio viršutinėje dangoje atlikimo;

TRA ASFALTAS 08 – Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas;

TRA BITUMAS 08/14 – Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašas;

TRA UŽPILDAI 19 – Automobilių kelių užpildų techninių reikalavimų aprašas;

UEPG – *European Aggregates Association* (Europos užpildų asociacija);

VILNIUS TECH AIF KTI – VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo institutas;

VILNIUS TECH AIF KTI AKML – VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo instituto Automobilių kelių mokslo laboratorija;

VMPEI – vidutinis metinis paros eismo intensyvumas aut./parą.

Simboliai

A_N – atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų;

F – atsparumas šaldymui ir atšildymui, %;

FI – formos rodiklis, %;

LA – atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas);

LT – Lietuvos Respublikos kodas;

LV – Latvijos Respublikos kodas;

M_{DE} – atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas);

PL – Lenkijos Respublikos kodas;

PSV – atsparumas poliravimui;

SI – plokštumo rodiklis, %;

SZ – atsparumas smūgiams, %.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	5
1. UŽPILDŲ SAVYBIŲ MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	7
1.1. Gamtinių išteklių samprata	7
1.2. Dolomito ir granito charakteristikos.....	10
1.2.1. Uolienuų klasifikacija	10
1.2.2. Dolomito ir granito uolienuų charakteristikos.....	11
1.3. Kelių tiesybos naudingosios iškasenos, užpildų gavyba ir gamyba.....	13
1.3.1. Užpildų gavyba	14
1.3.2. Užpildų gamybos technologijos	15

1.4. Užpildo įtaka automobilių kelio viršutinės dangos mišinių funkcionalumui...	18
1.4.1. Užpildo, naudojamo asfalto mišiniuose, savybės.....	18
1.4.2. Užpildo savybės ir jas reglamentuojantys normatyviniai techniniai dokumentai	21
1.4.3. Užpildo įtaką automobilių kelio viršutinės dangos mišinio elgsenai ...	27
1.5. Asfalto mišinių projektavimas	28
1.6. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumas slydimui	32
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	35
 2. DOLOMITO UŽPILDŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	37
2.1. Daugkartinio trūpinimo dolomito užpildo gamyba.....	37
2.2. Eksperimentinių tyrimų objektas ir metodai.....	39
2.3. Užpildų fizikinių ir mechaninių savybių eksperimentinis tyrimas	46
2.4. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui tyrimas.....	55
2.4.1. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui matavimai .	55
2.4.2. Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo pokyčio analizė.....	60
2.5. Antrojo skyriaus išvados	64
 3. DOLOMITO UŽPILDO, PANAUDOTO AUTOMOBILIŲ KELIO VIRŠUTINĖJE DANGOJE, VERTINIMAS.....	67
3.1. Daugkartinio trūpinimo dolomito užpildo fizikinių ir mechaninių savybių vertinimas.....	67
3.2. Daugkartinio trūpinimo dolomito užpildo automobilių kelio viršutinėje dangoje vertinimas	71
3.3. Daugkartinio trūpinimo dolomito užpildo mišinių, naudojamų asfalto mišiniuose, ekonominis efektas.....	77
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	82
 BENDROSIOS IŠVADOS	85
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	87
 AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	99
 SUMMARY IN ENGLISH.....	101
 PRIEDAI ¹	117
A priedas. Eksperimentinių tyrimų metodika ir įranga	123
B priedas. Užpildų fizikinių ir mechaninių savybių eksperimentinio tyrimo bendrieji, statistiniai rezultatai.....	136
C priedas. Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo duomenys	148
D priedas. Kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui matavimų grafikai.....	150

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

E priedas. Kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui matavimų skaitinių charakteristikų histogramos	156
F priedas. Užpildų faktinių savybių ir normatyvinių techninių dokumentų reikalavimų lyginamosios analizės grafiniai rezultatai	160
G priedas. Užpildų kainos	163
H priedas. Disertacijos autorės sąžiningumo deklaracija	164
I priedas. Bendraa autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	165
J priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	171

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation.....	1
Relevance of the thesis	1
Object of the thesis	2
Aim of the thesis.....	2
Tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis.....	3
Practical value of the research findings	4
Defended statements.....	4
Approval of the research findings.....	4
The structure of the thesis.....	5
Acknowledgements	5
 1. ANALYSIS OF SCIENTIFIC RESEARCH ON THE PROPERTIES OF AGGREGATES	 7
1.1. Natural resources concept.....	7
1.2. Classification of the rocks and characteristics of dolomite and granite	10
1.2.1. Classification of the rocks	10
1.2.2. Characteristics of dolomite and granite rocks	11
1.3. Materials for road construction and the extraction and manufacturing of aggregates	 13

1.3.1. Extraction of aggregates	14
1.3.2. Manufacturing of aggregates	15
1.4. Properties of the aggregates used in pavement construction, regulations and influence on the asphalt mixture.....	18
1.4.1. Properties of the aggregates used in pavement construction	18
1.4.2. Regulatory documents governing the properties of aggregates.....	21
1.4.3. Influence of the aggregate mixture on the behaviour of the asphalt mixture	27
1.5. Design of the asphalt mixtures	28
1.6. Wheel adhesion to the pavement surface.....	32
1.7. First chapter conclusions, tasks formulation of the thesis.....	35
 2. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF DOLOMITE AGGREGATES	37
2.1. Manufacturing the multiple technology dolomite aggregate	37
2.2. Object and methods of the experimental research	39
2.3. Experimental research on the physical and mechanical properties of aggregates	46
2.4. Research of skid resistance in the automobile road surfacing	55
2.4.1. Research of skid resistance in the automobile road surfacing	55
2.4.2. Annual average daily traffic analysis	60
2.5. Second chapter conclusions	64
 3. EVALUATION OF THE SUITABILITY OF DOLOMITE AGGREGATE IN THE AUTOMOBILE ROAD SURFACING	67
3.1. Evaluation of physical and mechanical properties of multiple crushing dolomite aggregate.....	67
3.2. Evaluation of skid resistance of multiple crushing dolomite aggregate and automobile road surfacing.....	71
3.3. Economic effect of asphalt mixtures used in multiple crushing dolomite aggregate mixtures	77
3.4. Third chapter conclusions.....	82
 GENERAL CONCLUSIONS	85
 REFERENCES	87
 THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	101
 SUMMARY IN ENGLISH.....	103
 ANNEXES ²	119
Annex A. Methods and equipment for the experimental research	123

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Annex B. General and statistical results of the experimental research on the physical and mechanical properties of aggregates	136
Annex C. Annual average daily traffic data	148
Annex D. Diagrams of measurements of wheel adhesion to the surface	150
Annex E. Histograms of numerical characteristics of the skid resistance measurements.....	156
Annex F. Graphical results of a comparative analysis of the actual properties of aggregates and requirements of the regulatory documents	160
Annex G. Prices of the aggregates.....	163
Annex H. Declaration of academic integrity	164
Annex I. Agreements of co-authors to provide published material in the doctoral dissertation	165
Annex J. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	171

Ivadas

Problemos formulavimas

Europos Sąjungos (ES) automobilių kelių tinklas apima daugiau kaip 4,8 mln. km, iš jų daugiau kaip 85 tūkst. km Lietuvoje, 73 tūkst. km Latvijoje ir 300 tūkst. km Lenkijoje. Šis tinklas yra nuolat prižiūrimas, atnaujinamas ir plečiamas, siekiant užtikrinti eismo saugumą ir ekonominę naudą. Didžiąją šių darbų sąnaudų dalį sudaro importuojamos kelių tiesimo medžiagos, todėl aktualu naudoti vietoje gaminamus užpildus. Lietuvos automobilių kelio viršutinėje dangoje dažniausiai naudojamas granito užpildas. Kadangi dolomitas, kaip vietinė uoliena, yra visuotinai žinoma kaip medžiaga, kuri nėra tinkama naudoti automobilio kelio viršutinėje dangoje, tai būtent, naudojant daugkartinio trupinimo technologija ir galima pagaminti ne daug metų žinomų savybių dolomito užpildą, o užpildą, kurio fizinės ir mechaninės savybės tolygios granito užpildo savybėms. Kadangi sistemingų šio užpildo tyrimų ir detalaus jų vertinimo nėra, todėl svarbu atlikti tyrimus ir nustatyti fizikinių ir mechaninių savybių sklaidą bei atlikti jų vertinimą granito užpildo atžvilgiu. Taip pat svarbu atlikti keletą metų eksploatuotų dangų paviršiaus atsparumo slydimo tyrimus ir įvertinti dolomito užpildo tinkamumą.

Darbo aktualumas

Siekiant mažinti kelių tiesybos sąnaudas ir racionaliai naudoti vietinius gamtinius išteklius, būtina ieškoti būdų ir metodų, kad pakeisti kitose šalyse pagamintus užpildus vietoje pagamintais, bet atitinkančiais automobilių kelio dangos viršutinio sluoksnio reikalavimus.

Lietuvoje perdirbus dolomito uolieną į užpildus, naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, gaminamas dolomito užpildas, kuris panaudotas automobilių kelio viršutinėje dangoje. Taip pat svarbu pažymėti, kad iki šiol moksliniuose darbuose neaprašyta minėto užpildo gamybos technologija, netirta ir nevertinta, ar, naudojant šį užpildą automobilių kelio viršutinėje dangoje (asfaltbetonis, skaldos ir mastikos asfaltas bei paviršiaus apdaras), kelerius metus eksploatavus dangą, jos paviršius bus atsparus slydimui.

Parengtas eksperimentinio tyrimo planas, kuriuo vadovaujantis tirtos, o po to vertintos, daugkartinio trupinimo dolomito užpildo fizikinės, mechaninės savybės ir automobilių kelio viršutinės dangos paviršiaus atsparumas slydimui.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – dolomito užpildo, pagaminto taikant daugkartinį trupinimą, fizikinių ir mechaninių savybių verčių pasiskirstymas bei automobilių kelio viršutinės dangos paviršiaus atsparumo slydimui kitimas eksploatuojant kelio dangą.

Darbo tikslas

Įvertinti dolomito užpildo, gaminamo taikant daugkartinio trupinimo technologiją, panaudojimo galimybes automobilių kelio viršutinėje dangoje.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinius tyrimus ir normatyvinius techninius dokumentus, reglamentuojančius automobilių kelio viršutinės dangos užpildų gamybos technologijas ir reikalavimus bei užpildo įtakos automobilių kelio viršutinės dangos funkcionavimui tematika.
2. Eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais nustatyti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikines, mechanines savybes ir įvertinti mechaninių savybių lygiavertiškumą, lyginant su dolomito užpildu, pagamintu nenaudojant daugkartinio trupinimo technologijos.

3. Įvertinti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikinių ir mechaninių savybių lygiavertiškumą, lyginant su kitų rūšių užpildu, bei nustatyti galimybes jį taikyti automobilių kelio viršutinės dangos, kurią veikia sunkusis transportas, konstrukcijoje.
4. Atlikus natūrinius tyrimus Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose kelio dangos konstrukcijos viršutinis sluoksnis ir paviršiaus apdaras įrengti su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, įvertinti dangos paviršiaus atsparumo slydimui kitimą kelio dangos eksploatacijos metu.
5. Apskaičiuoti dolomito užpildo, naudojimo kelio dangos konstrukcijos viršutinių sluoksnių asfalto mišiniams gaminti, galimą ekonominį efektą.

Tyrimų metodika

Disertacijos tikslo pasiekimui buvo taikyti užpildų fizikinių ir mechaninių savybių nustatymo tyrimo metodai: atsparumo dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas), atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas), atsparumo smūgiams, dalelių tankio, atsparumo poliravimui, atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų padangų, atsparumo šaldymui ir atšildymui bei automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui metodas. Taip pat buvo panaudoti matematinės statistikos metodai ir analizė ekonominio efekto apskaičiavimui.

Darbo mokslinis naujumas

Parengus disertaciją, gauti šie nauji statybos inžinerijos mokslui reikšmingi rezultatai:

1. Nustatytos dolomito užpildo fizikinių ir mechaninių savybių vertės, lyginant su granito užpildo vertėmis, yra lygiavertės ir užpildas gali būti naudojamas automobilių kelio viršutinės dangos, kurią veikia sunkusis transportas, konstrukcijoje.
2. Atlikus natūrinius tyrimus Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose automobilių kelio viršutinis dangos sluoksnis įrengtas iš asfalto mišinio su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją nustatyta, kad dangos paviršiaus atsparumo slydimui vertės, per pirmuosius penkerius kelio eksploatacijos metus, sumažėjo ne daugiau kaip 15 % nuo pradinės vertės.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Taikant daugkartinio trupinimo dolomito užpildo gamybos technologijoje, užtikrinamos užpildo fizikinės ir mechaninės savybės, atitinkančios sunkiojo transporto apkrovai skirtų asfalto mišinių normatyvinius techninius reikalavimus. Naudojant šį dolomito užpildą automobilių kelio viršutinėje dangoje, dangos paviršiaus atsparumo slydimui vertės per pirmuosius penkerius metus sumažėja ne daugiau kaip 15 % nuo pradinės vertės. Galimas iki 10 % ekonominis efektas, gaminant automobilių kelio viršutinės dangos asfalto mišinius su šiuo dolomito užpildu.

Ginamieji teiginiai

1. Dolomito užpildas, pagamintas naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, tenkina užpildo fizikines ir mechanines savybes, atitinkančias sunkiosios transporto apkrovos automobilių kelio viršutinės dangos normatyvinius techninius reikalavimus.
2. Automobilių kelio viršutinės dangos su dolomito užpildu, pagamintu taikant daugkartinį trupinimą, dangos paviršiaus atsparumo slydimui vertės per pirmuosius 5-erius metus sumažėja ne daugiau kaip 15 % nuo pradinės vertės.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti 7 moksliniai straipsniai: 1 – mokslo žurnale, įtraukta į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę (Šneideraitienė ir Žilionienė, 2020), 2 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėse (Šernas et al., 2016; Vorobjovas et al., 2017), 4 – kituose recenzuojamose tarptautinių ir respublikinių konferencijų leidiniuose (Šneideraitienė et al., 2016; Šneideraitienė ir Žilionienė, 2017, 2018, 2019).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti devyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2016 m., 2018 m., 2019 m., 2020 m., Vilnius, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport Research Arena TRA 2016*“ 2016 m., Varšuva, Lenkija;
- Tarptautinėje konferencijoje AIIT „*International Congress on Transport Infrastructure and Systems*“ 2017 m., Roma, Italija;

- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2017 m., Vilnius, Lietuva;
- Tarptautinėje konferencijoje „*XXIX International Baltic Road Conference*“ 2017 m., Talinas, Estija;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Regiono konkurencingumo kaitos tendencijos*“ 2019 m., Šiauliai, Lietuva.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūra ir šaltiniai, autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santrauka anglų kalba, dešimt priedų.

Šio mokslinio darbo apimtis – 119 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 5 numeruotos formulės, 48 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 168 literatūros šaltiniai.

Padėka

Dėkoju mokslinei vadovei prof. dr. Daivai Žilionienei už vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus, visokeriopą pagalbą bei kantrybę.

Esu dėkinga prof. dr. Audriui Vaitkui už daug padėjusias mokslines konsultacijas bei įžvalgas, idėjas, pastabas dėl disertacijos rengimo, pasiūlymus imtis eksperimentinių tyrimų ir suteiktą galimybę atlikti tyrimus. Reiškiu padėką disertacijos ekspertams už taiklias pastabas ir komentarus. Taip pat tariau ačiū už visokeriopą palaikymą doktorantūros studijų metais VILNIUS TECH Kelių katedros ir Kelių tyrimo instituto Automobilių kelių mokslo laboratorijos kolegoms. Ne mažiau dėkinga jaučiuosi AB „Dolomitas“ valdybai už skirtą finansinę paramą doktorantūros studijoms, ypač p. Geraldui Statulevičiui, pastūmėjusiam imtis mokslinės veiklos. Nuoširdžiai dėkoju šeimai ir draugams už visokeriopą palaikymą, kantrybę, supratimą ir paskatinimą nesustoti sunkiausiais momentais studijuojant doktorantūroje.

Užpildų savybių mokslinių tyrimų analizė

Šiame skyriuje pristatyta gamtinių išteklių samprata. Klasifikuojant uolienas apibendrintos dolomito bei granito charakteristikos ir naudingosios iškasenos. Išanalizuota užpildų, naudojamų automobilių keliams tiesti, gavyba ir gamyba. Apibendrintos užpildų savybės, pateiktas jų reglamentavimas ir įtaka asfalto mišiniui. Apibendrinta asfalto mišinių projektavimo eiga ir kelio dangos paviršiaus atsparumas slydimui. Šio skyriaus medžiaga paskelbta vienoje autorės mokslinėje publikacijoje (Šneideraitienė *et al.*, 2016).

1.1. Gamtinių išteklių samprata

Arndt *et al.*, (2017); Hodler (2006); Klein *et al.*, (2018); Meinert *et al.*, (2016) ir Rees (2017) teigimu, gamtiniai ištekliai yra natūralios žmogaus aplinkos sudedamosios dalys, kurias jis naudoja savo poreikiams tenkinti. Kaip teigia Europos atliekų ir medžiagų centras (ETC-WMF), terminas „ištekliai“ siejamas ne su pačiu daiktu ar medžiaga, o su funkcija, kurią tas daiktas ar medžiaga gali atlikti (Moll *et al.*, 2003) (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Gamtiniai ištekliai ir jų funkcijos (Moll *et al.*, 2003)**Table 1.1.** Natural resources and their functions (Moll *et al.*, 2003)

Pavadinimas	Funkcijos
Kraštovaizdis	Rekreacijos
Genai, techninėms sistemoms sukurti naudojami gamtiniai pavyzdžiai	Informacijos
Visuotinis medžiagų ciklas, biomasės perdirbimas	Ciklo
Atsinaujinantys ir neatsinaujinantys ištekliai, naudojami gamybai	Šaltinio
Gamtiniai ištekliai, sugeriantys atliekas ir teršalus	Kenksminimo šalinimo

Analizuojant 1.1 lentelėje pateiktus gamtinius išteklius pagal jų funkcijas, nustatyta, kad atsinaujinantys ir neatsinaujinantys ištekliai, naudojami gamybai turi šaltinio funkciją.

Vadovaujantis Europos Bendrijos nuostatomis (CEC, 2002), gamtiniai ištekliai skirstomi į penkias kategorijas. Šie ištekliai klasifikuojami atsižvelgiant į jų prigimtį ir atsinaujinimą (Moll *et al.*, 2005) (1.2 lentelė).

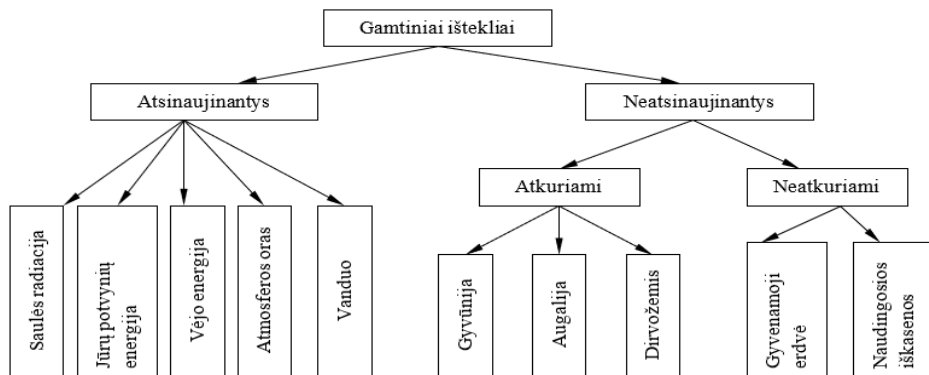
1.2 lentelė. Išteklių kategorijos pagal prigimtį ir atsinaujinimą (Moll *et al.*, 2005)**Table 1.2.** Resource categories by nature and update (Moll *et al.*, 2005)

Išteklių kategorijos	Išteklių prigimtis ir atsinaujinimas
I. Pastovūs	Vėjas, šviesa
II. Nepastovūs atsinaujinantys	Biologiniai ištekliai, įskaitant ir biologinę įvairovę; pažeidžiami ištekliai – tai derlingas dirvožemis ir gėlas vanduo.
III. Neatsinaujinantys, pastovūs	Metalai ir mineralai – pastovūs ištekliai, tačiau jie gali atsinaujinti, pavyzdžiui, perlydant metalus. Toks atsinaujinimas reikalauja daug energijos.
IV. Neatsikuriantys, nepastovūs	Metalai ir mineralai
V. Erdvės	Apibrėžtas plotas, kurio reikia tam, kad atsirastų išteklių. Pavyzdžiui, energijos ištekliams reikalingi saulės ir vėjo parkai, žemės ūkio bei miškų plotai, apimantys ir biologinę įvairovę. Visa tai siejama su žmogaus veikla, kuri glaudžiai susijusi su šių arba atitinkamų išteklių naudojimu.

Remiantis 1.2 lentelėje pateiktomis išteklių kategorijomis, viena iš išteklių kategorijų yra mineralai. Svarbu pažymėti, kad jie yra neatsikuriantys ištekliai.

Analizuojant Mollo *et al.*, (2003) ir išteklių srautų analizės metodiką (EEA, 2001), nustatyta, kad gamtiniai ištekliai suskirstyti į vietinius (šalies) ir bendruosius, taip pat į paslėptus ir tiesioginius.

Mokslininkai Mališauskas (1993) ir Moll *et al.*, (2005) išskyrė dvi gamtinių išteklių kategorijas: atsinaujinančius ir neatsinaujinančius išteklius (1.1 pav.).

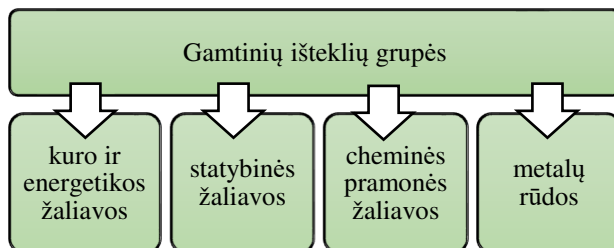


1.1 pav. Gamtiniai ištekliai (Mališauskas, 1993; Moll *et al.*, 2005)

Fig. 1.1. The natural resources (Mališauskas, 1993; Moll *et al.*, 2005)

Analizuojant 1.1 paveikslą nustatyta, kad naudingosios iškasenos, tai vienas iš neatkuriamų ir neatsinaujinančių gamtinių išteklių, todėl galime teigti, kad jų naudojimas turi būti racionalus.

Grybauskienė (2008) suskirstė gamtinius išteklius į grupes, atsižvelgdama į jų naudojimo paskirtį (1.2 pav.).



1.2 pav. Gamtinių išteklių grupės pagal naudojimo paskirtį (Grybauskienė, 2008)

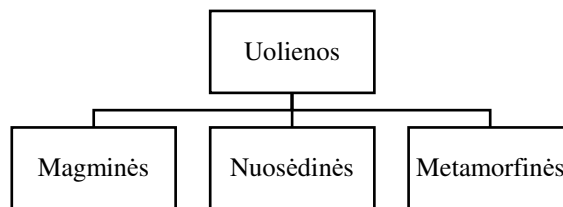
Fig. 1.2. Groups of natural resources by purpose of use (Grybauskienė, 2008)

Kaip matyti iš 1.2 paveiksle pateiktų gamtinių išteklių grupių, skirstomu pagal naudojimo paskirtį, statybinės žaliavos yra viena iš gamtinių išteklių grupių. Svarbu pažymėti, kad šios žaliavos skirtos kelių tiesybai, susisiekimo komunikacijų statybai, pastatų statybai. Atsižvelgiant į tai, galime teigti, kad gamtinių išteklių naudojimo kelių tiesyboje klausimas yra aktualus.

1.2. Dolomito ir granito charakteristikos

1.2.1. Uolienų klasifikacija

Dickmann (2015) klasifikavo uolienas pagal jų susidarymo sąlygas per atitinkamą laikotarpį. Mokslininkų Mukherje (2011) ir Schön (2015) teigimu, uolienos skirstomos pagal pradinę medžiagą, iš kurios jos susidarė, veikiant įvairiems procesams. Atsižvelgiant į tai išskirtos trys pagrindinės uolienų grupės: magminės, nuosėdinės ir metamorfinės (1.3 pav.).



1.3 pav. Uolienų klasifikacija pagal genetinę kilmę (Mukherje, 2011; Pellant & Pellant, 2014; Schön, 2015)

Fig. 1.3. Classification of rocks by genetic origin (Mukherje & 2011; Pellant & Pellant, 2014; Schön, 2015)

Pateiktos 1.3 paveiksle uolienos įvairiose pramonės šakose klasifikuojamos išskiriant būdingiausius ir atitinkamai pramonės šakai reikalingiausius požymius. Pavyzdžiui, statybinių medžiagų pramonėje pagal mechanines, fizikines savybes, gavimos būdus bei naudojimą (Markner, 2008; Mukherje, 2011; Ramukevičius, 2008; Skrinškas *et al.*, 2010; Olivares-Marín *et al.*, 2013). Vertinant šias savybes, sprendžiama, ar galima perdirbti uolienas ir kokiose srityse jos galėtų būti naudojamos (Labus *et al.*, 2016; Maras *et al.*, 2016).

Savo darbuose Olivares-Marín *et al.*, (2013); Ündül (2016); Viklander & Eigenbrod (2000) uolienas klasifikuoja į grupes, apibūdinančias mechanines bei fizikines savybes:

- tankį,
- stiprį gniuždant,
- tamprumo modulį,
- atsparumą šalčiui (šildymo ir šaldymo ciklai).

Fookes *et al.*, (1988) ir Ündül (2016) moksliniuose darbuose teigia, kad prie šių keturių pagrindinių savybių taip pat priskiriamas ir uolienos vandens įmirkis (W_{cm}). Schön (2015) pateikia fizikinius ir mechaninius uolienų rodiklius (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. Pagrindiniai uolienų fizikiniai ir mechaniniai rodikliai (Schön, 2015)**Table 1.3.** Basic physical and mechanical parameters of rocks (Schön, 2015)

Uolienos pavadinimas	Uolienos tankis, g/cm ³	Stipris gniuždant, MPa	Atsparumas šaldymui ir atšildymui, ciklai
Magminės:			
Gelminės:			
granitas	2,53–2,70	100–260	100–300
gabras	2,85–3,05	100–350	100–300
Išsiliejusios:			
porfyras	2,54–2,26	60–150	50–200
bazaltas	2,22–3,07	110–500	50–200
Metamorfinės:			
gneisas	2,00–2,50	10–200	25–200
kvarcitas	2,55–2,70	100–250	100–300
Nuosėdinės:			
karbonatinės	1,70–2,70	5–200	0–300
smiltainiai	2,00–2,50	10–250	15–300

Apžvelgiant 1.3 lentelėje pateiktus uolienų fizikinius ir mechaninius rodiklius, galime teigti, kad magminių uolienų tankis, g/cm³, stipris gniuždant, MPa, beveik pusantro karto didesnis už nuosėdinių karbonatinių uolienų.

Svarbu pažymėti, kad tiriant uolienas, naudojamas automobilių keliams tiesti, įvertinamas jų stiprumas: stipris gniuždant, atsparumas trūpinimui, smūgiams, atsparumo šaldymui ir atšildymui ciklų poveikiui, dėvėjimuisi ir poliravimui (tik viršutiniam dangos sluoksniui) (Erichsen, 2015; Wasilewska & Zimnoch, 2014).

1.2.2. Dolomito ir granito uolienų charakteristikos

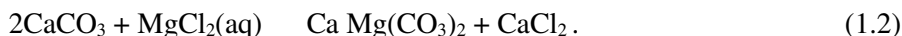
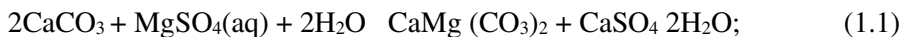
Analizuojant dolomito uolienos charakteristikas, nustatyta, kad mokslininkai vieningai nesutaria, kas yra dolomitas (Warren, 2000; Tucker & Wright, 2009). Dolomitu uoliena pavadinta prancūzų gamtininko ir geologo D. G. T. G. de Dolomieu garbei. Jis ištyrė Šiaurės Italijos kalnus, vėliau pavadintus dolomitinėmis Alpėmis (Bourrouilh-Le Jan, 2000). Svarbu pažymėti, kad dolomitas – tai nuosėdinė karbonatinė uoliena, sudaryta iš 95 % dolomito mineralo (CaMg(CO₃)₂). Likusią šios uolienos dalį sudaro kalcitas (CaCO₃), molio mineralai, anhidritas (CaSO₄), gipsas ir kitos priemaišos (Andrzejuk *et al.*, 2019; Warren, 2000). 1.4 lentelėje pateikti dolomitą sudarantys cheminiai elementai (Haritonovs *et al.*, 2012; Sauffi *et al.*, 2019).

1.4 lentelė. Dolomito cheminiai elementai (Haritonovs *et al.*, 2012; Sauffi *et al.*, 2019)

Table 1.4. The dolomite chemical elements (Haritonovs *et al.*, 2012; Sauffi *et al.*, 2019)

Cheminių elementų pavadinimas	CaO	MgO	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Cheminių elementų sudėtis, %	31,0	17,0	2,5	0,8	0,8	0,6	0,3

Kaip matyti iš 1.4 lentelėje pateiktų dolomito cheminių elementų, uolienoje vyrauja cheminiai elementai CaO ir MgO. Dolomito uolienos tankis yra nuo 2350 iki 2950 kg/m³, stipris – nuo 20 iki 100 MPa, o atsparumas šalčiui siekia daugiau negu 15 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Atsižvelgiant į dolomito susidarymo sąlygas, išskirtas pirminis ir antrinis dolomitas (Chilingar, 1960; Tucker & Wright 2009) (1.4 pav.). Pirminis dolomitas turi tuštumą, susidariusią ištirpus gipsui. Joje auga kalcito ir dolomito kristalai (1.1 formulė). Antrinis dolomitas susiformuoja vykstant diagenezei, kai nuosėdos virsta nuosėdinėmis uolienomis (1.2 formulė).



a)



b)



1.4 pav. Dolomitas pagal susidarymo sąlygas: a) pirminis dolomitas; b) antrinis dolomitas (Chilingar, 1960; Tucker & Wright, 2009)

Fig. 1.4. Dolomite under formation conditions: a) primary dolomite; b) secondary dolomite (Chilingar, 1960; Tucker & Wright, 2009)

Analizuojant granito uolienos charakteristikas, nustatyta, kad nors granitoidai yra labiausiai paplitusių uolienų rūšis, vis dėlto, atsižvelgiant į mineralų įvairovę, jie klasifikuojami skirtingai. Andrzejuk *et al.*, (2019); Frost *et al.*, (2001); Pearce (1996), Sousa, (2013), Ündül (2016) ir Whalen *et al.*, (1987) teigimu svarbu įvertinti petrografines granitoidų charakteristikas ir mechanines savybes. Andrzejuko *et al.*, (2019) ir Blatto *et al.*, (2006) teigimu, granito uolieną sudaro įvairūs cheminiai elementai, bet didžioji dalis yra kvarcas – SiO₂ kristalinis. Pellant, Pellant (2014) taip pat mano, kad granitas yra vienas kietiausių mineralų, nes stipris gniuždant siekia iki 300 MPa.

1.3. Kelių tiesybos naudingosios iškasenos, užpildų gavyba ir gamyba

Naudingosios iškasenos – tai žemės gelmėse slypinčios gamtinės medžiagos, kurias galima naudoti gamyboje ar kitoms reikmėms. Tokioms iškasenoms priskiriami angliavandeniliai, metalų rūdos, nemetalinės naudingosios iškasenos, vertingieji mineralai (Byerly *et al.*, 2017; Carmichael, 2017; Tarbuck *et al.*, 2005). Tiesiant kelius naudojamos naudingosios iškasenos turi atitikti reikalavimus, apibrėžiančius jų kilmę ir savybes: mechanines, fizikines (Jaeger *et al.*, 2009; Maras *et al.*, 2016).

Kaip teikia Grybauskienė (2008), Motuzas ir Staškus (2009), Lietuvoje yra visų geologinių sistemų nuogulų. Perdirbę jas galėtume naudoti statybos sektoriuje. Tačiau svarbiu ekonominiu veiksniu tampa jų slūgsojimo gylis. Šiuo metu Lietuvoje ištirta 17 naudingųjų iškasenų (Gasiūnienė, 2007; Skrinskas *et al.*, 2010; Sudonienė ir Atkocevičienė, 2013). Lietuvoje išsidėsčiusių naudingųjų iškasenų gavybos ir telkinių vietos, pateiktos 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Lietuvos Respublikos naudingųjų iškasenų gavybos vietų ir telkinių pasiskirstymo žemėlapis

Fig. 1.5. Map of the distribution of mineral extraction sites and reservoirs in the Republic of Lithuania

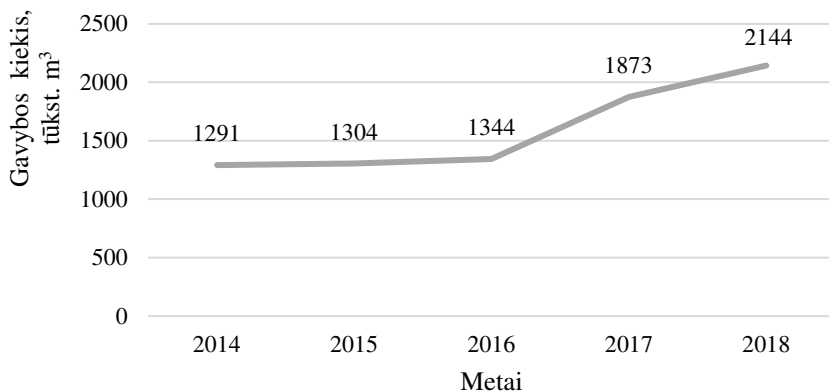
Kaip matyti 1.5 paveiksle keturi dolomito telkiniai aptinkami Lietuvoje. Čygo *et al.*, (2005) ir Skrinsko *et al.*, (2010) teigimu išanalizuotų duomenų apie naudingąsias iškasenas rezultatai rodo, jog Lietuvos teritorijoje nuo bendro eksploatuojamų telkinių skaičiaus dolomito uolienos telkiniai sudaro 0,9 proc.

Kaip teigia Čygas *et al.*, (2005), Gasiūnienė (2007), Patašova ir Jurgaitis (2008) bei Skrinškas *et al.*, (2010), svarbu apskaičiuoti išteklius ir juos tinkamai įvertinti, nes nuo jų priklauso ekonominė valstybės nepriklausomybė. Mokslininkų Čygo *et al.*, (2005); Kesler *et al.*, (2015), Sachs ir Warner (2001) ir Skrinško *et al.*, (2010) teigimu, išanalizavus, kiek išgaunama naudingųjų iškasenų išteklių, galima daryti išvadas apie šalies ekonominę būklę. Taip pat svarbu pažymėti, kad greitai augant kelių statybinių medžiagų kainoms, iškyla būtinybė ieškoti naujų galimybių naudoti pigesnes vietines medžiagas bei jų mišinius, tvarkant kelius, tiesiant gatves, atliekant rekonstravimo ir remonto darbus (Aavik, 2006; Čygas *et al.*, 2005; Gulevič *et al.*, 2010).

1.3.1. Užpildų gavyba

Daugiau kaip 50 % statybos sektoriaus išteklių pasaulyje sudaro perdirbta uoliena į užpildus (Langer, 2016; Van der Meulen *et al.*, 2003). Europos užpildų asociacijos (UEPG 2017) statistiniais duomenimis, gavybos apimtys ES ir EFTA šalyse skiriasi. Keturiuose Europos žemynui priklausančiose šalyse – Rusijoje, Lenkijoje, Vokietijoje ir Prancūzijoje – išgaunama apie 21 % visų Europos užpildų: Rusijoje – 8 %, Lenkijoje – 3 %, Vokietijoje – 6 %, Prancūzijoje – 5 %, Lietuvoje – 0,9 %.

2014–2018 m. Lietuvos dolomito gavybos kiekiai tūkst. m³ padidėjo daugiau kaip 10 % (1.6 pav.).



1.6 pav. Lietuvos dolomito gavybos kiekiai tūkst. m³ 2014–2018 m.
(Lietuvos geologijos tarnyba, 2020)

Fig. 1.6. Lithuanian dolomite mining volumes thous. m³ 2014–2018
(Lithuanian Geological Survey 2020)

Apžvelgiant 1.6 paveiksle pateiktus Lietuvos dolomito gavybos kiekius penkerių metų periodu, galime teigti, kad gavybos apimtys pastoviai didėja, bet tuo pačiu reikalingas ir racionalus vietinės uolienos panaudojimas.

Analizuojant mokslininkų Dagilienės ir Mykolaitienės, 2012; Gulevičs *et al.*, 2010; Haritonovs & Tihonovs, 2014; Karu *et al.*, 2015; Klizas *et al.*, 2015; Skriskas *et al.*, 2010 darbus, nustatyta, kad tiesiant kelius, ekonomiškai naudinga naudoti vietines uolienas, perdirbtas į užpildus, nes nebelieka 30 % įvežimo sąnaudų.

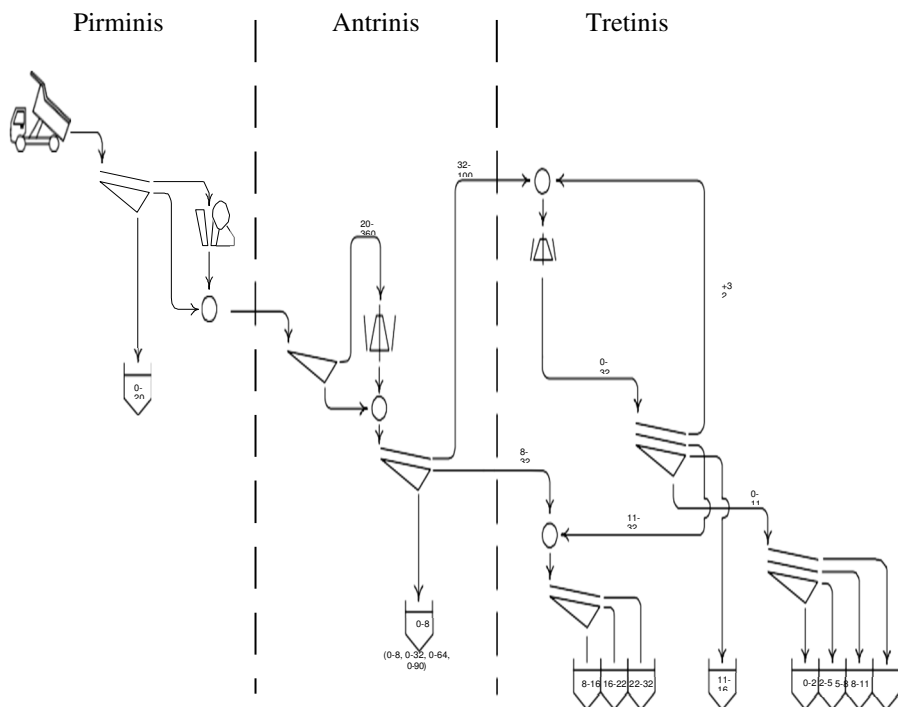
1.3.2. Užpildų gamybos technologijos

Analizuojant mokslininkų Erichsen *et al.*, (2008), Sun *et al.*, (2012) ir Van der Meulen *et al.*, (2003) darbus, nustatyta, kad statybos sektoriuje jaučiamas didelis natūralių ar susmulkintų užpildų poreikis, o, pasak Langer (2016), užpildai pranašoka kitus išteklius pasaulyje ne tiek išgaunamu kiekiu, kiek savo verte (milijonais eurų). Taip pat nustatyta, kad Lietuvoje kasmet sunaudojama 800 000–1 000 000 t ir daugiau granito užpildo. Smulkintas granitas arba granito žaliava įvežama į Lietuvą iš kaimyninių šalių: Ukrainos, Baltarusijos, Norvegijos, Švedijos (Bulevičius *et al.*, 2011; Dagilienė ir Mykolaitienė, 2012; Čygas *et al.*, 2008b; Skriskas *et al.*, 2010; Šernas *et al.*, 2014; Vaitkus ir Vorobjovas, 2015).

Užpildai, gaminami technologinėse linijose, perdirbant uolienas: granito, diabazo, gablo, bazalto, kvarcinio diorito, dolomito ir žvyro (Abuhasel, 2020; Adel *et al.*, 2006; Balasubramanian, 2017; Gupta *et al.*, 2016; Laciak *et al.*, 2013; Mikhail *et al.*, 2019; Vaitkus ir Vorobjovas, 2015; Wills & Finch, 2015). Vistik svarbu pažymėti, kad pagrindinė uolienos perdirbimo proceso dalis yra trupinimas. Trupinimas parenkamas, atsižvelgiant į uolienos petrografinę sudėtį ir tai, kokio stiprumo yra reikiamas gauti užpildas, taip pat į dydį, formą bei užpildo naudojimą (Balasubramanian, 2017; Holmberg *et al.*, 2017; Junevičius, 2012).

Ciežkowski *et al.*, (2017); Hafeez *et al.*, (2016) ir Mikhail *et al.*, (2019) atliko eksperimentinius užpildų tyrimus. Tirdami užpildus, jie trupino juos vienu, o po to, dviem etapais. Atlikę tyrimus nustatė, kad po dviejų trupinimo etapų pagerėjo mechaninės užpildų savybės. Svarbu pažymėti, kad didinant trupinimo etapų skaičių pagerėjo užpildo mechaninės savybės.

Anot Gupta *et al.*, (2016); Holmberg *et al.*, (2017), Wills ir Finch (2015) asfalto mišinių užpildų gamybos procesas – trijų etapų užpildų trupinimas. Svarbu pažymėti, kad savo darbuose minėti mokslininkai pateikė trijų etapų užpildų technologinę schemą (1.7 pav.).

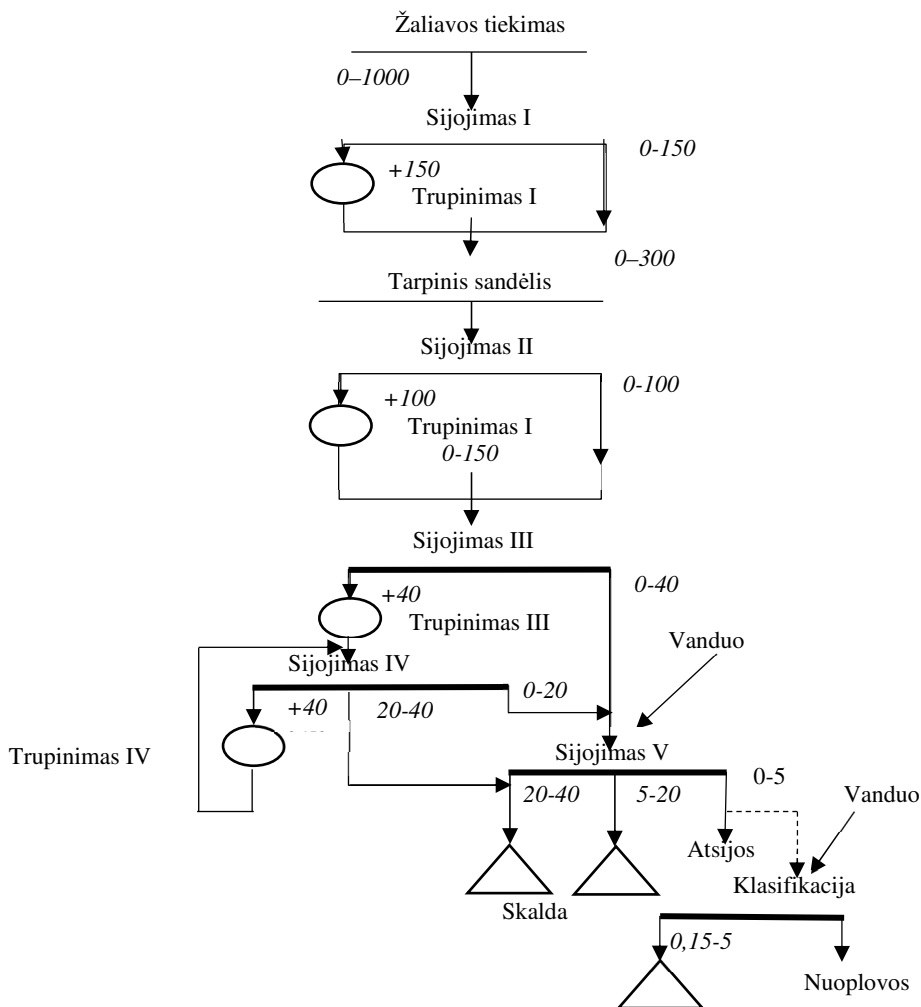


1.7 pav. Trijų etapų užpildų technologinė schema (Gupta *et al.*, 2016; Holmberg *et al.*, 2017; Wills & Finch, 2015)

Fig. 1.7. Technological scheme of three-stage aggregate (Gupta *et al.*, 2016; Holmberg *et al.*, 2017; Wills & Finch, 2015)

1.7 paveiksle pateiktame pirminiame etape pagamintas užpildas vibraciniu sijotuvu suskirstomas į dvi dalis: 0–20 mm ir 20–360 mm. Gautas 0–20 mm dydžio užpildas toliau neperdirbamas, o 20–360 mm dydžio dalelės transporteriu gabenamos į antrinį etapą. Šiame etape jos trupinamos ir vibraciniu sijotuvu suskirstomos dar į tris dalis: 0–8 mm, 8–32 mm ir 32–100 mm. Tada didesnės nei 8 mm dalelės transportuojamos į tretinį etapą, jame trupinamos ir vibraciniu sijotuvu suskirstomos į užpildus, kurių dalelių dydis nuo 0–2 mm iki 16–32 mm ir jos naudojamos gaminant asfaltą ir betoną.

Mokslininkai Deltuva ir Vaitkevičius, (2006) savo darbuose aprašė keturių laipsnių trupinimo granito užpildo gamybos technologiją (1.8 pav.). Svarbu pažymėti, kad analizuojant minėtų mokslininkų darbus, nustatyta, kad užpildų gamybai iš nevienodo stiprumo uolienų (silpnų padermių uolienų), mokslininkai rekomenduoja užpildų gamybai naudoti dvi atskiras technologines linijas – viena stipresnėms uolienoms, o kita silpnesnėms



1.8 pav. Granito užpildo gamybos technologinė schema
(Deltuva ir Vaitkevičius, 2006)

Fig. 1.8. Technological scheme of granite aggregate production
(Deltuva & Vaitkevičius, 2006)

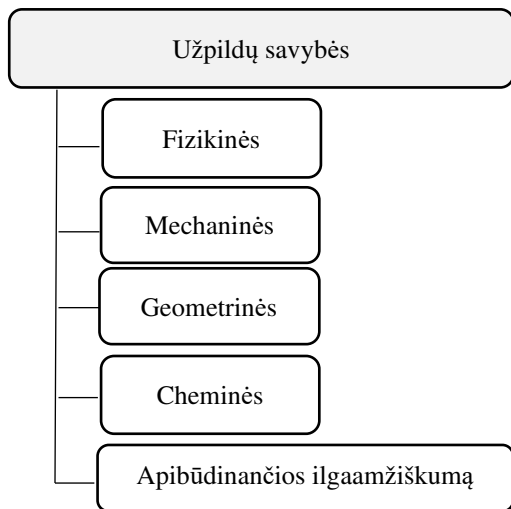
Kaip matyti iš 1.8 paveiksle pateiktos granito užpildo gamybos technologinės schemos, granito žaliava perdirbama keturiais trupinimo etapais. Skirstymas sutrupintos uolienos į užpildus, kurių dydis $0-5$ mm, $5-20$ mm ir $20-40$ mm vykdomas naudojant sijotuvus, o užpildo švarumui užtikrinti, užpildai plaunami.

Atlikus užpildų gamybos mokslinės literatūros analizę nustatyta, kad automobilių kelio viršutinės dangos mišiniams gaminti, technologinės schemos parenkamos atsižvelgiant į uolienu stiprumą, taip pat nustatyta, kad uolienos trupinimo etapų turi būti ne mažiau kaip trys.

1.4. Užpildo įtaka automobilių kelio viršutinės dangos mišinių funkcionalumui

1.4.1. Užpildo, naudojamo asfalto mišiniuose, savybės

Išanalizavus užpildų, naudojamų asfalto mišiniuose, savybes nustatyta, kad mokslininkai juos suskirstė į 5 grupes (1.9 pav.).



1.9 pav. Užpildų savybės (Deltuva ir Vaitkevičius, 2006)

Fig. 1.9. Properties of aggregates (Deltuva & Vaitkevičius, 2006)

Atsižvelgiant į 1.9 paveiksle pateiktų užpildų savybių: fizikinių, mechaninių, geometrinių, cheminių, apibūdinančių ilgaamžiškumą, suskirstymą, toliau pateikiama kiekvienos grupės mokslinės literatūros analizė. Remiantis Ramukevičiaus (2008), Schön (2015) ir Wasilewska (2014) tyrimais, užpildų fizikinių savybių apibūdinimas pateiktas 1.5 lentelėje. Svarbu pažymėti, kad prie medžiagų, kurios naudojamos kelių tiesimui, svarbiausių fizikinių savybių, priskiriamas tankis (natūralusis, savitasis), porėtumas, vandens įgertis, plastiškumas (Schön, 2015; Wasilewska *et.al.*, 2018).

1.5 lentelė. Užpildų fizikinių savybių apibūdinimas (Ramukevičius, 2008; Schön, 2015; Wasilewska, 2014)

Table 1.5. Description of physical properties of aggregates (Ramukevičius, 2008; Schön, 2015; Wasilewska, 2014)

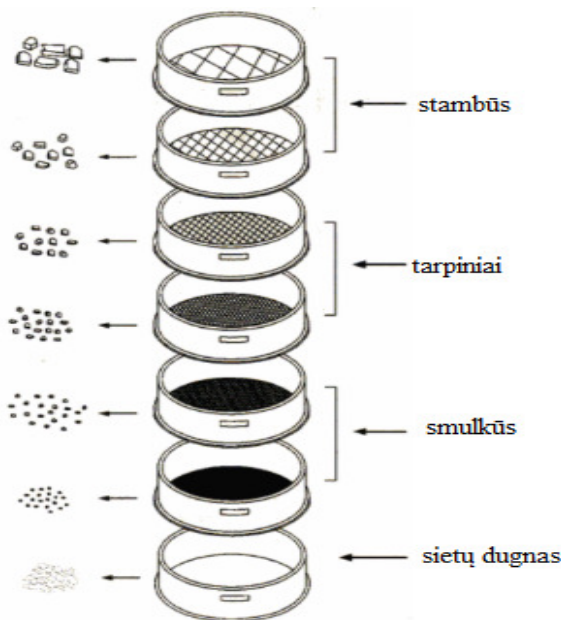
Fizikinės savybės	Apibūdinimas
Tankis	Natūralios būsenos medžiagos tūrio vieneto masė, išreiškiamą visiškai sausos medžiagos masės ir tūrio santykiu.
Piltinis tankis	Tankis, išreikštas laisvai supiltos medžiagos masės ir indo tūrio santykiu.
Savitasis tankis	Visiškai tankios medžiagos kietosios fazės tūrio vieneto masė.
Poringumas (akytumas)	Porų, tuštumų tūrio ir visos medžiagos tūrio santykis.
Tuštymėtumas	Biriosios medžiagos tuštumų, esančių tarp dalelių, tūrio ir viso jos tūrio santykis.
Įmirkis	Savybė sugerti skystį ir jį sulaikyti.
Drėgnis	Skysčio (vandens) santykis su jos tūriu arba mase, nustatant vandens kiekį medžiagoje.
Higroskopiškumas	Medžiagų savybė sugerti ore esančią drėgmę (vandens garus).
Kapiliarumas	Molekulinių jėgų sukeltas reiškinys, kuriam vykstant, skystis migruoja medžiagos kapiliarais (susisiekiančiomis poromis).
Traukimasis	Medžiagos tūrio mažėjimas, išskiriant skystį į aplinką.
Brinkimas	Medžiagos tūrio didėjimas, sugeriant aplinkoje esantį skystį.
Džiūvimas	Medžiagos savybė išskirti skystį.
Šiluminis laidumas	Tiesioginis šilumos energijos pernešimas iš šiltesnių kūno dalių šaltesnėms.
Laidumas garsui	Medžiagos savybė praleisti girdimo dažnio virpesius.

Remiantis 1.5 lentelėje pateiktų užpildų fizikinėmis savybėmis ir jų apibūdinimu, galime paminėti, kad mokslininkai pateikė platų užpildų fizikinių savybių spektrą.

Analizuojant mechanines užpildų savybes, nustatyta, kad mokslininku Erichsen *et al.*, (2008); Yusof ir Zabidi (2016), Sun *et al.*, (2017) teigimu, jos susijusios su mineralogija ir grūdelių dydžiu. Bulevičius *et al.*, (2011) ir Diógenes *et al.*, (2019) teigimu mechaninės užpildų savybės yra svarbios kelio dangos konstrukcijai. Erichsenas *et al.*, (2008) ir kiti mokslininkai, atlikę tyrimus, išsiaiškino, kad užpildo stiprumui įtakos turi: dalelių poringumas, dydis, forma ir jai tenkantis apkrovos dažnis. Svarbi mechaninė savybė yra atsparumas nusidėvėjimui. Atliekant bandymus, kuriais siekiama nustatyti šį atsparumą, naudojamos specialios mašinos. Jų sukamieji būgnai dažniausiai būna iš dalies pripildyti plieninių arba ketaus rutulių (šratų), kurie sukami ratu aplink būgno ašį. Atlikus ban-

dymą, nustatomas medžiagos nusidėvėjimo laipsnis, t. y. santykinis nuostolis procentais (Kandhal & Parker, 1998; Naujokaitis, 2007). Svarbu paminėti, kad mechaninės savybės apibūdina medžiagų atsparumą, deformavimąsi ir irimą. Todėl, projektuojant bei tiesiant naujus automobilių kelius ar rekonstruojant esamus, privalu įvertinti medžiagų, sąveikaujančių su kitais objektais, mechanines savybes, ilgaamžiškumą (Erichsen, 2008; Gardziejczyk & Wasilewska, 2012; Sun *et al.*, 2017).

Nustatant užpildo dalelių dydį ir formą, tiriamos geometrinės savybės: granulimetrinė sudėtis, plokštumo, formos rodikliai. Granulimetrinė sudėtis, arba dalelių dydis, priklauso nuo trupinimo įrengimų charakteristikų. Užpildo dydį apibūdina jo frakcija – ji nurodo apatinio ir viršutinio sietų akučių dydžius milimetrais ir žymima d/D (1.10 pav.) (Skorseth, 2000).



1.10 pav. Sietai granulimetrinei sudėčiai nustatyti (Skorseth, 2000)

Fig. 1.10. The sieves used for testing the gradation (Skorseth, 2000)

Remiantis 1.10 paveiksle pateiktais sietais granulimetrinei sudėčiai nustatyti, galime teigti, kad jie skirstomi į smulkius, tarpinius ir stambius.

Svarbu pažymėti, kad tiesiant kelius svarbu užtikrinti naudojamų užpildų dalelių dydį ir tolygią granulimetrinę sudėtį (Haritonov *et al.*, 2016; Šernas *et al.*, 2016; Vaitkus ir Vorobjovas 2015; Wasilewska *et al.*, 2018).

Užpildų, skirtų keliams tiesti, dalelės gali būti apvalios, pailgos, plokščios arba skeltos (kampuotos). Chen *et al.*, (2005), Souzos *et al.*, (2012),

Topalo & Sengozo (2005) manymu, asfalto mišiniuose reikėtų naudoti kubinės formos užpildo daleles, taip siekiant padidinti šiurkštaus paviršiaus tekstūrą, kuri padeda lengviau sukibti užpildui ir asfalto rišikliui. Užpildo forma vertinama, atsižvelgiant į plokštumo ir formos rodiklius (Skorseth, 2000). Šie rodikliai priklauso nuo medžiagos tipo, uolienos apdirbimo įrenginių: trupintuvo tipo, trutinimo plokščių briaunų nusidėvėjimo ir pan. (Bouquety *et al.*, 2007; Czarnecka & Gillott, 1982; Deltuva *et al.*, 1982; Diógenes *et al.*, 2019; Rajan & Singh, 2017).

Tiesiant automobilių kelius, cheminės užpildų savybės nevertinamos, nes, anot Schön (2015), cheminė sudėtis – tai atsparumas cheminiams poveikiams, sąveika su aplinka, tirpumas ir pan. Uolienos yra santykinai neutralios aplinkai, jos retai turi agresyvų cheminį poveikį, todėl nevertinamos užpildo, naudojamo automobilių keliams tiesti, cheminės savybės.

Siekiant užtikrinti kelių ilgaamžiškumą, svarbu parinkti tinkamus užpildus automobilių keliams tiesti. Atsparumas šalčiui arba šalčio ir šilumos ciklų poveikiui – tai medžiagos, prisotintos vandens, gebėjimas atlaikyti daugkartinį užšalimą ir atšilimą. Medžiagos atlaiko keletą ar net keliasdešimt užšalimų, nes ne visi medžiagos kapiliarai bei poros užšalant būna prisipildę vandens. Räsänen *et al.*, (2003) teigimu, tai, kaip medžiaga sąveikauja su vandeniu ir šalčiu, priklauso nuo medžiagos poringumo, plastiškumo, tankio, stiprumo tempiant ir pan.

Apibendrinat atliktą mokslinės literatūros užpildų naudojamų asfalto mišiniuose savybių analizę, galime teigti, kad pagrindinės užpildų savybės yra fizinės, mechaninės, apibūdinančios ilgaamžiškumą.

1.4.2. Užpildo savybės ir jas reglamentuojantys normatyviniai techniniai dokumentai

Europos standartizacijos komitetas (CEN) – tai asociacija, sudaryta iš Europos šalių nacionalinių standartizacijos institucijų. Ji atsakinga už savanoriškų standartų ir kitų techninių dokumentų, reikalingų produktams, medžiagoms, paslaugoms ir procesams, kūrimą Europos lygmeniu. Analizuojant Andrzejuk *et al.*, (2019); Bulvičius *et al.*, (2013); Guleviš *et al.*, (2010); Haritonovs *et al.*, (2016); Karu *et al.*, (2015); Klizas *et al.*, (2015); Langer, (2006); Skriskas *et al.*, (2010); Wasiłevska, (2014) mokslinius darbus nustatyta, kad tiesiant kelius naudojami užpildai, kurių mechaninės, fizinės ir geometrinės savybės tiriamos remiantis Europos normatyviniais techniniais dokumentais.

Analizuojant užpildų normatyvinius techninius dokumentus skirtus Europos valstybių kelių tiesėjams, nustatyta, kad normatyviniai techniniai reikalavimai pateikti standarte „EN 13043:2002 Aggregates for bituminous mixtures and

surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas“ („Keliams, skridimo aikštelėms ir kitoms eismo zonoms naudojamų bituminių mišinių ir paviršiaus apdorojimo sluoksnio mineralinės medžiagos“, EN 13043:2002).

Kaimyninių šalių Lietuvos, Latvijos ir Lenkijos normatyvinių techninių dokumentų analizės metu nustatyta, kad kiekviena šalis, rengdama normatyvinius techninius dokumentus, nurodo reikalavimus asfalto mišinių užpildams, remdamasi savo ir kitų šalių patirtimi.

Itin svarbu pažymėti, kad Lietuva, Latvija ir Lenkija yra parengusios nacionalinius normatyvinius techninius dokumentus, kuriuose pateikti esminiai reikalavimai užpildų savybėms: Lietuva (LT) – TRA UŽPILDAI 19; Latvija (LV) – „Celu specifikacijas 2019“; Lenkija (PL) – WT-1 2014, „Kruszywa do mieszanek mineralno asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych“ (1.6 lentelė).

1.6 lentelė. Lietuvos, Latvijos, Lenkijos šalių užpildų savybės ir reglamentuojami bandymų metodai

Table 1.6. Properties of mineral aggregates in Lithuania, Latvia, Poland and methods of regulated tests

Eil. Nr.	Savybė/bandymo metodo žymuo	Šalys
1.	Granuliometrinė sudėtis – <i>EN 933-1:2012 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method</i> [Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas]	LT, LV, PL
2.	Stambiojo užpildo forma	
2.1.	Plokštumo rodiklis (<i>FI</i>) – <i>EN 933-3:2012 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index</i> [Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 3 dalis. Dalelių formos nustatymas. Plokštumo rodiklis]	
2.2.	Formos rodiklis (<i>SI</i>) – <i>EN 933-4:2008 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape - Shape index</i> [Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 4 dalis. Dalelių formos nustatymas. Formos rodiklis]	
2.3.	Trupintosios ir skaldytos dalelės <i>EN 933-5:2002 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles</i> [Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Trupintųjų ir skaldytųjų dalelių santykinio kiekio stambiuosiuose užpilduose nustatymas]	

1.6 lentelės pabaiga

Eil. Nr.	Savybė/bandymo metodo žymuo	Šalys
3.	Atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) (M_{DE}) – <i>EN 1097-1:2011 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)</i> [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (Devalio metodas)]	LT
4.	Atsparumas trupinimui – <i>EN 1097-2:2010 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation EN 1097-2:2020</i> [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai]	
4.1	Atsparumas smūgiams (SZ) – Sk. 6	LT
4.2	Atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA) – 5 sk.	LT, LV, PL
5.	Sausųjų dalelių tankis – <i>EN 1097-6:2013 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption</i> [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas]	LT, PL
6.	Atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N) – <i>EN 1097-9:2014 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres – Nordic test</i> [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 9 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi dėl dygliuotų padangų poveikio nustatymas. Šiaurės šalių metodas]	LV
7.	Atsparumas šaldymui ir atšildymui (F) – <i>EN 1367-1:2007 Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing</i> [Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo šaldymui ir atšildymui nustatymas]	LT, LV, PL
8.	Atsparumas šalčiui druskų tirpale – <i>EN 1367-2:2009 Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 2: Magnesium sulfate test</i> [Bandymai užpildų šiluminėms savybėms ir atsparumui atmosferos poveikiams nustatyti. 2 dalis. Magnio sulfato metodas]	

Remiantis 1.6 lentelėje pateiktomis Lietuvos, Latvijos, Lenkijos šalių užpildų savybėmis ir reglamentuojamais bandymų metodais, išskiriame pagrindines užpildų mechanines savybes: atsparumą trupinimui (Los Andželo koeficientas) LA ,

atsparumą smūgiams SZ , atsparumą poliravimui PSV , atsparumą dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) M_{DE} , atsparumą dilimui dėl dygliuotųjų padangų A_N . Tai patvirtina ir Lietuvos bei kaimyninių šalių mokslininkų darbų analizė, nes Vaitkaus *et al.* (2017a) teigimu, Lietuvoje kelio dangose naudojamų užpildų mechaninės savybės yra šios: atsparumas smūgiams SZ , atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) LA , atsparumas poliravimui PSV , atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) M_{DE} (TRA UŽPILDAI 19). Latvijoje kelių tiesyboje naudojamų užpildų mechaninės savybės: atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) LA , atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų A_N (Haritonovs & Tihonovs, 2014; Izaks *et al.*, 2015). Lenkijos kelių tiesyboje naudojamų užpildų mechaninės savybės: atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) LA , atsparumas poliravimui PSV (Wasilevska *et al.*, 2015) ir atsparumo šaldymui ir atšildymui (Andrzejuk *et al.*, 2019; WT-1 2014).

Tęsiant Lietuvoje, Latvijoje ir Lenkijoje galiojančių normatyvinių techninių dokumentų analizę, disertacijos autorė surinko ir apibendrino užpildų mechaninių savybių reikalavimus ir kategorijas (1.7 lentelė).

1.7 lentelė. Užpildų mechaninių savybių reikalavimai ir kategorijos

Table 1.7. Requirements and categories for mechanical properties of aggregates

Reikalavimai atsparumui	Trupinimui LA		Smūgiams SZ		Dėvėjimuisi M_{DE}		Poliravimui PSV		Dygliuotoms padangoms A_N	
	vertė	kategorija	vertė, %	kategorija	vertė	kategorija	vertė	kategorija	vertė	kategorija
TRA UŽPILDAI 19	≤ 20	LA_{20}	≤ 18	SZ_{18}	≤ 15	$M_{DE} 15$	≥ 44	PSV_{44}	–	–
	≤ 25	LA_{25}	≤ 22	SZ_{22}	–	–	≥ 48	PSV_{dek}	–	–
	≤ 30	LA_{30}	≤ 26	SZ_{26}	–	–	≥ 50	PSV_{50}	–	–
Ceļu specifikācijas 2019	≤ 20	LA_{20}	–	–	–	–	–	–	≤ 10	$A_N 10$
	≤ 25	LA_{25}	–	–	–	–	–	–	≤ 14	$A_N 14$

1.7 lentelės pabaiga

Reikalavimai atsparumui	Trupinimui LA		Smūgiams SZ		Dėvėjimuisi M_{DE}		Poliravimui PSV		Dygliuotoms padangoms A_N	
	vertė	kategorija	vertė, %	kategorija	vertė	kategorija	vertė	kategorija	vertė	kategorija
<i>Ceļu specifikācijas 2019</i>	≤ 30	LA_{30}	–	–	–	–	–	–	≤ 19	$A_N 19$
	≤ 40	LA_{40}	–	–	–	–	–	–	≤ 30	$A_N 30$
<i>WT-1 2014</i>	≤ 20	LA_{20}	–	–	–	–	≥ 44	PSV_{44}	–	–
							≥ 50	PSV_{50}	–	–
	≤ 25	LA_{25}	–	–	–	–	≥ 44	PSV_{44}	–	–
							≥ 48	$PSV_{dek.ar. (48)}$	–	–
							≥ 50	PSV_{50}	–	–
							≥ 48	$PSV_{dek.la r. (48)}$	–	–
	≤ 30	LA_{30}	–	–	–	–	≥ 48	$PSV_{dek.la r. (48)}$	–	–
							≥ 50	PSV_{50}	–	–

Remiantis 1.7 lentelėje pateiktais užpildų mechaninių savybių verčių ir kategorijų reikalavimais, galima teigti, kad visos trys šalys reglamentuoja atsparumą trupinimui LA ir iš esmės tokios pačios reglamentuojamos vertės nuo ≤ 20 iki ≤ 30 Lietuvoje bei Lenkijoje, nors Latvijoje vertės nuo ≤ 20 iki ≤ 40 . Atsparumo smūgiams SZ , vertės nuo $\leq 18\%$ iki $\leq 26\%$, atsparumo dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) M_{DE} , vertę ≤ 15 , reglamentuoja tik Lietuva. Atsparumą poliravimui PSV , reglamentuoja Lietuva ir Lenkija, iš esmės abiejų šalių tos pačios reglamentuojamos vertės – nuo ≥ 44 iki ≥ 50 . Atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų padangų A_N vertės ≤ 10 iki ≤ 30 reglamentuoja tik Latvija.

Analizuojant Lietuvos, Latvijos ir Lenkijos dokumentuose pateiktą stambiųjų užpildų granulimetrinę sudėtį – užpildo suskirstymą į frakcijas pagal dalelių, prabyrančių pro nustatytą skaičių sietų, dydžius, išreikštą masės procentais, susisteminti bendrieji granulimetrinės sudėties reikalavimai pateikiami 1.8 lentelėje. Taip pat minėtoje lentelėje pateikiamos ir granulimetrinės sudėties kategorijos.

1.8 lentelė. Bendrieji granulimetrinės sudėties reikalavimai**Table 1.8.** General requirements for particle size

Reikalavimai	Dalelių dydžio frakcija mm	Kategorija	Prabyrančių dalelių dalis, masės %				
<i>TRA UŽPILDAI 19</i>	<i>d/D</i>	Gc90/20	2D	1,4D	D	d	d/2
<i>Ceļu specifیکācijas 2019</i>		Gc85/20					
<i>WT-1 2014</i>		Gc90/15					

Dalelių dydžio frakcija – užpildo, prabyrančio pro didesniąją (D) iš dviejų sietų ir užsilaikančio ant mažesniosios (d), frakcija, žymima d/D. Žemesniosios riba (d) gali būti 0. d – apatinio sieto akučių dydis, mm; D – viršutinio sieto akučių dydis, mm; G – granulimetrinės sudėties kategorija. Remiantis 1.8 lentelėje pateiktomis bendrosiomis granulimetrinės sudėties reikalavimais, galime teigti, kad, siauriausios granulimetrinės sudėties kategorija Gc90/15 pateikta Lenkijos normatyviniame techniniame dokumente WT-1 2014.

Tęsiant užpildo savybes reglamentuojančių normatyvinių techninių dokumentų analizę, apibendrinti geometrinių savybių: plokštumo rodiklio (SI), formos rodiklio (FI), sausų dalelių tankio bei atsparumo šaldymui ir atšildymui (F) – reikalavimai ir kategorijos pateiktos 1.9 lentelėje.

1.9 lentelė. Geometrinės savybių: plokštumo rodiklio, formos rodiklio, dalelių tankio bei atsparumo šaldymui ir atšildymui – reikalavimai ir kategorijos**Table 1.9.** Requirements and categories of geometrical properties: flatness index, shape index; dry particle density and resistance to freezing and thawing

Reikalavimai	Geometrinės savybės				Sausųjų dalelių tankis		Atsparumas šal-dymui ir atšildy-mui F	
	Plokštumo rodiklis SI		Formos rodiklis FI					
	vertė, %	kategorija	vertė, %	katego-rija	vertė, Mg/m ³	katego-rija	vertė, %	katego-rija
TRA $UŽPILDAI$ 19	≤15	SI_{15}	≤15	FI_{15}	2,60–2,80	–	≤1	F_1
	≤20	SI_{20}	≤20	FI_{20}				
$Ceļu\ speci-$ $fikācijas$ 2019	≤25	SI_{25}	≤20	FI_{20}	2,60–2,80	–	≤1	F_1
$WT-1$ 2014	≤20	SI_{20}	≤20	FI_{20}	2,60–2,80	–	≤1	F_1

Remiantis 1.9 lentelėje pateiktiems užpildų geometrinių savybių reikalavimais ir kategorijomis, galima teigti, kad visos trys šalys reglamentuoja plokštumo ir formos rodiklius, atsparumą šaldymui ir atšildymui. Plokštumo rodiklio SI ir formos rodiklio $F/$ vertės Lietuvoje – $\leq 15\%$, $\leq 20\%$, Latvijoje – $\leq 25\%$, $\leq 25\%$, Lenkijoje – $\leq 20\%$. Nustatyti iš esmės tokie patys reikalavimai – sausųjų dalelių tankiui, vertė 2,60–2,80 Mg/m³ bei atsparumo šaldymui ir atšildymui vertė – ≤ 1 .

Atlikus užpildo savybes reglamentuojančių normatyvinių techninių dokumentų analizę galime teigti, kad pagrindinės užpildų mechaninės savybės yra atsparumas smūgiams SZ , atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) LA , atsparumas poliravimui PSV , atsparumas dėvėjimuisi (mikro- Devalio koeficientas) M_{DE} , atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų A_N , dalelių tankis bei atsparumas šaldymui ir atšildymui F .

1.4.3. Užpildo įtaką automobilių kelio viršutinės dangos mišinio elgsenai

Analizuojant mokslininkų Kogbara *et al.* (2016); Lodhis & Yadavas (2016), Papagiannakis & Masad (2008) darbus, nustatyta, kad asfalto mišinio savybės apibūdinamos užpildų mechaniniais ir fizikiniais rodikliais. Taip pat nustatyta, kad užpildo mišinys daro labai didelę įtaką asfalto mišiniui.

Svarbu pažymėti, kad išskiriamos šios asfalto dangos viršutinio sluoksnio mišinio savybės:

- Absorbcija, poringumas ir pralaidumas – labai svarbu charakterizuoti vidines poras, gaminant užpildus. Porų dydis, kiekis ir vientisumas gali smarkiai paveikti užpildo stiprumą, atsparumą šlifavimui, paviršiaus tekstūrą, surišimo su rišikliu savybes ir atsparumą užšalimui bei atšalimui.
- Paviršiaus tekstūra nusako užpildo dalelės ar jų masyvo šiurkštumą arba švelnumą. Paviršiaus tekstūra atlieka reikšmingą vaidmenį, kuriant vidinius bitumo ir užpildo ryšius nanomasteliu.
- Stiprumas ir elastingumas – tai užpildo savybė išlaikyti savo pradinę formą, veikiant gniuždymo bei tempimo jėgoms.
- Tuštymėtumas – oro tarpai tarp užpildo dalelių.
- Kietumas – šią savybę suteikia kokybiškai susicementavusios mineralo nanodalelės. Jos yra atsparios įbrėžimams, šlifavimui ir kitokiam panašaus tipo aplinkos poveikiui.
- Dalelių forma parodo, ar dalelė apvali, ar kampuota.
- Apvalkalas – užpildo substancija, dengianti visą paviršių ar dalį jo.

Svarbiausi užpildo mišinio struktūros asfalto mišinyje veiksniai yra užpildo mišinio granulimetrinė sudėtis ir dalelių forma (Šernas *et al.*, 2016; Vaitkus ir Vorobjovas 2015; Wasilewska *et al.*, 2018). Mokslininkai El-Basyounis ir

Mamlouk (1999) išanalizavo granulimetrinės sudėties įtaką asfalto mišinių eksploatacinėms savybėms. Asfalto mišiniai, kurių granulimetrinės sudėties kreivė yra arčiau žemiausios leidžiamosios ribos, yra atsparesni provėžų susidarymui nei mišiniai, sudaryti iš smulkių dalelių.

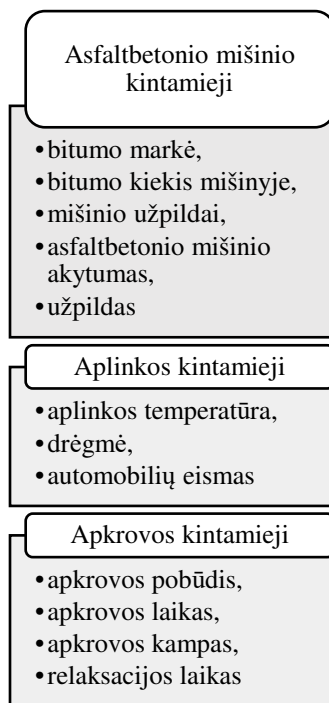
Tęsiant mokslinių darbų analizę, nustatyta, kad svarbu užtikrinti tinkamą užpildo dalelių formos rodiklį, siekiant gauti asfalto mišinį, atsparų plastinėms deformacijoms (Arasan *et al.*, 2011; El-Basyouny & Mamlouk, 1999; Bessa *et al.*, 2015; Golalipour *et al.*, 2012; Prowell, 2001; Vorobjovas *et al.*, 2017). Arasanas *et al.* (2011), Asis (2007), Chenas *et al.*, (2005) ir Siswosoebrotho *et al.* (2005) ištyrė, kaip užpildo dalelių forma lemia mechanines asfalto mišinio savybes. Jos padidina asfalto plastiškumą, dėl to asfalto danga funkcionuoja ilgiau. Asfalto mišinių gamybai naudojant tik kubinės formos užpildus, kurie yra atsparūs trupiniui, dėvėjimuisi, poliravimui, vandens įgeriamumui, galima užtikrinti tvarų asfalto mišinio funkcionavimą. Kaip teigia Vaitkus *et al.* (2017), skaldytos mineralinės medžiagos, naudojamos asfalto mišinių gamybai, pagerina ne tik trintį tarp dalelių, bet ir sukibimą tarp transporto priemonės ratų ir kelio asfalto dangos.

Svarbu pažymėti, kad mikroužpildas yra asfalto mišinio sudedamoji dalis, turinti didžiausią paviršiaus plotą. Ji sudaro iki 90–95 % visų į asfalto mišinio sudėtį įeinančių užpildo mišinių paviršiaus ploto. Nuo šios savybės priklauso rišiklio kiekis, nes reikia juo padengti visas užpildo mišinio daleles. Todėl į asfalto mišinį įeina iki 10 % mikroužpildo. Nustatyta, kad, esant optimaliam bituminio rišiklio ir mikroužpildo santykiui, gaunamas didžiausias struktūrinės dispersinės sistemos, sudarytos iš šių medžiagų, stipris (Šernas *et al.*, 2014). Sumažinus mikroužpildo kiekį, padidėja asfalto atsparumas nuovargiui, bet sumažėja atsparumas plastinėms deformacijoms (Noyce *et al.*, 2005).

Atlikus mokslinės literatūros analizę, galime teigti, kad užpildo įtaka automobilio kelio viršutinės dangos mišinio elgsenai priklauso nuo užpildų fizikinių ir mechaninių savybių.

1.5. Asfalto mišinių projektavimas

Asfalto mišinys yra kompozicinė medžiaga, susidedanti iš oro tuštymių, rišiklio ir užpildo, todėl kelių dangos konstrukcijos stiprumas ir ilgaamžiškumas tiesiogiai veikia asfalto dangos sluoksnių sąveiką (Čygas *et al.*, 2008a, 2008b; Erlingsson *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2007; Mrugała & Iwański, 2015; Mrugała & Chomicz-Kowalska, 2017; Vaitkus *et al.*, 2017a, 2017b; Wasilevska *et al.*, 2018). Mrugała, Iwański (2015) ir Nilssonas (2001) nurodo lemiamus asfaltbetonio dangų veiksnius, eksploatuojant automobilio kelią. Jie apima asfaltbetonio mišinį, aplinką ir apkrovas (1.11 pav.).



1.11 pav. Asfaltbetonio dangų funkcionavimą lemiantys veiksniai
(Mrugała & Iwański, 2015; Nilsson, 2001)

Fig. 1.11. Factors determining the functioning of asphalt concrete pavements
(Mrugała & Iwański 2015; Nilsson 2001)

Remiantis 1.11 paveiksle pateiktais asfaltbetonio dangų funkcionavimą lemiančiais veiksniais, galime teigti, kad asfaltbetonio mišinio kintamuosius sudaro: bitumo markė, bitumo kiekis mišinyje, mišinio užpildai, asfaltbetonio mišinio akytumas; aplinkos kintamuosius sudaro: aplinkos temperatūra, drėgmė, automobilių eismas, apkrovos kintamuosius sudaro: apkrovos pobūdis, apkrovos laikas, apkrovos kampas, relaksacijos laikas.

Automobilių kelio viršutinės dangos mišiniai sudaryti iš tolydžios granulometrinės sudėties užpildų mišinio ir rišiklio – kelių bitumo arba polimerais modifikuoto bitumo. Užpildas 80–90 % sudaro viso asfalto mišinio tūrio, arba 90–96 % visos asfalto mišinio masės (Kogbara *et al.*, 2016; Lodhi & Yadav, 2016), todėl užpildo kokybė turi atitikti jai keliamus reikalavimus (Vaitkus *et al.*, 2012). Vadovaujantis normatyviniais techniniais dokumentais, nustatomos atitinkamo kelio dangos sluoksnio užpildų savybės (Asi, 2007; Erlingsson *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2007).

Atlikus analizę Lietuvos normatyvinių dokumentų, galime teigti, kad reikalavimai užpildams, naudojamiems asfalto mišiniams, pateikti dokumente „*TRA UŽPILDAI 19 Automobilių kelių užpildų techninių reikalavimų aprašas*“. Dažniausiai Lietuvoje naudojami asfalto mišiniai AC 11 VS (asfalto viršutinio sluoksnio asfaltbetonio mišinys) ir SMA 11 S (skaldos ir mastikos asfaltas) (Šernas *et al.*, 2016).

Svarbu pažymėti, kad Lietuvos Respublikoje, projektuojant asfalto mišinius, laikomasi eiliškumo bei normatyvinių techninių dokumentų reikalavimų (1.12 pav.) ir, kad asfalto bandomųjų mišinių savybės ir bandymo metodai pateikiami 1.10 lentelėje.

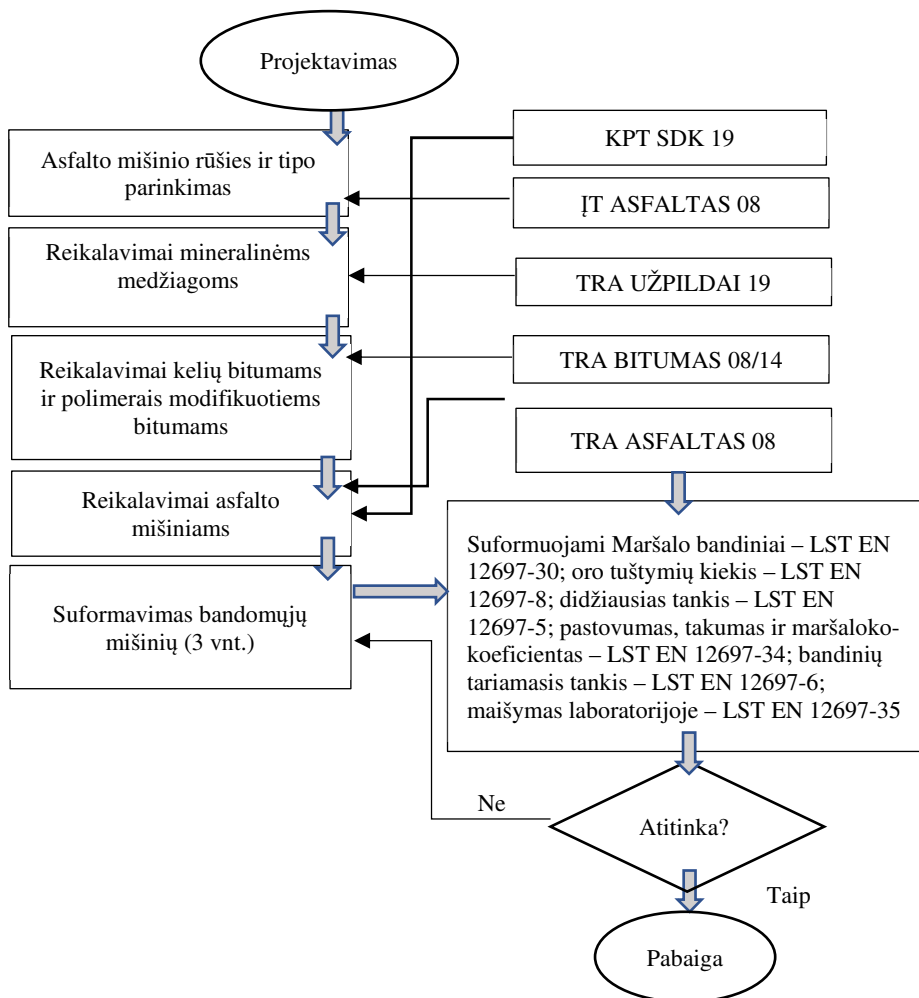
1.10 lentelė. Asfalto bandomųjų mišinių savybės ir bandymo metodai

Table 1.10. Properties and standards of asphalt test mixtures

Asfalto bandomųjų mišinių savybės	Bandymo metodo žymuo
Didžiausias tankis	LST EN 12697-5 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 5 dalis. Didžiausiojo tankio nustatymas
Bandinių tariamasis tankis	LST EN 12697-6 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas
Oro tuštymių kiekis	LST EN 12697-8 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymetumo rodiklių nustatymas
–	LST EN 12697-30 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginio tankintuvu
Pastovumas, takumas ir Maršalo koeficientas	LST EN 12697-34 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 34 dalis. Maršalo bandymas
Maišymas laboratorijoje	LST EN 12697-35:2016 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 35 dalis. Maišymas laboratorijoje

1.10 lentelėje pateikta, kad prieš pradedant asfalto bandomųjų mišinių savybių bandymus, pirmiausiai atliekamas maišymas laboratorijoje (*LST EN 12697-35*) ir su smūginio tankintuvu formuojami Maršalo bandiniai (*LST EN 12697-30*). Nustatomas suformuotų bandinių oro tuštymių kiekis (*LST EN 12697-8*), didžiausias tankis (*LST EN 12697-5*), pastovumas, takumas ir Maršalo koeficientas (*LST EN 12697-34*) bei tariamasis tankis (*LST EN 12697-6*). Svarbu pažymėti, kad atliekami suformuoto asfalto bandomųjų mišinių bandymai ir jei

bandymų rezultatai neatitinka reikalavimų, parenkamas ir toliau tiriamas kitos sudėties asfalto mišinys.



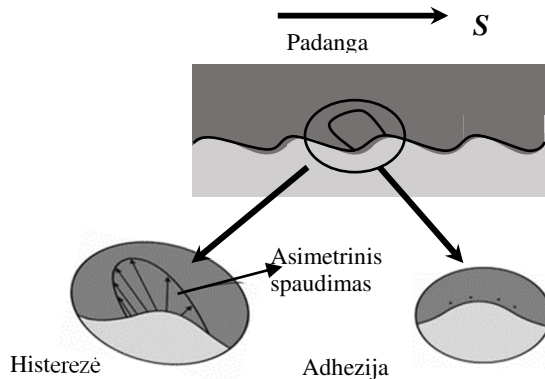
1.12 pav. Asfalto viršutinio sluoksnio mišinių projektavimo schema
Fig. 1.12. Design process and scheme of regulations of asphalt mixtures

Apibendrinant aukščiau išanalizuotus mokslinius tyrimus ir asfalto viršutinio sluoksnio mišinių projektavimo schemą (1.12 pav.), galima teigti, kad Lietuvoje asfalto mišiniai pradedami projektuoti parenkant asfalto mišinio rūšį, tipą, ir baigiami, patikrinant suformuotus asfalto bandomuosius mišinius.

1.6. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumas slydimui

Eksplloatuojant kelią, svarbu užtikrinti tinkamą asfalto dangos paviršiaus atsparumą slydimui. Jis priklauso nuo to, kiek automobilių kelio viršutinės dangos užpildai sugeba priešintis trinties jėgoms. Didelę reikšmę eismo saugumui kelyje turi rato sukibimas su viršutiniu asfalto dangos sluoksniu. Rato sukibimas su asfalto danga priklauso nuo paviršiaus tekstūros (mikro- ir makro-), transporto priemonių eismo intensyvumo, dangos mišinio užpildų ir rišiklio savybių, taip pat asfalto mišinio užpildų savybių ir įrengimo technologijos (Haritonovs *et al.*, 2016; Scharnigg & Schwalbe, 2010; Siriphun *et al.*, 2016; Sivilevičiaus *et al.*, 2007; Šernas *et al.*, 2016; Vaitkus *et al.*, 2017; Vorobjovas *et al.*, 2017).

Sukibimas apibrėžiamas kaip priešinimasis dviejų paviršių judėjimui ten, kur jie susiliečia. Sukibimo dydis išreiškiamas sukibimo koeficientu. Tai dviejų veikiančių jėgų vertė: viena lygiagreti su kontakto paviršiumi tarp dviejų kūnų ir priešinga jų judėjimo kryptčiai (sukibimo jėga), o kita statmena kontakto paviršiui (normalioji jėga) (World Road Association, 2003). Kelių transporto kontekste sąlyčio paviršius suvokiamas kaip ir padangos sąveika, o normalioji jėga – kaip rato apkrova. Atsparumas slydimui svyruoja nuo 0 (kai danga yra padengta ledu) iki 1 (kai danga yra sausa ir švari). Sukibimo jėgos daugiausia sudarytos iš adhezijos ir histerezės komponentų (Hall *et al.*, 2009) (1.13 pav.).



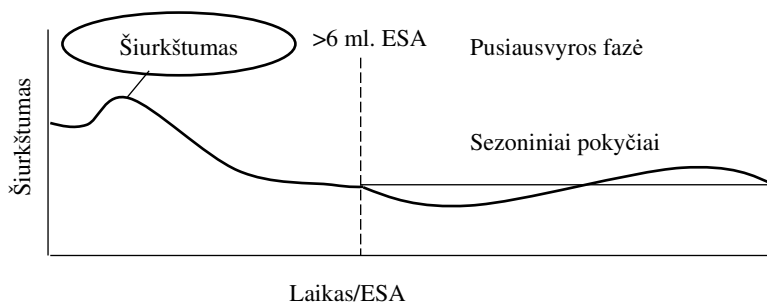
1.13 pav. Histerezės ir adhezijos schema (Hall *et al.*, 2009)

Fig. 1.13. Scheme of hysteresis and adhesion (Hall *et al.*, 2009)

Remiantis 1.13 paveikslu svarbu paminėti, kad didesnis dangos atsparumas slydimui pasiekiamas esant sausam paviršiui, nes tokiomis sąlygomis adhezinis ir histerezinis sukibimai būna didžiausi. Esant šlapiai dangai, adhezinis sukibimas

gali sumažėti iki nulio ir taip sumažinti bendrą atsparumą slydimui (Siriphun *et al.*, 2016; Vaitkus *et al.*, 2017a).

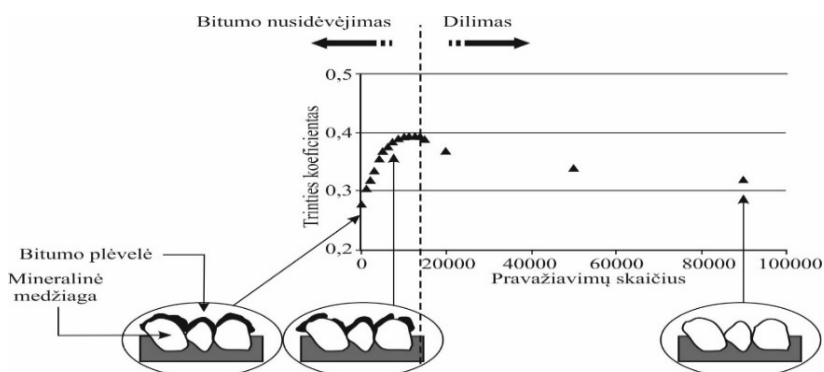
Įrengta nauja danga pasiekia maksimalų atsparumą slydimui tik po tam tikro laiko, nes bitumo plėvelės sluoksnis dengia užpildo dalelių paviršių, dėl to danga tampa slidi. Veikiant transportui, danga per pirmuosius kelerius metus pasiekia gana pastovią atsparumo slydimui reikšmę (1.14 ir 1.15 pav.), nes yra nudėvima viršutinė bitumo plėvelė ir padangos tiesiogiai liečiasi su užpildo dalelėmis.



1.14 pav. Dangos šiurkštumo ir ekvivalentinių standartinių ašių skaičiaus (ESA) priklausomybė (Prowell, 2001; Wills & Finch, 2015)

Fig. 1.14. Dependence of pavement surface roughness and number of equivalent standard axles (ESA) (Prowell, 2001; Wills & Finch, 2015)

1.14 paveiksle pavaizduota, dangos šiurkštumo ir ekvivalentinių standartinių ašių skaičiaus priklausomybė praėjus tam tikram laikui, danga pradeda dilti ir dėl sezoninių pokyčių.



1.15 pav. Trinties koeficiento ir pravažiavimų skaičiaus priklausomybė (Kane *et al.*, 2010)

Fig. 1.15. Dependence of friction coefficient and number of passes (Kane *et al.*, 2010)

Remiantis 1.15 paveikslu svarbu paminėti, kad praėjus tam tikram laikui, danga pradeda dilti, dėl transporto poveikio dyla užpildo dalelių kampai, danga tampa mažiau atspari slydimui. Padidėjus transporto apkrovoms, taip pat priklausomai nuo sezoniškumo (pavasario polaidžio, vasaros kaitros) ir nuo asfalto mišinyje panaudotų užpildų, atsparumas slydimui gali kisti.

Itin pavojinga sušlapusi ar apledėjusi asfalto dangą, kai trinties jėga tarp rato ir dangos sumažėja iki minimalios – tokią dangą nesaugu ir pavojinga eksploatuoti (Čygas *et al.*, 2005; Kane *et al.*, 2009; Kandhal & Parker, 1998; Laurinavičius *et al.*, 2006; Laurinavičius ir Čygas, 2003; Mataei *et al.*, 2016; Noyce *et al.*, 2005; Räisänen *et al.*, 2003; Santucci & Engineer, 2013; Siriphun *et al.*, 2016; Vaiana *et al.*, 2012; Wasilevska *et al.*, 2018).

Mokslininkų nuomone, didžiausią įtaką dilimui turi sunkiasvorės transporto priemonės, todėl viena iš kelių projektavimo tendencijų yra sunkiasvorių priemonių vidutinio metinio paros eismo intensyvumo vertinimas (Braga *et al.*, 2003; Jakulytė *et al.*, 2019; Laurinavičius ir Žilionienė, 2001; Puodžiukas ir Braga, 2014). Tačiau keliuose, kuriuose toks transportas nevažinėja, dilimą lemia didelis lengvųjų automobilių srautas (Andriejauskas *et al.*, 2014; Bartuska *et al.*, 2017).

Mokslininko West *et al.*, (2001) teigimu, kad transporto priemonės galėtų sustoti tinkamu atstumu, reikalingas pakankamas atsparumas trinčiai. Svarbu pažymėti, kad būtina užtikrinti automobilio rato pasipriešinimą slydimui, nes, mažėjant dangos paviršiaus atsparumui slydimui, transporto priemonės stabdymo kelias padidėja keturgubai. Gothie (1996) apskaičiavo, kad transporto priemonių avarijų rizika keliuose, kurių atsparumo slydimui koeficientas mažesnis nei 0,45, yra 20 kartų didesnis nei keliuose, kur šis koeficientas didesnis nei 0,60.

Atlikus užsienio mokslinių darbų analizę, nustatyta, kad dauguma Europos šalių taiko nacionalines dangos paviršiaus atsparumo slydimui matavimo politikas, kurios apima matavimo metodikas, prietaisus, matavimo dažnį ir išmatuotus kelius. Matavimams atlikti Europoje priskaičiuojama iki dvidešimt skirtingų metodų ir prietaisų. Svarbu pabrėžti, kad Europos mokslininkai siekia, kad Europos šalys turėtų bendrą darnią politiką dangos paviršiaus atsparumo slydimui matavimams atlikti (Anfosso-Lédée *et al.*, 2009 Descornet *et al.*, 2006; Do & Roe, 2008).

Analizuojant Lietuvoje automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui matavimo reglamentavimą, nustatyta, kad Lietuvoje kelio darbų priėmimo metu dangos paviršiaus atsparumo slydimui rodiklio vertės, matuojamos 60 km/h greičiu kontroliuojamo išilginio slydimo įtaisais. Svarbu paminėti, kad matavimas atliekamas pagal *CEN/TS 15901-14:2016 Road and airfield surface characteristics – Part 14: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal controlled slip (LFCN): ViaFriction (Road Analyser and Recorder of ViaTech AS)*. Svarbu pažymėti, kad Lietuvoje kelio darbų priėmimo metu, atsparumo slydimui rodiklio vertės turi būti ne mažesnės

už ribines vertes: magistralinių kelių – 0,50, krašto ir rajoninių kelių – 0,45 (IT ASFALTAS 08).

Apibendrinant aukščiau išanalizuotus atliktus mokslinius tyrimus, galima teigti, kad eksploatuojant kelią, svarbu užtikrinti tinkamą asfalto dangos paviršiaus atsparumą slydimui praėjus tam tikram laikui, nes kelio danga pradeda dilti, dėl transporto poveikio, taip pat priklausomai nuo sezoniškumo (pavasario polaidžio, vasaros kaitros), taip pat ir nuo asfalto mišinyje panaudotų užpildų.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Dolomito ir granito uolienos skiriasi pagal mineraloginę sandarą. Atlikus mokslinių darbų analizę nustatyta, kad Lietuvoje gaminamuose automobilių kelio viršutinės dangos mišiniuose dažniausiai naudojami granito užpildai, kurių gamybos technologiją sudaro trys trupinimo etapai.
2. Racionaliam vietinių išteklių panaudojimui, daugelis Europos šalių yra parengusios nacionalinius normatyvinius techninius dokumentus, kuriuose pateikti esminiai reikalavimai ir vertės automobilių kelio viršutinės dangos mišinių gamybai naudojamų užpildų savybėms.
3. Išanalizavus mokslinius tyrimus užpildo įtakos automobilių kelio viršutinės dangos mišinių funkcionavimui tematika, nustatyta, kad geriausias rezultatas pasiekiamas naudojant užpildus, kurie yra atsparūs dėvėjimuisi, trupinimui, smūgiams, poliravimui, dilinimui dėl dygliuotų padangų bei atsparūs šaldymui ir atšildymui.
4. Apibendrinant mokslininkų darbus nustatyta, kad, eksploatuojant kelią, svarbu užtikrinti tinkamą kelio dangos paviršiaus atsparumą šiuurkštumui. Todėl būtina nustatyti automobilių kelio viršutinės dangos atsparumą slydimui.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas, į granito ir dolomito užpildų skirtingą kilmę ir galimybę moksliskai pagrįsti daugkartinio trupinimo technologijos būdu pagaminto dolomito užpildo naudojimą automobilio kelio viršutinėje dangoje, būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti mokslinius tyrimus ir normatyvinius techninius dokumentus, reglamentuojančius automobilių kelio viršutinės dangos užpildų gamybos technologijas ir reikalavimus bei užpildo įtakos automobilių kelio viršutinės dangos funkcionavimui tematika.
2. Eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais nustatyti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikines, mechanines savybes ir įvertinti mechaninių savybių lygiavertiškumą, lyginant su dolomito užpildu, pagamintu nenaudojant daugkartinio

trupinimo technologijos.

3. Įvertinti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikinių ir mechaninių savybių lygiavertiškumą, lyginant su kitų rūšių užpildu, bei nustatyti galimybes jį taikyti automobilių kelio viršutinės dangos, kurią veikia sunkusis transportas, konstrukcijoje.
4. Atlikus natūrinius tyrimus Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose kelio dangos konstrukcijos viršutinis sluoksnis ir paviršiaus apdaras įrengti su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, įvertinti dangos paviršiaus atsparumo slydimui kitimą kelio dangos eksploatacijos metu.
5. Apskaičiuoti dolomito užpildo, naudojimo kelio dangos konstrukcijos viršutinių sluoksnių asfalto mišiniams gaminti, galimą ekonominį efektą.

Dolomito užpildų eksperimentiniai tyrimai

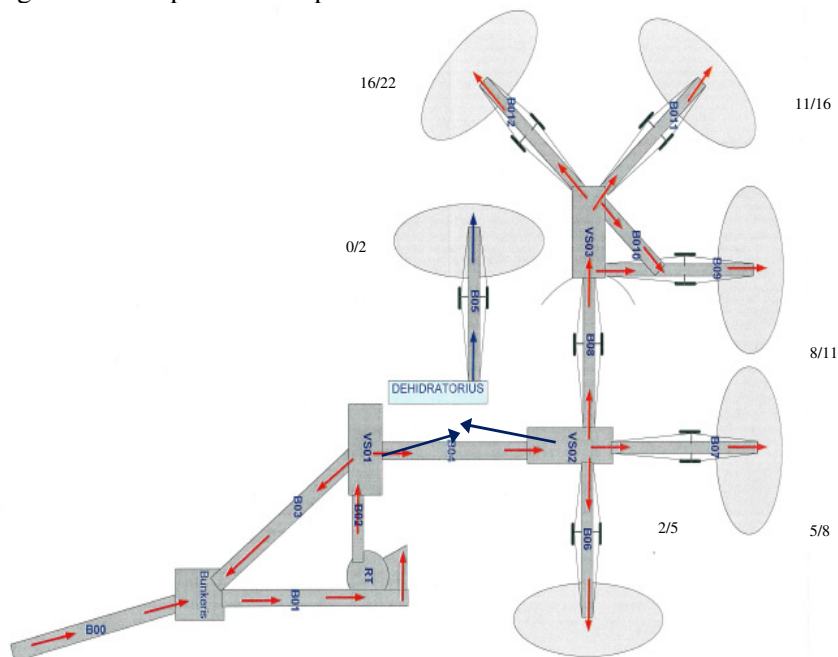
Šiame skyriuje detalizuota dolomito užpildo technologija, kurioje aprašytas kaip gaminamas daugkartinio trupinimo dolomito užpildas. Pagal sudarytą eksperimentinių tyrimų planą ir sekas pateikti eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais nustatyti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikinių ir mechaninių savybių rezultatai. Atlikti natūriniai dangos paviršiaus atsparumo slydimui tyrimai Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose automobilio kelio viršutinės dangos sluoksnis įrengtas iš asfalto mišinio su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją. Skyriaus pabaigoje pateiktos eksperimentinio tyrimo išvados. Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose autorės mokslinėse publikacijose (Šneideraitienė, Žilionienė, 2017, 2018; Vorobjovas *et al.*, 2017; Šernas *et al.*, 2016).

2.1. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo gamyba

Išanalizavus kitų šalių mokslininkų darbus (1 skyrius), nustatyta, kad asfalto mišiniams gaminti tinkamų užpildų gamyba įprastai apima ne mažiau kaip tris trupinimo etapus. Svarbu pažymėti, kad su minėta technologija Lietuvos naudingąją iškaseną dolomitą trupinant į užpildus, atsparumo smūgiams *SZ* rodiklio

vertė $\leq 22\%$. Šie dolomito užpildai naudojami kelio dangos konstrukcijos sluoksniuose.

Vienas iš Šiaurės Lietuvos dolomito užpildų gamintojų Petrašiūnų 2 karjere naudoja technologiją, kurią taikant pagamintas dolomito užpildas naudojamas asfalto dangos viršutiniam sluoksniui. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo technologinė schema pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo technologijos schema

Fig. 2.1. Scheme for the production of multiply dolomite aggregate

2.1 paveiksle pavaizduota, kaip jau pagamintas dolomito užpildas, kurio dalelės dydis ≥ 16 mm (galimi 22/56 mm, 22/45 mm, 16/45 mm frakcijų užpildai), transporteriu BOO gabenamas į bunkerį, o iš jo transporteriu B01 pervežamas į rotorinį trupintuvą RT ketvirtam trupinimo etapui. Sutrupinta medžiaga transporteriu B02 gabenama į vibracinį sijotuvą VS01, ten ji plaunama ir sijojama. Vibracinio sijotuvo VS01 viršutinio sieto medžiaga, dalelių dydis ≥ 22 mm, transporteriu B03 pervežamas atgal į bunkerį pakartotinai trupinti. Smulkusis užpildas, kurio frakcija 0/2 mm, prabyrėjęs pro apatinį vibracinio sijotuvo VS01 sietą, kartu su vandeniu vamzdžiais nubėga į vandens šalinimo įrenginį – dehidratorių. Tarpinė (viršutinio, vidurinio, apatinio) vibracinio sijotuvo VS01 sieto medžiaga, kurios dalelių dydis siekia nuo 2 mm iki 22 mm, transporteriu B04 gabenama į vibracinį sijotuvą VS02, kuriame ji plaunama ir sijojama. Smulkusis užpildas, kurio

frakcija 0/2 mm, prabyrėjęs pro apatinį vibracinio sijotuvo VS02 sieta, kartu su vandeniu vamzdžiais nubėga į dehidratorių.

Stambiųjų užpildų frakcijos 2/5 mm, 16/22 mm, 11/16 mm, 8/11 mm ir smulkią užpildo frakcija 0/2 mm sandėliuojamos taip:

- frakcija 2/5 mm – vidurinio ir apatinio sieto medžiaga. Ji gabenama transporteriu B06;
- frakcija 5/8 mm – viršutinio ir vidurinio sieto medžiaga. Ji gabenama transporteriu B07;
- frakcija 16/22 mm – viršutinio sieto medžiaga, kurios dalelių dydis yra nuo 8 mm iki 22 mm. Ji transporteriu B08 gabenama į vibracinį sijotuvą VS03, iš jo viršutinio sieto transporteriu B012;
- frakcija 11/16 mm – viršutinio ir vidurinio sieto medžiaga. Ji gabenama transporteriu B011;
- frakcija 8/11 mm – transporteriu B09 prabyrėjusi pro apatinį vibracinio sijotuvo VS03 sieta, gabenama transporteriu B010;
- frakcija 0/2 mm – medžiaga, prabyrėjusi pro vibracinių sijotuvų VS01 ir VS02 apatinius sietus, su vandeniu nubėga į dehidratorių ir iš jo gabenama transporteriu B05.

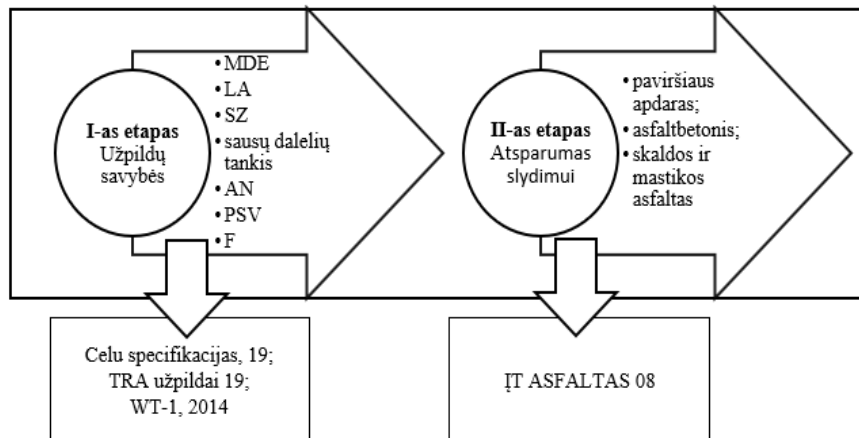
Kaip matyti iš 2.1 paveikslą, daugkartinio trupinimo dolomito užpildo technologija yra ypatinga tuo, kad naudojant 4-ą trupinimo etapą, kurio metu trupinant 16–45 mm dydžio užpildo daleles, kurių atsparumo smūgiams (*SZ*) vertė ≤ 22 %, pagaminamas daugkartinio trupinimo dolomito užpildas, kurio atsparumo smūgiams (*SZ*) vertė ≤ 18 %. Itin svarbu pažymėti, kad naudojant šią technologiją, užtikrinimas dolomito užpildo atsparumas smūgiams.

2.2. Eksperimentinių tyrimų objektas ir metodai

Atlikus užpildo savybių mokslinių tyrimų analizę, nustatyta, kad dar nėra atsakyti visi klausimai, susiję su daugkartinio trupinimo dolomito užpildu – ar jis gali pakeisti kitos rūšies užpildą – granitą, dažniausiai naudojamą kelio dangos viršutiniame sluoksnyje.

Rengiant disertaciją buvo sudarytas eksperimentinių tyrimų planas (2.2 pav.). Tyrimų plano įgyvendinimui, eksperimentinis tyrimas buvo suskirstytas į du eksperimentinių tyrimų etapus: 1-ame etape buvo numatyta eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais nustatyti dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikines ir mechanines savybes; 2-ame etape buvo numatyta atlikti natūrinius automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui tyrimus Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose automobilio kelio dangos viršutinis sluoksnis įrengtas su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją. Kadangi nebuvo aišku, kokios yra dolomito užpildo,

pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, fizikinių ir mechaninių savybių vertės bei minėto užpildo įtaka sunkiojo transporto apkrovai skirtų automobilių kelio viršutinės dangos eksploatacinėms savybėms.

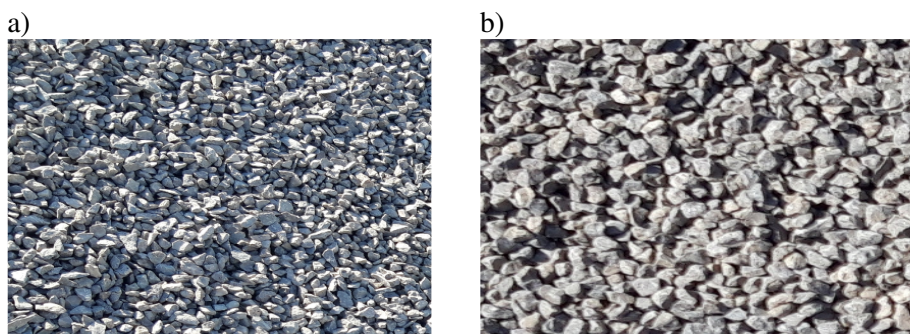


2.2 pav. Eksperimentinio tyrimo planas

Fig. 2.2. Plan of experimental research

Vadovaujantis 2.2 paveikslu, parengta laboratorinio eksperimentinio tyrimo seka, kuri pateikta 2.4 paveiksle. 1-o etapo laboratorinio eksperimentinio tyrimai atlikti dviejose laboratorijose: AB „Dolomitas“ laboratorijoje (DL) ir VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo instituto Automobilių kelių mokslo laboratorijoje. Tyrimams atlikti buvo atrinkti keturi dolomito ir tris granito užpildai, eksperimentinio tyrimo apimtis pateikta 2.1 lentelėje. Šiems užpildams suteikti tokie kodai:

- $D_{(P)}$ – dolomito užpildas, pagamintas iš Lietuvos Respublikoje Petrašiūnų 2 telkinyje išgautos dolomito uolienos, netaikant daugkartinio trupinimo užpildo technologijos, užpildo atsparumo smūgiams rodiklis SZ yra mažesnis arba lygus 22 % (2.3 pav. a);
- $D_{(I-III)}$ – dolomito užpildas, pagamintas iš Lietuvos Respublikoje Petrašiūnų 2 telkinyje išgautos dolomito uolienos, taikant daugkartinio trupinimo užpildo technologiją, užpildo atsparumo smūgiams rodiklis SZ yra mažesnis arba lygus 18 % (2.3 pav. b);
- $G_{(I)}$ – granito užpildas, pagamintas Baltarusijos Respublikoje;
- $G_{(II)}$ – granito užpildas, pagamintas Norvegijos Karalystėje;
- $G_{(III)}$ – granito užpildas, pagamintas Ukrainos Respublikoje.



2.3 pav. Dolomito užpildai: a) $D_{(P)}$; b) $D_{(I-III)}$

Fig. 2.3. Dolomite aggregates: a) $D_{(P)}$; b) $D_{(I-III)}$

2.1 lentelė. Eksperimentinio laboratorinio tyrimo, atlikto 1-ame etape, apimtis

Table 2.1. Scope of the experimental laboratory study performed in phase I

Tyrimų skaičius, vnt.	Savybė	Standarto žymuo
24 – D_P , D_{III} , G_{III}	Atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) (M_{DE})	EN 1097-1:2011
32 – $D_{(I)}$; $9^{1)}$ – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 24 – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$	Atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA)	EN 1097-2:2010
42 – D_I ; $9^{1)}$ – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ 24 – D_P , D_{III} , G_{III}	Atsparumas smūgiams (SZ)	EN 1097-2:2010
7 – $D_{(P)}$, $D_{(I-III)}$, $G_{(I-III)}$; $9^{1)}$ – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$	Sausųjų dalelių tankis	EN 1097-6:2013, priedas A4
2 – D_I ; $9^{2)}$ – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 18 – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$	Atsparumas poliravimui (PSV)	EN 1097-8:2009
24 – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$	Atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N)	EN 1097-9:2014
3 – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 21 ³⁾ – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$	Atsparumas šaldymui ir atšildymui (F)	EN 1367-1:2007

Tyrimai: ¹⁾ – 20 – 30 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičius, ²⁾ – 1-as standartinis ir nestandartiniai 2-jų bei 3-jų poliravimo ciklų skaičius; ³⁾ – 10 standartinių ir nestandartinių 20, 30, 40, 50, 75, 100 ir 150 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičius.

Kaip matyti iš 2.1 lentelėje pateiktos eksperimentinio laboratorinio tyrimo, atlikto 1-ame etape, apimties, užpildų savybių tyrimų skaičius sudarė 258 vnt. iš jų su $D_{(II-III)}$, kurio pavaizdavimas pateiktas 2.3 paveiksle, skaičius 137 vnt.

Eksperimentiniai užpildo $D_{(I)}$ tyrimai atlikti 2015–2016 metais; užpildų $D_{(P)}$; $D_{(II-III)}$; $G_{(I-III)}$ – 2017 metais.

Tęsiant eksperimentinių tyrimų planavimą, vadovaujantis 2.2 paveikslu, buvo parengta natūrinio eksperimentinio tyrimo seka, kuri pateikta 2.5 paveiksle.

Eksperimentinio tyrimo 2-o etapo metu atlikti natūriniai tyrimai Lietuvos valstybinės reikšmės kelių ruožuose. Matavimams atlikti buvo parinkti skirtingų automobilių kelio viršutinių dangų tipai: paviršiaus apdaras, asfaltbetonis AC 11 VS, skaldos ir mastikos asfaltas SMA 11 S. Parinktų dangų eksploatacijos trukmė – nuo dvejų iki septynerių metų. Eksperimentiniai natūriniai tyrimus buvo atlikti VILNIUS TECH Aplinkos inžinerijos fakulteto Kelių tyrimo institute. Siekiant vertinti eksperimentinio tyrimo rezultatus, užpildams buvo suteikti kodai $D_{(IV)}$ ir $G_{(IV)}$. $D_{(IV)}$ – panaudotas $D_{(I-III)}$ dolomito užpildas automobilių kelio viršutinėje dangoje; $G_{(IV)}$ – panaudotas $G_{(I-III)}$ granito užpildas automobilių kelio viršutinėje dangoje. Atliktų matavimų apimtis nurodyta 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Eksperimentinio tyrimo, atlikto 2-ame etape, apimtis

Table 2.2. Data from an experimental study conducted in Phase

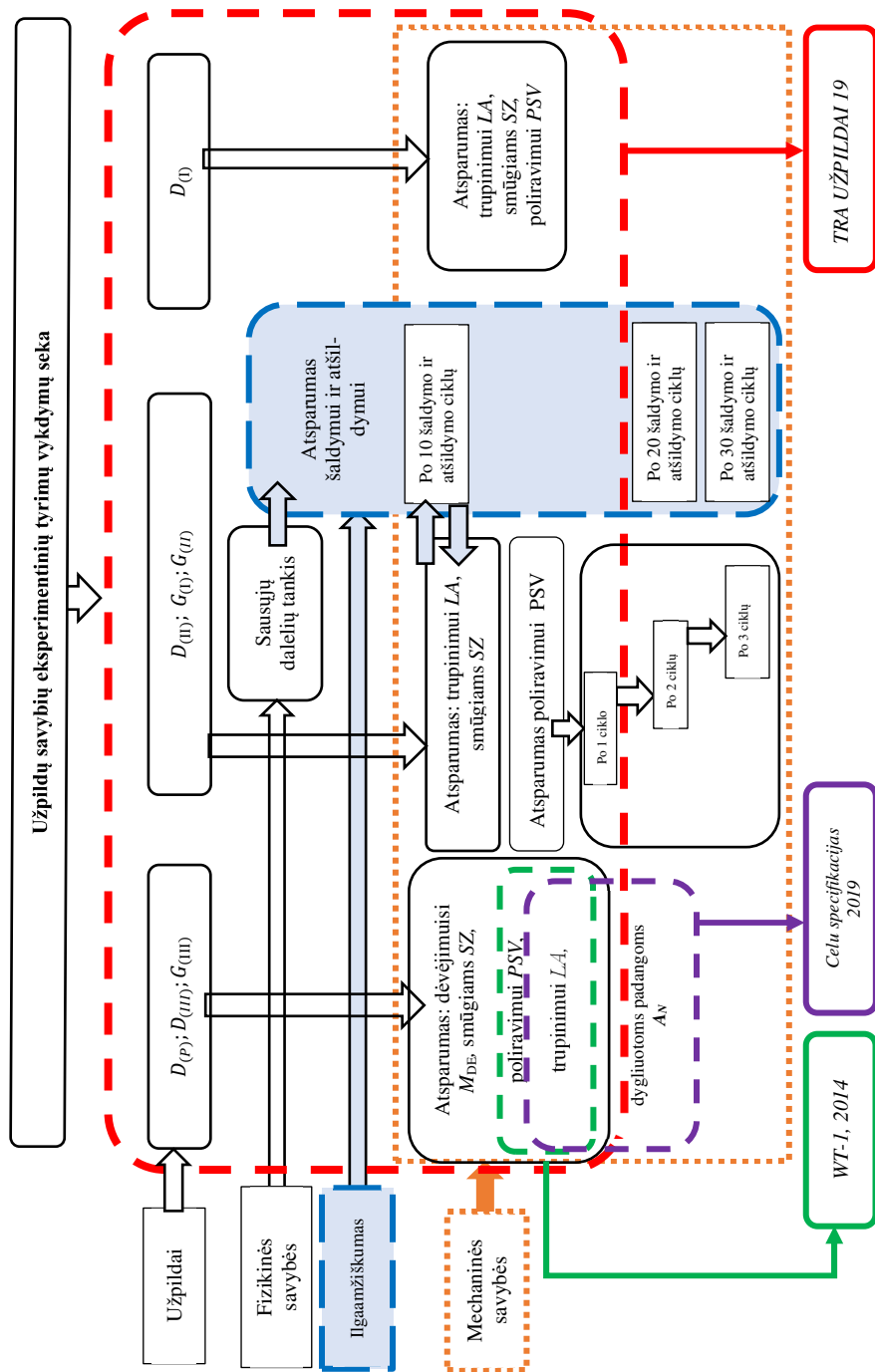
Kelio dangos tipas	Užpildas	Matavimų skaičius, vnt.
Paviršiaus apdaras	$D_{(IV)}$	932
	$G_{(IV)}$	730
Asfaltbetonis AC 11 VS	$D_{(IV)}$	623
	$G_{(IV)}$	1016
Skaldos ir mastikos asfaltas SMA 11 S	$D_{(IV)}$	2029
	$G_{(IV)}$	5672

Eksperimentinio tyrimo, pateikto lentelėje 2.2, apimtis sudarė 11 002 vnt., atliktų matavimų skirtingų automobilių kelio viršutinių dangų tipų: paviršiaus apdaras, asfaltbetonis, skaldos ir mastikos asfaltas. Matuotų kelio ruožų sąrašas pateiktas 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Kelio ruožai, kuriuose matuotas asfalto dangos paviršiaus atsparumas slydimui
Table 2.3. Measurements of a skid resistance to pavement surface on road sections

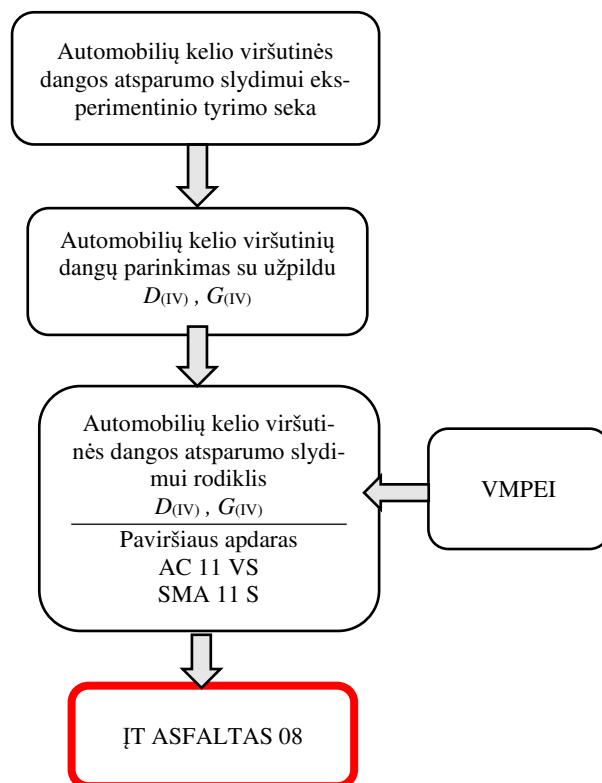
Užpildas	Danga	Įrengimo metai	Kelio Nr.	Kelias	Ruožo pradžia, km	Ruožo pabaiga, km	Ruožo ilgis, km
$D_{(IV)}$	Paviršiaus apdaras	2014	3404	Baisogala–Baisogalos g. st.	0,000	3,000	3,000
		2015	194	Užventis–Tryškiai–Vieکشniai	0,000	3,000	3,000
		2017	154	Šiauliai–Gruzdžiai–Naujoji Akmenė	5,000	6,000	1,000
$G_{(IV)}$		2016	5202	Vilnius–Turgečiai–Kurmeliūnys	11,980	13,870	1,890
					12,200	13,860	1,660
$D_{(IV)}$	AC 11 VS	2013	A4	Vilnius–Varenā–Gardinas	77,500	Sankryža su keliu Nr. 127	0,500
		2014	136	Vinčai–Pilviškiai–Vilkaviškis	18,000	30,000	3,000
$G_{(IV)}$		2016	130	Kaunas–Prienai–Alytus	19,380	22,315	2,935
					19,610	23,221	3,611
$D_{(IV)}$	SMA 11 S	2013	A3	Vilnius–Minskas	22,000	24,000	2,000
		2012	A15	Vilnius–Lyda	31,000	41,000	3,000
		2014	149	Smilgiai–Pakruojis	22,000	25,000	3,000
$G_{(IV)}$		2015	A6	Kaunas–Zarasai–Daugpilis	142,000	149,855	7,855
					142,000	149,000	7,000

Kaip matyti iš 2.3 lentelėje pateiktų iš duomenų apie kelio ruožus, kuriuose matuotas asfalto dangos paviršiaus atsparumas slydimui, viso išmatuotų kelio ruožų ilgis sudarė 43,451 km, iš jų 18,5 km su $D_{(IV)}$ užpildu. Eksperimentiniai natūriniai tyrimai buvo atlikti 2018 m., kelio ruožai su $G_{(IV)}$ užpildu papildomai matuoti 2020 m.



2.4 pav. 1-o etapo eksperimentinių tyrimų vykdymų seka

Fig. 2.4. Sequence of the stage I of experimental



2.5 pav. 2-ojo etapo eksperimentinių tyrimų vykdymų seka
Fig. 2.5. Sequence of Phase II experimental studies

Pateiktuose 2.4 ir 2.5 paveiksluose eksperimentinių tyrimų vykdymui naudoti eksperimentinio tyrimo metodai:

- 1-ame etape, atliekant laboratorinius eksperimentinius tyrimus, užpildai buvo tirti standartiniais metodais (2.1 lentelė). Metodų aprašymai pateikti A priede.
- 2-ame etape natūrinis tyrimas atliktas standartiniu metodu CEN/TS 15901-14:2016 (2.6 pav.).

Atliekant matavimus vasarą, į tą vietą, kur susiliečia ratas ir danga, dirbtinai buvo purškiamas vanduo, taip siekiant suformuoti 0,5 mm storio vandens plėvelę, kurios storis matuojant būtų kontroliuojamas. Vienas pagrindinių įtaiso privalumų – kintamas slydimo koeficientas. Jį galima nustatyti 0–80 % tikslumu, tačiau paprastai naudojama 18 %. Šie matavimai atlikti esant fiksuotam 18 % slydimo koeficientui. Atliekant matavimus, stengtasi išlaikyti kuo pastovesnį 60 km/h važiavimo greitį.



2.6 pav. ViaTech AS kelio analizatorius ir rašytuvas (CEN/TS 15901-14:2016)
Fig. 2.6. Road Analyser and Recorder of ViaTech AS (CEN/TS 15901-14:2016)

2.6 paveiksle pateiktas įtaisas, nustatantis išilginės trinties koeficientą išilgai kelio, matuojantis, kaip padanga sukibusi su kelio paviršiumi. Naudojami elektriniai stabdžiai ant matuojamo rato padeda kontroliuoti rato slydimo koeficientą ir nuolat (nenutrūkstamai) atlikti itin tikslūs matavimus įvairiomis klimato sąlygomis. Svarbu pastebėti, kad matuojamuose kelio ruožuose kuriuose buvo inžinerinių greičio mažinimo priemonių arba matuojamoje kelio dalyje stovėjo automobiliai, buvo matuojama pakartotinai.

2.3. Užpildų fizikinių ir mechaninių savybių eksperimentinis tyrimas

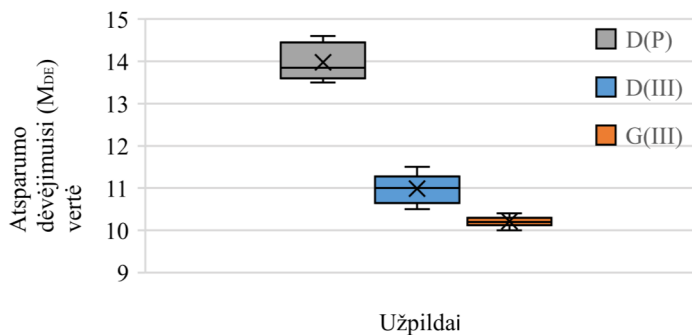
Atliktas 1-o etapo užpildų savybių, nurodytų 2.1 lentelėje, eksperimentinis tyrimas. Tyrimo metu gauti užpildų $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$:

- atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) (M_{DE}),
- atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA),
- atsparumas smūgiams (SZ),
- atsparumas poliravimui (PSV),
- atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N).

Gauti rezultatai pavaizduoti stačiakampėmis diagramomis (2.7, 2.8, 2.10, 2.13, 2.15 pav.). Jose pateiktas bendras matuojamo kintamojo imties centras, sklaida ir maksimali bei minimali reikšmės, apatinis ir viršutinis kvartiliai padalijami brūkšniais į dvi dalis, žyminčias medianą. Nuo stačiakampio kraštinių nubrėžtos tiesės, vadinamos „ūsais“, žymi maksimalią (į viršų) ir minimalią (į apačią) imties vertę. Atsiradus išskirčių, jos diagramoje pažymimos atskirai. Rezultatai grafiškai pateikti tikrinant, ar į duomenų aibę nepateko statistinių išskirčių, kurios neigiamai paveiktų statistinę analizę.

Bendrieji eksperimentinio tyrimo rezultatai, apskaičiuoti naudojantis „Microsoft Excel“, „IBM SPSS Statistics“ programų grupėmis, pateikti B priede. Atlikti užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ ilgaamžiškumo tyrimai. Užpildai buvo šaldomi ir atšildomi 10–30 ciklų, o paskui tik nustatomas atsparumas trupinimui (LA), atsparumas smūgiams (SZ), dalelių tankis ir fiksuojami masės nuostoliai. Atsparumo poliravimui (PSV), ilgaamžiškumo bandymas atliktas po standartinio, dvigubai ir trigubai didesnio poliravimo ciklų skaičiaus. Atsparumo šaldymui ir atšildymui (F) po standartinio 10, nestandartinio 20, 30, 40, 50, 75, 100 ir 150 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus. Šie tyrimo rezultatai pateikti histogramose (2.9, 2.11, 2.12, 2.16 pav.), PSV tyrimo rezultatai, pateikti 2.14 paveiksle.

Atlikus užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ eksperimentinį tyrimą, nustatytas atsparumas dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) (M_{DE}) (2.7 pav.).

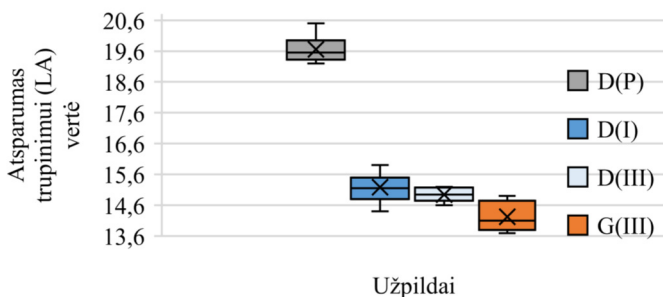


2.7 pav. Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumo dėvėjimuisi (M_{DE}) stačiakampės diagramos

Fig. 2.7. The aggregates $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ boxplot of resistance wear (M_{DE})

Analizuojant 2.7 paveiksle pateiktą atsparumo dėvėjimuisi (M_{DE}) užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ rezultatų sklaidą, nustatyta, kad užpildas $G_{(III)}$ yra 1,37 karto atsparesnis dėvėjimuisi nei užpildas $D_{(P)}$, užpildas $D_{(III)}$ yra 1,25 karto atsparesnis dėvėjimuisi nei užpildas $D_{(P)}$. Gautų rezultatų sklaidą lėmė tai, kad užpildas $D_{(III)}$ pagamintas trupinant keturiais etapais, o užpildas $D_{(P)}$ – trupinant trimis etapais. Apibendrinant konstatuojama, kad papildomas dolomito užpildo trupinimas sumažino skirtumą tarp užpildo $D_{(III)}$ ir $G_{(III)}$ 1,09 karto.

Atlikus užpildų $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ eksperimentinį tyrimą, nustatytas atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA) (2.8 pav.).

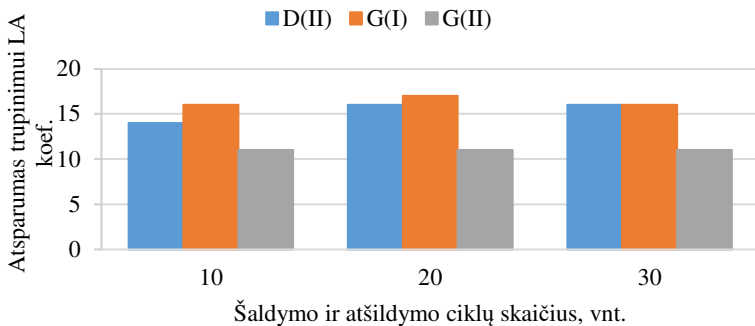


2.8 pav. Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumo trupinimui (LA) stačiakampės diagramos

Fig. 2.8. The aggregates $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ boxplot of resistance fragmentation (LA)

Analizuojant 2.8 paveiksle pateiktą atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA) užpildų rezultatų pasiskirstymą, nustatyta, kad užpildas $G_{(III)}$ yra 1,38 karto atsparesnis trupinimui nei užpildas $D_{(P)}$, užpildai $D_{(I)}$ ir $D_{(III)}$ – 1,29 ir 1,31 karto atsparesni trupinimui už užpildą $D_{(P)}$. Gautų rezultatų pasiskirstymą lėmė trupinimo etapų skaičius, nes užpildai $D_{(I)}$ ir $D_{(III)}$ pagaminti trupinant ke-turiais etapais, o užpildas $D_{(P)}$ – trimis etapais. Apibendrinant konstatuojama, kad papildomas dolomito užpildo trupinimas sumažino skirtumą tarp užpildo $D_{(I)}$, $D_{(III)}$ ir $G_{(III)}$ 1,05 ir 1,07 karto.

Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo trupinimui (LA) po 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus tyrimo rezultatai pateikti 2.9 paveiksle.



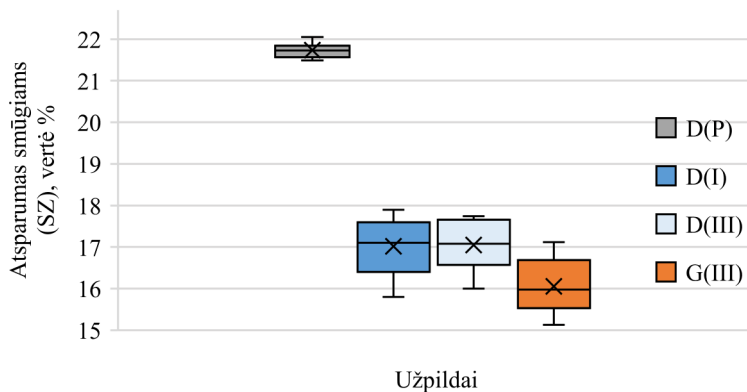
2.9 pav. Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo trupinimui (LA) po 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus tyrimo rezultatai

Fig. 2.9. The aggregates $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ of resistance fragmentation (LA) after 10–30 to freezing and thawing cycles test results

Analizuojant 2.9 paveiksle pateiktą atsparumą trupinimui ($L4$) po 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ rezultatų pasiskirstymą, nustatyta:

- užpildo $D_{(II)}$ po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų masės nuostoliai padidėjo 1,14 karto, o po 30 ciklų skaičiaus masės nuostoliai nedidėjo;
- užpildo $G_{(II)}$ šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus padidėjimas neturėjo įtakos masės nuostoliams;
- užpildo $G_{(I)}$ po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų masės nuostoliai padidėjo 1,06 karto, po 30 ciklų skaičiaus nekito.

Atlikus eksperimentinį tyrimą, užpildų $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumo smūgiams (SZ) rezultatai pateikti 2.10 paveiksle.

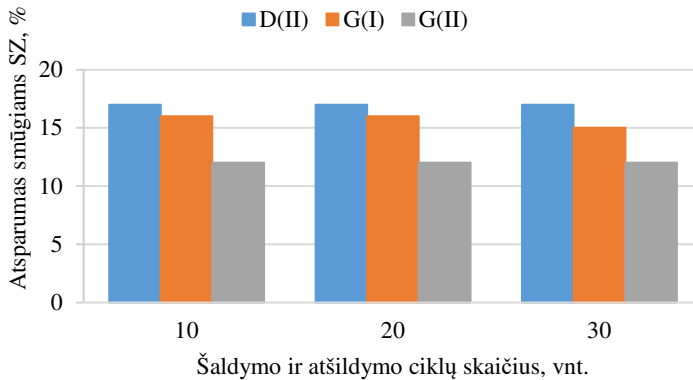


2.10 pav. Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumas smūgiams (SZ), stačiakampės diagramos

Fig. 2.10. The aggregates $D_{(P)}$, $D_{(I)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ boxplot of impact value (SZ)

Analizuojant 2.10 paveiksle pateiktą užpildų atsparumo smūgiams (SZ) rezultatų pasiskirstymą, nustatyta, kad užpildas $G_{(III)}$ yra 1,35 karto atsparesnis smūgiams nei užpildas $D_{(P)}$, užpildai $D_{(I)}$ ir $D_{(III)}$ – 1,279 ir 1,287 karto atsparesni smūgiams nei užpildas $D_{(P)}$. Gautų rezultatų pasiskirstymą lėmė tai, kad užpildai $D_{(I)}$ ir $D_{(III)}$ buvo pagaminti trupinant keturiais etapais, o užpildas $D_{(P)}$ – trimis etapais. Apibendrinant konstatuojama, kad papildomas dolomito užpildo trupinimas sumažino skirtumą tarp užpildo $D_{(I)}$ ir $G_{(III)}$ 1,05 ir 1,06 karto.

Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo smūgiams (SZ) po 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų tyrimo rezultatai pateikti 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo smūgiams (SZ) tyrimo, atliktus 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų, rezultatai

Fig. 2.11. The aggregate $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ impact resistance (SZ) test, results of 10–30 to freezing and thawing cycles

Analizuojant 2.11 paveiksle pateiktą užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo smūgiams (SZ) tyrimo, atliktus 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų, rezultatus, nustatyta:

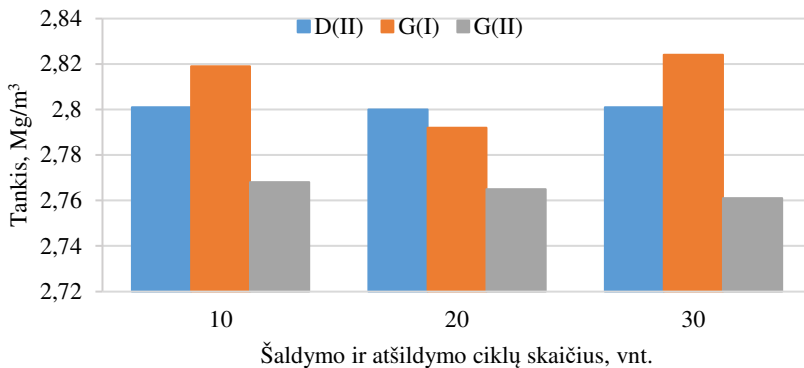
- užpildų $D_{(II)}$ ir $G_{(II)}$ šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus padidininimas neturėjo įtakos rezultatams, jie nepakito;
- užpildo $G_{(I)}$ po 30 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus masės nuostoliai sumažėjo 1,06 karto.

Nustatant užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ sausųjų dalelių tankį, atliktas eksperimentinis tyrimas, vadovaujantis A priede pateikta tyrimo metodika. Gauti užpildų tankiai: $D_{(II)}$ – 2,801 Mg/m³, $G_{(I)}$ – 2,792 Mg/m³, $G_{(II)}$ – 2,768 Mg/m³. Šie rezultatai statistiškai neapdoroti, nes maža tyrimų apimtis, be to, nėra duomenų sklaidos.

Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ sausųjų dalelių tankio po 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų tyrimo rezultatai pateikti 2.12 paveiksle.

Analizuojant 2.12 paveiksle pateiktą užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ dalelių tankio tyrimo rezultatus, atliktus 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų, nustatyta, kad:

- užpildų $D_{(II)}$ ir $G_{(II)}$ šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus padidininimas neturėjo įtakos rezultatams, jie nepakito;
- užpildo $G_{(I)}$ po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų rezultatas mažėjo 1,0 kartą, po 30 šaldymo ir atšildymo ciklų padidėjo 1,01 karto.



2.12 pav. Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ dalelių tankio tyrimo rezultatai, atlikus 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų

Fig. 2.12. The aggregates $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ of resistance density after 10-30 to freezing and thawing cycles test results

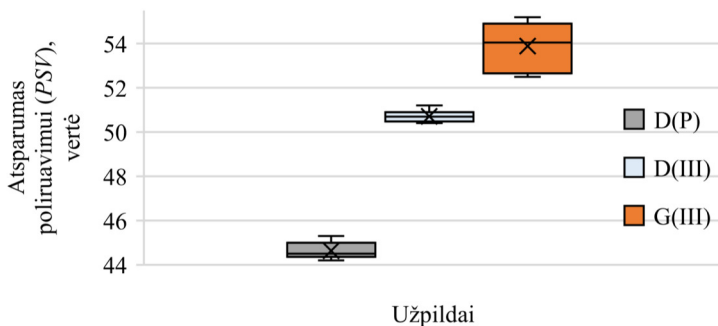
Nustatant užpildo $D_{(I)}$ ir užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumą poliravimui (PSV) atliktas eksperimentinis tyrimas, vadovaujantis A priede pateikta tyrimo metodika. Gauti užpildo $D_{(I)}$ rezultatai statistiškai neapdoroti, nes maža tyrimų apimtis, be to, nėra duomenų sklaidos (2.4 lentelė). Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ pateikti 2.13 paveiksle.

2.4 lentelė. Užpildo $D_{(I)}$ atsparumo poliravimui (PSV) tyrimų rezultatai

Table 2.4. The aggregate $D_{(I)}$ of resistance to polishing (PSV)

Bandinys	Badyimo Nr.	Vidutinės reikšmės			PSV vertė
		5 tyrimų	S	C	
1	I	50,2	50,2	53,2	50
		52,8			
	II	50,2			
		54,5			
2	I	47,9	49,0	51,9	50
		51,3			
	II	48,3			
		52,5			

2.4 lentelėje pateiktos (PSV) vertės bus naudojamos atliekant užpildų faktinių savybių ir norminių reikalavimų lyginamąją analizę.

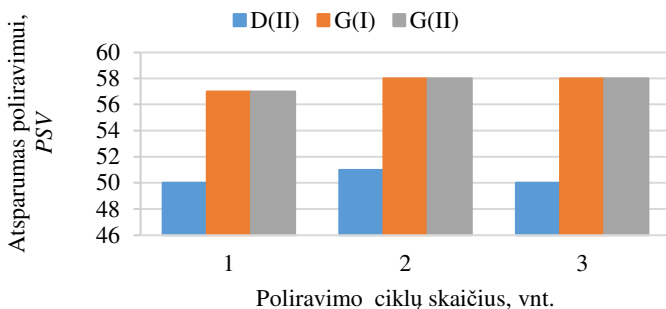


2.13 pav. Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumo poliravimui (PSV) stačiakampės diagramos

Fig. 2.13. The aggregates $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ boxplot of resistance to polishing (PSV)

Analizuojant 2.13 paveiksle pateiktą užpildų atsparumo poliravimui (PSV) rezultatų sklaidą, nustatyta, kad užpildas $G_{(III)}$ yra 1,208 karto atsparesnis poliravimui nei užpildas $D_{(P)}$. Užpildas $D_{(III)}$ – 1,13 karto atsparesnis poliravimui nei užpildas $D_{(P)}$. Gautų rezultatų pasiskirstymą lėmė tai, kad užpildas $D_{(III)}$ buvo pagamintas trupinant keturiais etapais, o užpildas $D_{(P)}$ – trimis etapais. Apibendrinant konstatuojama, kad papildomas dolomito užpildo trupinimas sumažina skirtumą tarp užpildo $D_{(III)}$ ir $G_{(III)}$ 1,068 karto.

Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo poliravimui, atlikus 1–3 poliravimo ciklą, (PSV) rezultatai pateikti 2.14 paveiksle.

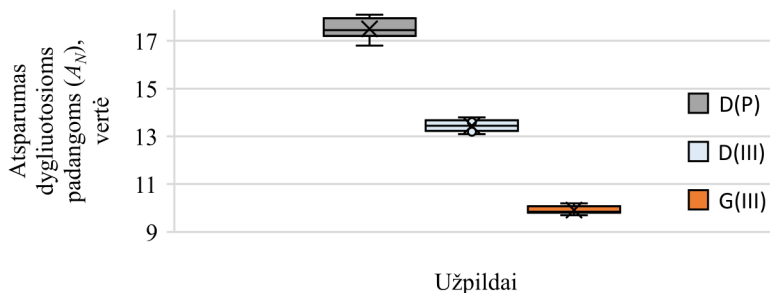


2.14 pav. Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo poliravimui (PSV), atlikus 1–3 poliravimo ciklus, tyrimo rezultatai

Fig. 2.14. The aggregates $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ of resistance to polishing (PSV) after 1–3 polishing cycles test results

Analizuojant 2.14 paveiksle pateiktą užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo poliravimui (PSI), atlikus 1–3 poliravimo ciklus, tyrimo rezultatus, nustatyta, kad poliravimo ciklų skaičiaus didinimas neturėjo įtakos užpildų atsparumo poliravimui.

Atliktas užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N) bandymas (2.15 pav.).

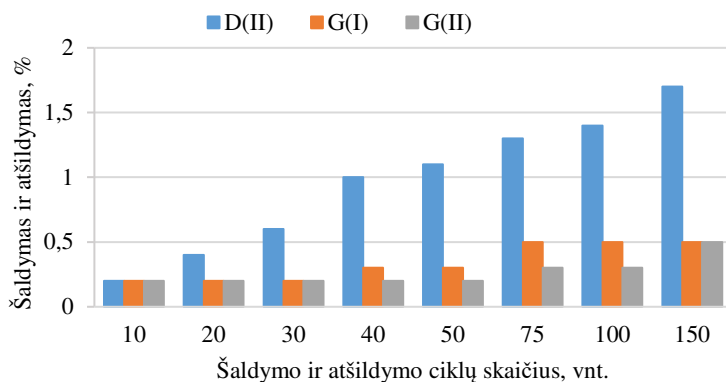


2.15 pav. Užpildų $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N), stačiakampė diagrama

Fig. 2.15. The aggregates $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$ boxplot of resistance to studded tires (A_N)

Analizuojant 2.15 paveiksle pateiktą užpildų atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N) rezultatų sklaidą, nustatyta, kad užpildas $G_{(III)}$ yra 1,7 karto atsparesnis dilimui dėl dygliuotųjų padangų nei užpildas $D_{(P)}$, užpildas $D_{(III)}$ – 1,29 karto atsparesnis dilimui dėl dygliuotųjų padangų už užpildą $D_{(P)}$. Gautų rezultatų pasiskirstymą lėmė tai, kad užpildas $D_{(III)}$ buvo pagamintas trypinant keturiais etapais, o užpildas $D_{(P)}$ – trimis etapais. Apibendrinant konstatuojama, kad papildomas dolomito užpildo trypinimas sumažina skirtumą tarp užpildo $D_{(III)}$ ir $G_{(III)}$ 1,36 karto.

Ištirtas užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumas šaldymui ir atšildymui (F), atlikus standartinį dvigubai ir trigubai didesnę šaldymo bei atšildymo ciklų skaičių. Gauti grafiniai eksperimentinio tyrimo rezultatai pateikti 2.16 paveiksle. Analizuojant 2.16 paveiksle pateiktą užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo šaldymui ir atšildymui rezultatus, atlikus 10–150 šaldymo ir atšildymo ciklų, nustatyta, kad, po standartinio 10 ciklų šaldymo ir atšildymo skaičiaus, gautas 0,2 %, t. y. vienodas, užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumas šaldymui ir atšildymui. Didinant šaldymo bei atšildymo ciklus nuo 20 iki 150 ciklų, eksperimento tyrimo rezultatai pasiskirstė taip: užpildo $D_{(II)}$ masės nuostoliai pakito nuo 0,4 % iki 1,7 %, užpildų $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ – nuo 0,2 % iki 0,5 %.



2.16 pav. Užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ atsparumo šaldymui ir atšildymui rezultatai
Fig. 2.16. The aggregates $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$ of resistance to freezing and thawing results

Atlikus 150 šaldymo ir atšildymo ciklų, $D_{(II)}$ užpildas yra 2,4 karto mažiau atsparus šaldymo ir atšildymo poveikiui nei užpildas $G_{(II)}$ (2.16 pav.).

1-o etapo metu buvo atliktų eksperimentinio laboratorinio tyrimų rezultatai pateikti 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Užpildo fizinių ir mechaninių savybių vertės

Table 2.5. Values of physical and mechanical properties of aggregate

Užpildas	M_{DE}	LA	$SZ, \%$	Sausųjų dalelių tankis, Mg/m^3	PSV	A_N	F, %
$D_{(P)}$	14,0	19,7	21,5	2,760	44	17,5	
$D_{(I)}$		15,2	16,8	2,800	50		
$D_{(II)}$		15,3	16,6	2,801			0,2
		1)14/16/16	1)17/17/17	1)2,801/2,800/2,801	2)50/51/50		3)0,4/0,6/1,0/1,1/1,3/1,4/1,7
$D_{(III)}$	11,2	15,0	16,7	2,790	51	13,5	
$G_{(I)}$		16,4	15,8	2,792			0,2
		1)16/16/16	1)16/16/15	1)2,819/2,792/2,824	2) 57/58/58		3)0,2/0,2/0,3/0,3/0,5/0,5/0,5
$G_{(II)}$		11,7	12,1	2,768			0,2
		1)11/11/11	1)12/12/12	1)2,786/2,765/2,761	2)57/8/58		3)0,2/0,2/0,2/0,2/0,3/0,3/0,5
$G_{(III)}$	10,2	14,2	15,9	2,800	53	9,9	

1), 2), 3) – ilgaamžiškumo tyrimai $LA^{(1)}$, $SZ^{(1)}$, sausųjų dalelių tankio¹⁾, $PSV^{(2)}$; $F^{(3)}$.

Apibendriname, kad 1-o etapo metu buvo atlikti eksperimentiniai laboratoriniai tyrimai: sausųjų dalelių tankio; atsparumo dėvėjimuisi (mikro-Devalio koeficientas) (M_{DE}); atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA); atsparumo smūgiams (SZ); atsparumo poliravimui (PSV); atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų (A_N); atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas) (LA), atsparumo smūgiams (SZ), dalelių tankio, atsparumo šaldymui ir atšildymui (F) (po standartinio 10, nestandartinio 20, 30, 40, 50, 75, 100 ir 150 šaldymo ir atšildymo ciklą skaičiaus); atsparumas poliravimui (PSV) po pirmo standartinio, nestandartinio dviejų bei trijų poliravimo ciklą.

Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui pokyčiams vertinti kelio eksploatacijos metu buvo atliktas 2-o etapo eksperimentinis tyrimas – natūriniai tyrimai Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose asfalto dangos viršutinis sluoksnis įrengtas iš asfalto mišinio su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją.

2.4. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui tyrimas

Eksperimentinio tyrimo 2-ame etape atlikti automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimo Lietuvos valstybinės reikšmės kelių ruožuose natūriniai matavimai (2.5 pav.). Tirtas daugkartinio trupinimo dolomito užpildas automobilių kelio viršutinėje dangoje, vadovaujantis 2.2 paveiksle pateiktu eksperimento tyrimo planu. VMPEI pokyčio analizei atlikti iš LAKIS (Lietuvos automobilių kelių informacijos sistemos duomenų bazė) surinkti kelio ruožų VMPEI duomenys, periorde, kai įrengta asfalto danga, iki kai buvo atlikti natūriniai matavimai.

2.4.1. Automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui matavimai

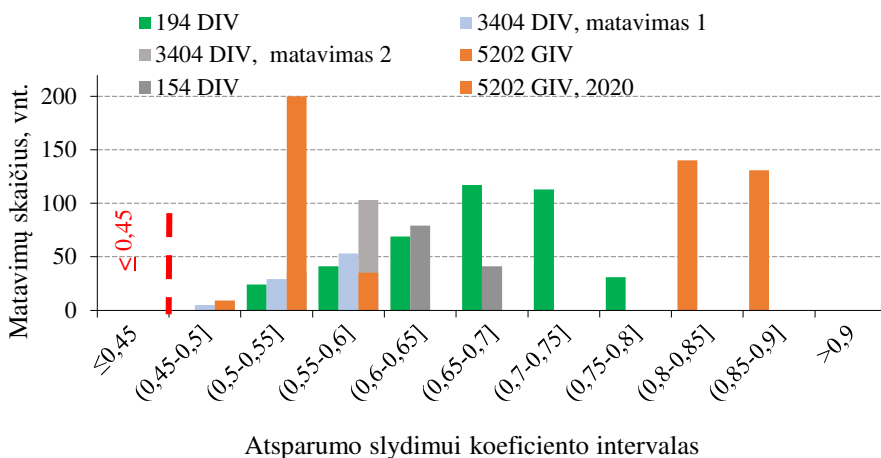
Išmatuotas automobilių kelio viršutinės dangos atsparumas slydimui kelių ruožuose (2.3 lentelė), kurių automobilių kelio viršutinėje dangoje buvo panaudoti $D_{(IV)}$ ir $G_{(IV)}$ užpildai.

Šių matavimų rezultatai pateikti D priede. Siekiant matavimo duomenis analizuoti, matavimų rezultatai perskaičiuoti esant 95 % tikimybei. Remiantis perskaičiuotais rezultatais, sudarytos histogramos (E priedas). Paviršiaus atsparumo slydimui rezultatų pasiskirstymas paviršiaus apdaras, AC 11VS bei SMA 11S asfalto dangose pateiktas 2.6 lentelėje ir 2.17–2.19 paveiksluose.

2.6 lentelė. Atsparumo slydimui pasiskirstymas: paviršiaus apdaras, AC 11 VS bei SMA 11 S asfalto dangose

Table 2.6. Distribution of skid resistance coefficient in surface dressing, AC 11 VS and SMA 11 S - pavement surfaces

Atsparumo slydimui intervalas	Dangos tipas, užpildas, atsparumo slydimui procentinė išraiška intervale, %					
	Paviršiaus apdaras		AC 11 VS		SMA 11 S	
	$D_{(IV)}$	$G_{(IV)}$	$D_{(IV)}$	$G_{(IV)}$	$D_{(IV)}$	$G_{(IV)}$
$\leq 0,30$	–	–	–	–	0,00	0,00
$(0,3-0,35]$	–	–	–	–	0,29	0,00
$(0,35-0,4]$	–	–	–	–	34,42	0,00
$(0,4-0,45]$	–	–	0,00	0,00	41,42	0,00
$(0,45-0,5]$	0,66	1,75	0,00	44,78	20,81	0,00
$(0,5-0,55]$	11,84	38,83	39,88	5,51	3,07	1,46
$(0,55-0,6]$	26,19	6,80	12,46	26,67	0,00	15,65
$(0,6-0,65]$	21,14	0,00	24,61	23,04	0,00	12,29
$(0,65-0,7]$	21,01	0,00	12,46	0,00	0,00	0,00
$(0,7-0,75]$	15,03	0,00	5,61	0,00	0,00	6,77
$(0,75-0,8]$	4,12	0,00	3,74	0,00	0,00	33,69
$(0,8-0,85]$	0,00	27,18	1,25	0,00	0,00	30,15
$(0,85-0,9]$	0,00	24,44	0,00	0,00	0,00	0,00
$>0,9$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



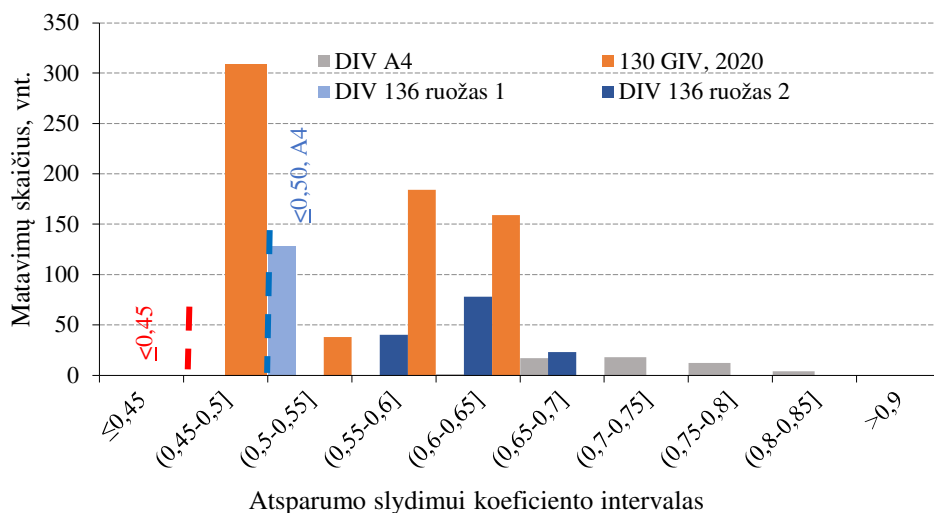
2.17 pav. Atsparumo slydimui pasiskirstymas paviršiaus apdaro
Fig. 2.17. Distribution of skid resistance in surface dressing

2.17 paveiksle pateikti paviršiaus apdaro dangos su užpildais $D_{(IV)}$ ir $G_{(IV)}$ atsparumo slydimui matavimo rezultatų pasiskirstymas. Nustatytas užpildo $D_{(IV)}$ mažiausias – 0,66 % – pasiskirstymas intervale (0,45–0,5], didžiausias – daugiau nei 26 % intervale (0,55–0,6]. Nenustatyta reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę – 0,45 – vertę.

Atsparumo slydimui matavimo rezultatų pasiskirstymą paviršiaus apdaro dangoje su $G_{(IV)}$ užpildu, taip pat nenustatyta reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę – 0,45 – vertę. 2018 m. atlikus matavimus, nustatytas mažiausias atsparumo slydimui reikšmių pasiskirstymas yra 1,77 % intervale (0,45–0,5]. Svarbu pažymėti, kad jis daugiau nei du kartus didesnis už $D_{(IV)}$ užpildo. Pakartotinai išmatavus atsparumą slydimui 2020 m., nustatyta, kad jo intervalas sumažėjo per tris intervalus: nuo (0,8–0,9] iki (0,45–0,6].

Matuotas paviršiaus apdaro dangos su $D_{(IV)}$ užpildu atsparumas slydimui. Pirma kartą išmatavus rajoninio kelio Nr. 3404 ruožą, nustatytas atsparumas slydimui $0,54 \pm 0,074$, antrą kartą – $0,55 \pm 0,043$, išmatavus krašto kelio Nr. 194 ruožą, gautas atsparumas slydimui $0,6643 \pm 0,0633$, išmatavus krašto kelio Nr. 154 ruožą, šis koeficientas buvo $0,638 \pm 0,0133$.

Paviršiaus apdaro dangos su $G_{(IV)}$ užpildu atsparumas slydimui rajoninio kelio Nr. 5202 ruože – $0,85 \pm 0,018$, 2020 m. pakartotinai išmatavus, nustatyta, jog šis koeficientas yra $0,59 \pm 0,0263$.



2.18 pav. Atsparumo slydimui pasiskirstymas AC 11 VS dangose

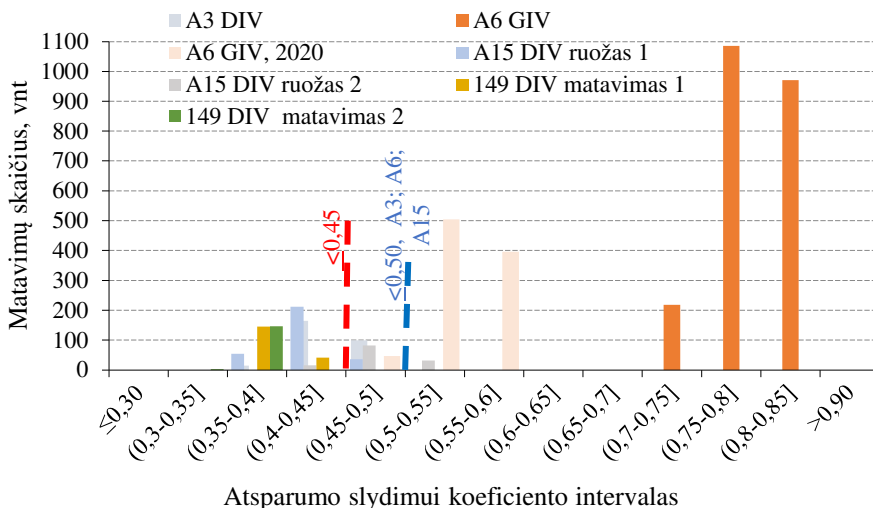
Fig. 2.18. Distribution of skid resistance in AC 11 VS pavement

2.18 paveiksle pateikti atsparumo slydimui matavimo rezultatai pasiskirstę AC 11 VS dangoje su $D_{(IV)}$ užpildu, didžiausias – 39,88 % – rezultatų pasiskirstymas nustatytas intervale (0,5–0,55], mažiausias – 1,25 % – pasiskirstymas gautas intervale (0,8–0,85]. Nenustatyta reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę 0,45 ir 0,50 vertes.

AC 11 VS dangoje su $G_{(IV)}$ užpildu 2018 m. matavimų atsparumo slydimui rezultatai pasiskirstę taip: mažiausias – 5,51 % pasiskirstymas intervale (0,5–0,55], didžiausias – 26,67 % intervale (0,55–0,6]. Pakartotinai atlikus atsparumo slydimui matavimus 2020 m., nustatyta, kad atsparumo slydimui intervalas sumažėjo per vieną intervalą – nuo (0,5–0,55] iki (0,45–0,5]. Analizuojant atsparumo slydimui matavimo rezultatų pasiskirstymą su $G_{(IV)}$ užpildu, taip pat nenustatyta reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę – 0,45 – vertę.

Nustatyta, kad asfaltbetonio AC 11 VS dangos su $D_{(IV)}$ užpildu atsparumas slydimui magistraliniame kelio Nr. A4 ruože – $0,72 \pm 0,0455$. Taip pat nustatyta, kad atsparumas slydimui pirmajame krašto reikšmės kelio Nr. 136 ruože – $0,52 \pm 0,014$, antrajame – $0,66 \pm 0,026$. Asfaltbetonio AC 11 VS dangos su $G_{(IV)}$ užpildu atsparumas slydimui krašto kelio Nr. 130 ruože – $0,58 \pm 0,0301$, išmatavus 2020 m. gautas koeficientas $0,46 \pm 0,0156$, taigi atitinka pradinę ribinę 0,45 vertę.

Svarbu pažymėti, kad nenustatyta verčių, kurios neatitiktų 0,50 reikalavimo magistralinio ir 0,45 krašto reikšmių keliuose su $D_{(IV)}$ ir $G_{(IV)}$ užpildais.



2.19 pav. Atsparumo slydimui pasiskirstymas SMA 11 S dangoje

Fig. 2.19. Distribution of skid resistance in SMA 11 S pavement

2.19 paveiksle pateiktas atsparumo slydimui rezultatų pasiskirstymas SMA 11 S dangoje su $D_{(IV)}$ užpildu, aptikta 76 % reikšmių, mažesnių už pradinę

ribinę 0,45 vertę, ir 96 % reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę 0,50 vertę (2.5lentelė). Didžiausias – 41,42 % – rezultatų pasiskirstymas nustatytas intervale (0,4 – 0,45], mažiausias – 0,29 % – intervale (0,3–0,35]. Analizuojant atsparumo slydimui matavimo rezultatų pasiskirstymą SMA 11 S dangoje su $G_{(IV)}$ užpildu, nenustatyta reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę 0,5 vertę. Atlikus 2018 m. matavimus, nustatytas mažiausias 1,46 % atsparumo slydimui reikšmių pasiskirstymas intervale (0,5–0,55], didžiausias – 15,65 % intervale (0,55–0,6]. Pakartotinai atlikus atsparumo slydimui matavimus 2020 m., nustatyta, kad atsparumo slydimui intervalas sumažėjo per vieną intervalą – nuo (0,7 –0,75] iki (0,6–0,65].

Atsparumas slydimui skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangos su $D_{(IV)}$ užpildu magistralinių kelių Nr. A3 ruože – $0,43 \pm 0,023$ ir Nr. A15 pirmajame ruože – $0,43 \pm 0,021$, antrajame ruože – $0,47 \pm 0,0245$. Gautos vertės neatitinka pradinės ribinės 0,50 vertės. Pirmąkart išmatavus krašto reikšmės kelio Nr. 149 ruožą, gautas atsparumas slydimui $0,38 \pm 0,017$, antrąkart – $0,39 \pm 0,044$. Abiejų matavimų apskaičiuotos vertės mažesnės už pradinę ribinę 0,45 vertę. Atsparumas slydimui skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangos su $G_{(IV)}$ užpildu magistralinio kelio Nr. A6 ruože – $0,79 \pm 0,03$, išmatavus 2020 m., gautas koeficientas $0,59 \pm 0,0233$ atitinka pradinę ribinę 0,50 vertę.

Pažymėtina, kad atsparumo slydimui vertės magistralinių kelių Nr. A3 ir Nr. A15 ruožų SMA 11 S dangose su $D_{(IV)}$ užpildu neatitiko pradinės ribinės 0,50 vertės, kaip ir atsparumo slydimui vertė krašto kelio Nr. 149 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu nepasiekė pradinės ribinės 0,45 vertės. Su $G_{(IV)}$ užpildu nenustatyta atsparumo slydimui verčių, kurios neatitiktų pradinės ribinės 0,50 vertės magistralinio kelio Nr. A6 ruože, SMA 11 S danga.

Apibendrinant gautas eksperimentinio tyrimo atsparumo slydimui vertes su $G_{(IV)}$ užpildu tirtuose kelių ruožuose, pažymėtina, kad nenustatyta paviršiaus apdaro AC 11VS, SMA 11 S tipų dangose verčių, kurios neatitiktų pradinės ribinės 0,45 vertės krašto rajoninių kelių ruožuose ir pradinės ribinės 0,50 vertės magistralinio kelio ruožuose. Tačiau po dvejų metų pakartotinai išmatavus paviršiaus apdaro AC 11 VS ir SMA 11 S tipų dangose su $G_{(IV)}$ užpildu atsparumą slydimui, nustatyta, kad atsparumo slydimui paskirstymo intervalai sumažėjo nuo vieno iki trijų intervalų: paviršiaus apdaras nuo (0,8–0,9] iki (0,45–0,6], AC 11 VS – nuo (0,5–0,55] iki (0,45–0,5], SMA – 11 S nuo (0,7–0,75] iki (0,6–0,65].

Apibendrinant gautas eksperimentinio tyrimo atsparumo slydimui vertes su $D_{(IV)}$ užpildu tirtuose kelių ruožuose, pažymėtina, kad paviršiaus apdaro AC 11 VS tipų dangose nenustatyta atsparumo slydimui verčių, kurios neatitiktų pradinės ribinės 0,45 vertės krašto bei rajoninių kelių ruožuose ir 0,50 vertės magistralinio kelio ruožuose. Tačiau SMA 11 S kelio ruožuose aptikta 76 % reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę 0,45 vertę krašto kelių ruožuose, ir 96 % reikšmių, mažesnių už pradinę ribinę 0,50 vertę magistralinių kelių ruožuose.

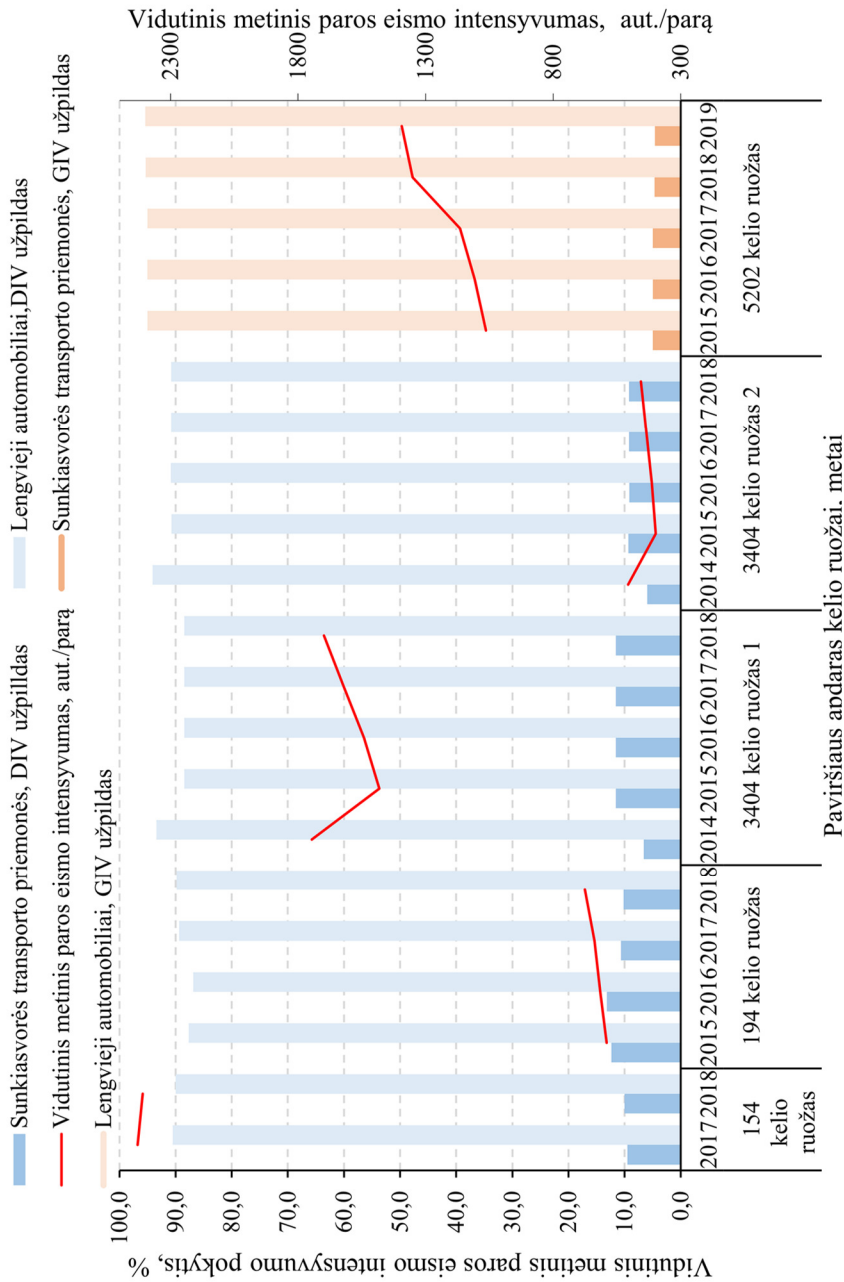
Todėl siekiant vertinti užpildo $D_{(IV)}$ tinkamumą automobilių kelio viršutinėje dangoje, paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS ir skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S per pirmuosius penkerius automobilio kelio eksploatacijos metus reikia atlikti VMPEI analizę, atsižvelgiant į dangos tipą, užpildo rūšį, sunkiojo transporto vidutinį metinį paros eismo intensyvumą, taip pat į kelio ruožų eksploataavimo trukmę.

2.4.2. Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo pokyčio analizė

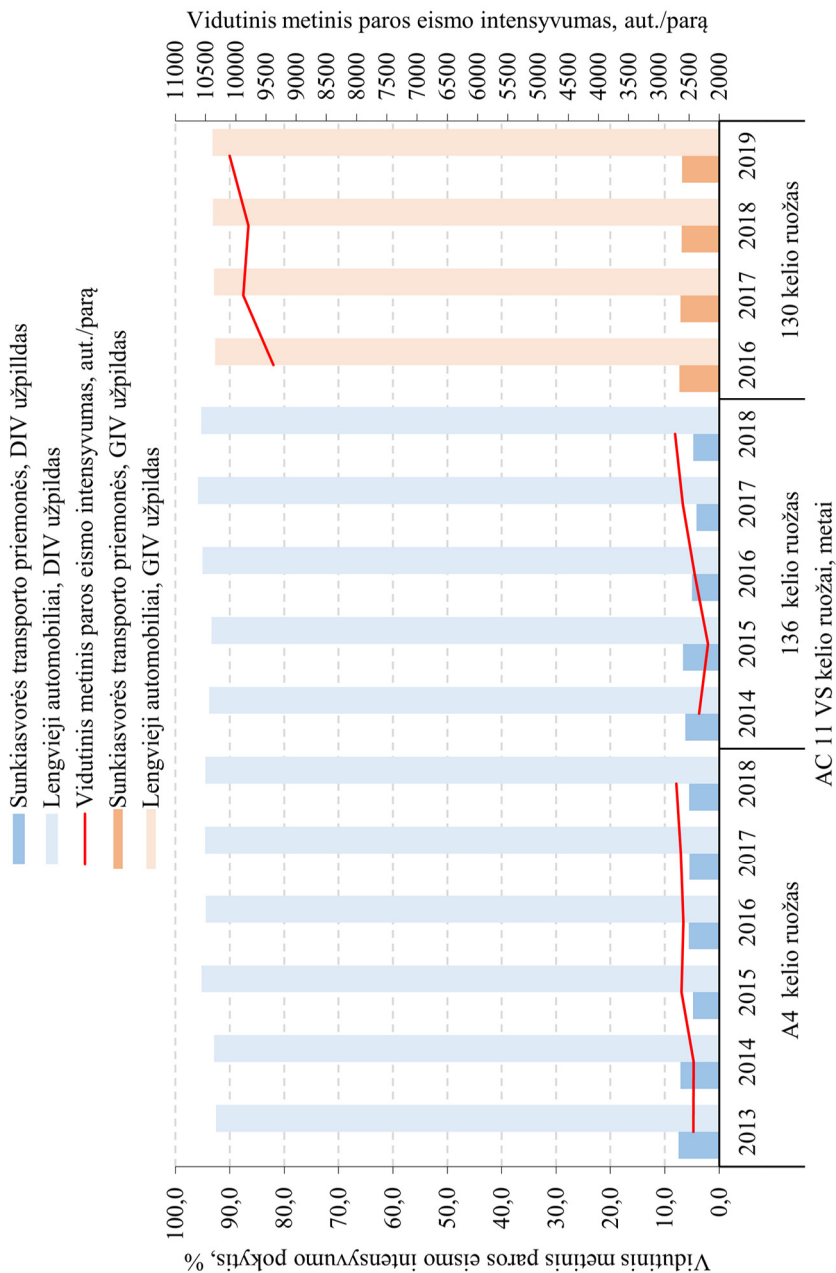
Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo (VMPEI) pokyčio analizei atlikti buvo surinkti iš LAKIS 2-o etapo eksperimentinio tyrimo tiriamųjų kelio ruožų VMPEI duomenys periodu nuo automobilių kelio viršutinės dangos įrengimo iki eksperimentinio tyrimo kelio ruožų. Matavimų duomenys pateikti C priede, analizė pateikta 2.20–2.22 paveiksluose.

2.20 paveiksle pateiktas VMPEI pokytis paviršiaus apdaro krašto kelio Nr. 154 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu tuo periodu, kai buvo įrengta kelio danga (t. y. nuo 2017 m. iki 2018 m.). Nustatytas VMPEI pokytis – 1,0 % mažėjimas, sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytis – 0,5 % didėjimas. Įvertinus sunkiasvorių transporto priemonių pokytį krašto kelio Nr. 194 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu, nustatytas pokytis nuo 2015 m. iki 2018 m. – 2,2 % mažėjimas, VMPEI pokytis – 12,6 % didėjimas.

Analizuotas rajoninio kelio Nr. 3404 ruožas su $D_{(IV)}$ užpildais susideda iš dviejų kelio ruožų. Įvertinus 1-ojo ruožo sunkiasvorių transporto priemonių pokytį, nustatyta, kad įrengus kelio dangą (t. y. nuo 2014 iki 2015 m.) pokytis padidėjo 4,9 %, paskui iki 2018 m. nekito, pokytis – didėjimas 11,5 %. Analizuojant VMPEI pokytį 2015 m., matyti, kad jis sumažėjo 15,2 %, o iki 2018 m. padidėjo 12,9 %, pokytis – 2,6 % mažėjimas. Įvertinus sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį kelio Nr. 3404 2-ame ruože su $D_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2014 m., kai buvo įrengta kelio danga, iki 2015 m. pokytis padidėjo 3,4 %, iki 2018 m. nekito, pokytis – 9,2 % mažėjimas. VMPEI nuo 2014 m. iki 2018 m. sumažėjo 21,3 % (2015 m.), iki 2018 m. padidėjo 12,7 %, pokytis – 9,5 % didėjimas. Analizuojant sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį kelio Nr. 5202 ruože su $G_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2015 m., kai buvo įrengta kelio danga, iki 2020 m. jis sumažėjo, pokytis – 0,5 %, VMPEI pokytis – 31,1 % didėjimas.

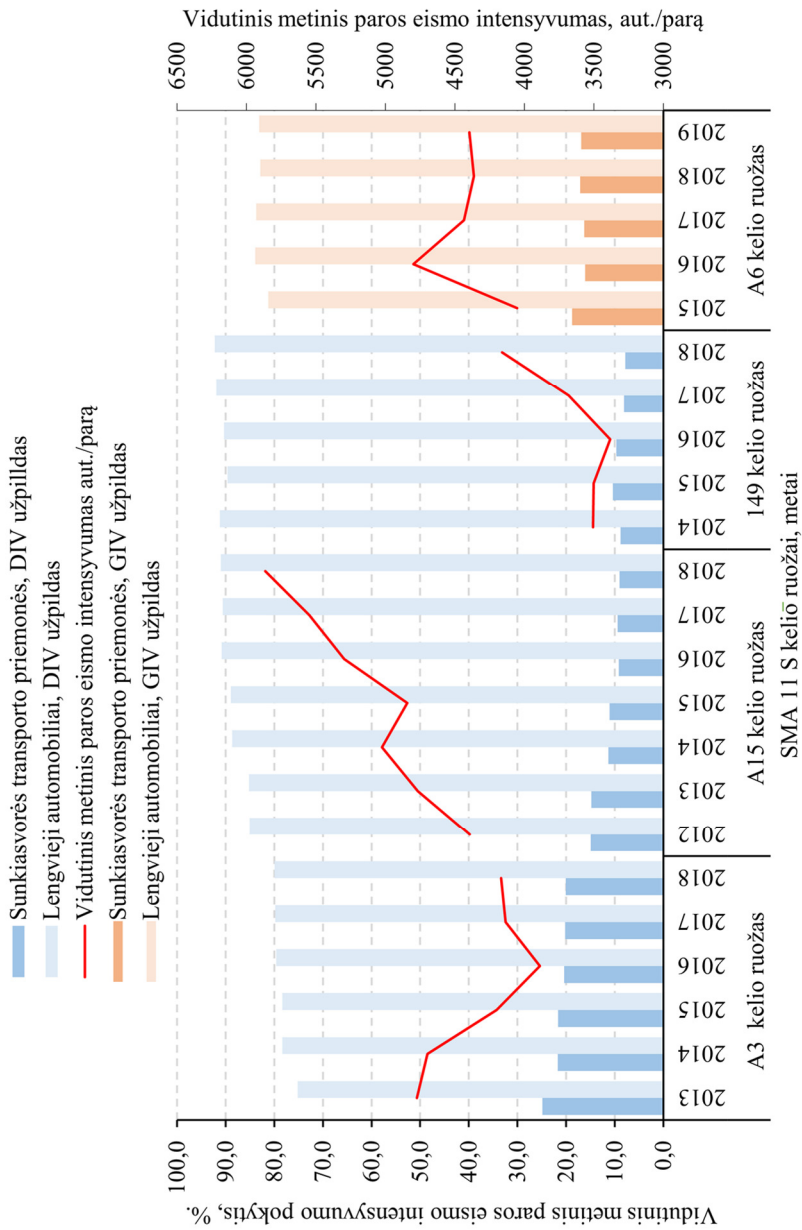


2.20 pav. VMPEI pokytis paviršiaus apdaro kelio dangų ruožuose
Fig. 2.20. AADT, change in surface dressing road sections



2.21 pav. VMPEI pokytis AC 11 VS asfalto dangų ruožuose

Fig. 2.21. AADT, change in AC 11 VS road sections



2.22 pav. VMPEI pokytis SMA 11 S asfalto dangų ruožuose

Fig. 2.22. AADT change in SMA 11 S road sections

Analizuojant 2.22 paveiksle pateiktą sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį magistraliniame kelio Nr. A3 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2013 m., kai buvo įrengta asfalto danga, iki 2018 m. jis sumažėjo, pokytis – 4,7 % mažėjimas. VMPEI tuo laikotarpiu pasiskirstė taip: nuo 2013 m. iki 2016 m. sumažėjo 18,5 %, paskui pakilo 7,2 %, pokytis – 13,0 % mažėjimas.

Analizuojant sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį kelio Nr. A15 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2012 m., kai buvo įrengta asfalto danga, iki 2018 m. pokytis – 5,9 % mažėjimas. VMPEI tuo laikotarpiu pasiskirstė taip: nuo 2012 m. iki 2014 m. padidėjo 12,5 %, 2015 m. sumažėjo 3,6 %, nuo 2016 m. iki 2018 m. padidėjo 17,8 %, pokytis – 33,4 % didėjimas.

Analizuojant sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį kelio Nr. 149 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2014 m., kai buvo įrengta asfalto danga, iki 2018 m., pokytis – 1,0 % didėjimas. VMPEI tuo laikotarpiu pasiskirstė taip: nuo 2014 m. iki 2015 m. beveik nepakito, 2016 m. sumažėjo 3,4 %, nuo 2016 iki 2018 m. padidėjo 18,6 %, pokytis – 18,6 % didėjimas.

Analizuojant sunkiasvorių transporto priemonių kiekio pokytį kelio Nr. A6 ruože su $G_{(IV)}$ užpildu, nustatyta, kad nuo 2015 m., kai buvo įrengta asfalto danga, iki 2016 m. jis sumažėjo, pokytis – 1,7 % mažėjimas. VMPEI tuo laikotarpiu pasiskirstė taip: nuo 2015 iki 2016 m. pakilo 15,5 %, 2017 m. sumažėjo 7,6 %, nuo 2017 m. iki 2019 m. sumažėjo 0,9 %, pokytis – 8,5 % didėjimas.

Gauti natūrinio tyrimo rezultatai bus naudojami užpildui $D_{(IV)}$, panaudotam automobilių kelio viršutinėje dangoje, asfalto dangose AC 11 VS, SMA 11 S ir paviršiaus apdarui, ir dangų paviršiaus atsparumo slydimui verčių sumažėjimui įvertinti per pirmuosius penkerius metus.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus daugkartinio trupinimo dolomito užpildo technologiją pateiktas detalus jos aprašymas, pažymint užpildo technologijos unikalumą, kad naudojant 4-ą trupinimo etapą, kurio metu trupinant 16–45 mm dydžio užpildo daleles, kurių atsparumo smūgiams (SZ) vertė ≤ 22 %, pagaminamas daugkartinio trupinimo dolomito užpildas, kurio atsparumo smūgiams (SZ) vertė ≤ 18 %.
2. Apibendrinant antrajame skyriuje pateiktus eksperimentinio tyrimo daugkartinio trupinimo dolomito užpildo savybių vertes galima teigti, kad:
 - 2.1. Atsparumo dėvėjimuisi (mikro Devalio koeficientas), atsparumo trupinimui (Los Andželo koeficientas), atsparumo smūgiams, atsparumo poliravimui, atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų padangų verčių rezultatai iki 23 %, sausųjų dalelių tankio iki 1 % geresni už dolomito užpildo, kuris pagamintas nenaudojant daugkartinio trupinimo technologijos.

2.2. Šaldymas ir atšildymas 10–30 ciklų, nežymiai, iki 1%, įtakėjo atsparumą trupinimui (Los Andželo koeficientui), atsparumą smūgiams ir sausųjų dalelių tankį. Šaldymo ir atšildymo didžiausias poveikis nustatytas atlikus 150 šaldymo ir atšildymo ciklų, gauta iki 1,7 % masės nuostolių.

2.3. Didinant poliravimo ciklų skaičių nuo 1–3, nustatyta, kad ciklų skaičiaus didinimas neturėjo įtakos užpildo atsparumo poliravimui.

3. Atlikus automobilių kelio viršutinių dangų atsparumo slydimui matavimus nustatyta, kad didžiausia atsparumo slydimui vertė – $0,72 \pm 0,0455$ – asfaltbetonio dangos, mažiausia – $0,38 \pm 0,014$ – skaldos ir mastikos dangos. Paviršiaus apdaro ir asfaltbetonio dangose mažesnių už pradinės ribines atsparumo slydimui vertes – 0,45 ir 0,5 – nenustatyta, todėl galima teigti, kad atspariausios slydimui – paviršiaus apdaro ir asfaltbetonio dangos.
4. Atlikus VMPEI analizę, nustatyta, kad didžiausias VMPEI ir sunkiasvorių transporto priemonių pokytis – skaldos ir mastikos asfalto dangose, nuo 13,0 % iki 36 %, atsižvelgiant į tai galime teigti, kad tai turėjo tiesioginę įtaką atsparumo slydimo vertei, kuri beveik du kartus mažesnė už paviršiaus apdaro bei asfaltbetonio dangų atsparumo slydimo vertes.

Dolomito užpildo, panaudoto automobilių kelio viršutinėje dangoje, vertinimas

Šiame skyriuje, atsižvelgiant į gautus eksperimento tyrimo rezultatus, daugkartinio trupinimo dolomito užpildo fizikinių ir mechaninių savybių lygiavertiškumas lyginamas su kitų rūšių užpildu, atsižvelgiant į normatyvinių techninių dokumentų reikalavimus. Įvertintas daugkartinio trupinimo dolomito užpildo, panaudoto automobilių kelio viršutinėje dangoje, dangos paviršiaus atsparumo slydimui verčių kitimas, vertinant per pirmuosius 5-erius kelio eksploatacijos metus. Pateiktas atliktas teorinis ekonominio efekto skaičiavimas asfalto mišinių pagamintu su daugkartinio trupinimo dolomito užpildu. Šio skyriaus medžiaga paskelbta dviejose autorės mokslinėse publikacijose (Šneideraitienė & Žilionienė, 2019, 2020).

3.1. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo fizikinių ir mechaninių savybių vertinimas

Atlikus 1-o etapo laboratorinį eksperimento tyrimą (2.3 posk.), gauti užpildų $D_{(I-III)}$ fizikinių ir mechaninių savybių rezultatai vertinami $G_{(I-III)}$ užpildo atž-

vilgiu. Vertinama, ar neviršijami maksimalūs leidžiamieji dydžiai, reglamentuojami Lietuvos, Latvijos ir Lenkijos norminiuose dokumentuose (1.6 ir 1.8 lentelė). Vertinimo rezultatai grafiškai pavaizduoti F priede. Lyginamajai analizei, atlikus eksperimentinį tyrimą, naudojami gauti užpildų $D_{(I-IV)}$, $D_{(P)}$, $G_{(I-IV)}$ fizikinių bei mechaninių savybių eksperimentinio tyrimo rezultatai (2.3 posk., priedas B).

Atlikus eksperimentinį tyrimą, nustatytos atsparumo dėvėjimuisi M_{DE} vertės $D_{(III)} - 11,2$, $G_{(III)} - 10,2$. Vertinant $D_{(III)}$ užpildą užpildo $G_{(III)}$ atžvilgiu, nustatyta 8 % mažesnė vertė tarp užpildų. Vertinant normatyvinių techninių dokumentų atžvilgiu, atsparumas dėvėjimuisi M_{DE} vertintas pagal Lietuvos normatyvinius techninius dokumentus. Latvija ir Lenkija nereglamentuoja M_{DE} rodiklio. Gauta vertė neviršijo reglamentuojamos atsparumo dėvėjimuisi M_{DE} vertės ≤ 15 , todėl užpildui $D_{(III)}$ priskiriama kategorija $M_{DE} 15$, tolygi užpildo $G_{(III)}$ kategorijai.

Atlikus ekspertinį tyrimą, nustatytos užpildų LA vertės: $D_{(I-III)} - 15,2; 15,3; 15,0$; $G_{(I-III)} - 16,4; 11,7; 14,2$. Vertinant $D_{(I-III)}$ užpildą $G_{(I-III)}$ užpildo atžvilgiu, gautos užpildo $D_{(I-III)}$ vertės mažesnės 8 % už $G_{(I-III)}$ vertę. Pagal Lietuvos, Latvijos ir Lenkijos normatyvinius techninius dokumentus jos neviršijo reglamentuojamos vertės ≤ 20 . Todėl $D_{(I-III)}$ ir $G_{(I-III)}$ užpildams priskiriama kategorija LA_{20} . Vertinant užpildų atsparumo trupinimui LA ilgaamžiškumą, užpildai $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ buvo šaldomi ir atšildomi, o paskui tik nustatomas atsparumas trupinimui LA ir fiksuojami masės nuostoliai, atlikus standartinį ir dvigubai bei trigubai didesnį šaldymo ir atšildymo ciklą skaičių. Vertinant gautus rezultatus nustatyta:

- po standartinio 10 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus nustatyta mažesnė 21 % užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę, bet didesnė 14 % vertė už užpildo $G_{(I)}$ vertę;
- po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų nustatyta 31 % mažesnė užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę, bet didesnė 6 % už užpildo $G_{(I)}$ vertę;
- po 30 šaldymo ir atšildymo ciklų (kaip ir po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų) užpildo $D_{(II)}$ vertė išliko 31 % mažesnė už $G_{(II)}$ vertę; užpildo $D_{(II)}$ ir $G_{(I)}$ verčių rezultatai susilygino, tarp jų pokytis nenustatytas.

Svarbu pažymėti, kad, atlikus eksperimentinį tyrimą su dvigubai ir trigubai didesniu šaldymo bei atšildymo ciklų skaičiumi, nustatytos $D_{(II)}$ užpildo atsparumo trupinimui LA vertės neviršijo reglamentuojamos atsparumo trupinimui LA vertės ≤ 20 .

Atlikus ekspertinį tyrimą, nustatytos $D_{(I-III)}$ užpildų vertės – 16,6 %, 16,7%; 16,8 %, ir $G_{(I-III)} - 12,1$ %; 12,9 % 15,9 %. Vertinant $D_{(I-III)}$ užpildą $G_{(I-III)}$ užpildo atžvilgiu, gautos užpildo $D_{(I-III)}$ vertės mažesnės 6 % už $G_{(I-III)}$ vertę. Latvijos ir Lenkijos normatyviniuose dokumentuose nereglamentuojamas atsparumas smūgiams SZ . Todėl jį vertiname, vadovaudamiesi Lietuvos normatyviniu

dokumentu ir jis neviršijo reglamentuojamos vertės ≤ 18 . Todėl $D_{(I-III)}$ ir $G_{(I-III)}$ užpildams priskiriama kategorija SZ_{18} . Vertinant užpildų atsparumo smūgiams SZ ilgaamžiškumą, užpildai $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ buvo šaldomi ir atšildomi, o paskui nustatomas jų atsparumas smūgiams SZ ir fiksuojami masės nuostoliai. Nustatyta, kad:

- po standartinio 10 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus nustatyta mažesnė 5,8 % užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę ir mažesnė 29,4 % už užpildo $G_{(I)}$ vertę;
- po 20 ciklų šaldymo ir atšildymo skaičiaus pokytis tarp užpildų verčių nenustatytas, nes gautos tyrimo metu vertės, tolygios 10 ciklų šaldymo ir atšildymo vertėms;
- po 30 ciklų šaldymo ir atšildymo skaičiaus nustatyta mažesnė 11,7 % užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę ir mažesnė 29,4 % už užpildo $G_{(I)}$ vertę.

Svarbu pažymėti, kad, padidinus šaldymo bei atšildymo ciklų skaičių, nustatytos užpildo $D_{(II)}$ atsparumo smūgiams SZ vertės 17 % neviršijo reglamentuojamos atsparumo smūgiams SZ vertės ≤ 18 %.

Lietuvos, Lenkijos ir Latvijos normatyviniuose dokumentuose užpildų sausųjų dalelių tankis nereglamentuojamas. Atliekant eksperimentinį tyrimą, nustatytas užpildų $D_{(I-III)}$, $G_{(I-III)}$ dalelių tankis. Gautos vertės: $D_{(I-III)}$ – 2,790 Mg/m³, 2,79 Mg/m³, 2,801 Mg/m³, $G_{(I-III)}$ – 2,768, Mg/m³, 2,792 Mg/m³, 2,800 Mg/m³. Vertinant užpildą $D_{(II)}$ su užpildais $G_{(I)}$ ir $G_{(II)}$, nustatytas nežymus – 0,5 % – skirtumas. Vertinant užpildų ilgaamžiškumą, užpildai $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ buvo šaldomi ir atšildomi, atliekant eksperimentinį tyrimą, šaldymo ir atšildymo ciklai didinti nuo 10 iki 30. Nustatyta, kad:

- po standartinio 10 ciklų šaldymo ir atšildymo skaičiaus nustatyta 0,53 % didesnė užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę ir 0,64 % mažesnė už užpildo $G_{(I)}$ vertę;
- po 20 šaldymo ir atšildymo ciklų nustatyta 1,25 % didesnė užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę, 0,3 % didesnė už užpildo $G_{(I)}$ vertę;
- po 30 šaldymo ir atšildymo ciklų nustatyta 1,42 % mažesnė užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ vertę ir 0,82 % didesnė už užpildo $G_{(I)}$ vertę.

Užpildo $D_{(II)}$ sausųjų dalelių tankis, atlikus 10–30 šaldymo ir atšildymo ciklų, pakito nedaug – 0,3 %, tiek pat pasikeitė ir užpildo $G_{(I)}$ sausųjų dalelių tankis. Užpildo $G_{(II)}$ sausųjų dalelių tankis, atlikus 30 šaldymo ir atšildymo ciklų, padidėjo 1,1 %.

Lietuvoje ir Lenkijoje reglamentuojamas užpildų atsparumas poliravimui PSV, Latvijoje šis rodiklis nereglamentuojamas. Atlikus šį tyrimą, įvertintos gautos atsparumo poliravimui vertės: $D_{(I)}$ – 50; $D_{(II)}$ – 50; $D_{(III)}$ – 50,8, $G_{(I-III)}$ – 57;

57; 53,4. Vertinant užpildą $D_{(III)}$ su užpildu $G_{(III)}$, nustatyta mažesnė 6 % užpildo $D_{(III)}$ vertė už $G_{(III)}$ vertę. Atspariausi poliravimui buvo užpildai $G_{(I-II)}$, bet ir užpildo $D_{(I)}$ poliravimo vertė ≥ 50 , todėl priskirtina kategorijai PSV_{50} . Vertinant užpildų ilgaamžiškumą, užpildai $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ buvo tiriami, atliekant dvigubai ir trigubai daugiau poliravimo ciklų. Nustatyta, kad:

- po standartinio pirmo ciklo gauta 14 % mažesnė $D_{(II)}$ užpildo vertė už $G_{(II)}$ ir užpildo $G_{(I)}$ vertes;
- po dviejų ciklų gauta 16 % mažesnė užpildo $D_{(II)}$ vertė už $G_{(II)}$ ir užpildo $G_{(I)}$ vertes;
- po 3-jų ciklų vertės gautos tolygios 2 ciklų vertėms.

Svarbu pažymėti, kad užpildo $D_{(II)}$ atsparumo poliravimui PSV rezultatai, atlikus pirmą standartinį ir po to antrą bei trečią poliravimo ciklus, nepakito. Padi-dintas poliravimo ciklų skaičius taip pat nepaveikė užpildų $G_{(I)}$, $G_{(II)}$.

Latvijoje reglamentuojamas užpildų atsparumas dilimui dėl dygliuotųjų padangų A_N , o Lietuva ir Lenkija jo nereglamentuoja. Atliekant eksperimentinį tyrimą, nustatytos atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų vidutinės vertės: užpildo $D_{(III)}$ – 13,5; $G_{(III)}$ – 9,9. Vertinant užpildą $D_{(III)}$ su užpildu $G_{(III)}$, nustatyta 36 % mažesnė užpildo $D_{(III)}$ vertė už $G_{(III)}$ vertę. Svarbu pažymėti, kad, atlikus šį tyrimą, nustatyta užpildo $D_{(III)}$ atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų (A_N) vertė 13,5 neviršijo reglamentuojamos atsparumo dilimui dėl dygliuotųjų (A_N) vertės ≤ 14 , todėl užpildui $D_{(III)}$ gali būti priskiriama kategorija A_{N14} .

Atliktas užpildų $D_{(II)}$ eksperimentinis tyrimas, siekiant išsiaiškinti jų atsparumą šaldymui ir atšildymui F . Tirtas $G_{(I-II)}$, stengiantis įvertinti ilgaamžiškumą, nustatytos vertės, atlikus standartiškai 10 ir nestandartiškai 20, 30, 40, 50, 75, 100 bei 150 šaldymo ir atšildymo ciklų. Nėra normatyvinių reikalavimų, kuriuos turėtų atitikti užpildai atsparumui šaldymui bei atšildymui F , nustatyti atlikus daugiau nei 10 šaldymo ir atšildymo ciklų. Vertinant užpildus $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ pagal gautus eksperimentinio tyrimo rezultatus, atlikus 10 šaldymo ir atšildymo ciklų skaičių, gauti lygiavėčiai rezultatai, vienoda 0,2 % vertė, taigi užpildams priskirtos kategorijos: F_1 , vadovaujantis Lietuvos dokumentais, ir F_2 , remiantis Latvijos bei Lenkijos normatyviniais dokumentais.

Atlikus eksperimentinį tyrimą ilgaamžiškumui nustatyti, paaiškėjo, kad, didinant šaldymo bei atšildymo ciklų skaičių, atitinkamai proporcingai mažėjo užpildų $D_{(II)}$, $G_{(I-II)}$ atsparumas šaldymo ir atšildymo poveikiui, taigi didėjo užpildų masės nuostoliai: $D_{(II)}$ nuostoliai išaugo nuo 0,4 % iki 1,7 %, $G_{(I-II)}$ – nuo 0,2 % iki 0,5 %. Svarbu pažymėti, kad, didinant šaldymo ir atšildymo ciklų skaičių nuo 10 iki 40 ciklų, užpildo $D_{(II)}$ vertė ≤ 1 , užpildo $G_{(I-II)}$ vertė ≤ 1 , po 150 ciklų skaičiaus.

Įvertinus eksperimento tyrimo daugkartinio trupinimo dolomito užpildo savybių vertes granito užpildo atžvilgiu ir remiantis normatyvinių techninių dokumentų reikalavimais, užpildams priskirtos tolygios kategorijos: $M_{DE}15$; LA_{20} ; SZ_{18} ; PSV_{50} ; F_1 . Vertinant nustatyta, kad daugkartinio trupinimo dolomito užpildo savybių vertės tolygios tirtoms granito užpildo vertėms.

3.2. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo automobilių kelio viršutinėje dangoje vertinimas

Ankstesniuose skyriuose buvo aptartas automobilių kelio viršutinės dangos atsparumas slydimui. Buvo vertinamas daugkartinio trupinimo dolomito užpildo ir automobilių kelio viršutinės dangos atsparumo slydimui kitimas kelio eksploatacijos metu per pirmuosius penkerius metus, automobilių kelio dangų tipams: paviršiaus apdaras, asfaltbetonis AC 11 VS, skaldos ir mastikos asfaltas SMA 11 S pateikti 3.1–3.3 paveiksluose.

3.1 paveiksle pateiktos atsparumo slydimui vertės paviršiaus apdaro krašto kelių Nr. 154, Nr. 194 ruožuose su $D_{(IV)}$ užpildu. Kelio Nr. 154 ruože nustatyta, kad suminis VMPEI – 4838 aut. buvo dvigubai didesnis nei kelio Nr. 194 ruožo suminį VMPEI – 2521 aut. Abiejuose kelio ruožuose nustatytas atsparumas slydimui beveik pusantro karto viršijo pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę.

Rajoninio kelio Nr. 3404, 2014 m. įrengto su $D_{(IV)}$ užpildu, pirmajame ruože suminis VMPEI buvo 8089 aut., keturis kartus didesnis nei antrajame ruože, kurio suminis VMPEI yra 2209 aut. Pirmajame kelio ruože sunkiasvorių transporto priemonių yra daugiau negu 10 %, antrajame ruože – iki 10 %. Abiejų kelio ruožų eksploataavimo trukmė – penkeri metai. Šiuose ruožuose nustatytas atsparumas slydimui, pirmajame kelio ruože daugiau negu 20 %, antrajame ruože – iki 20 % nei pradinė ribinė $\leq 0,45$ vertė. Atsparumo slydimui vertės krašto kelio Nr. 154 – 42 %, krašto kelio Nr. 194 – 46 % ir viršijo pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę.

Rajoninio kelio Nr. 5202 ruožo, 2015 m. įrengto su $G_{(IV)}$ užpildu, suminis VMPEI – 6081 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių šiame kelio ruože yra 5 %, ruožo eksploataavimo trukmė – penkeri metai. Nustatytas atsparumas slydimui du kartus viršijo pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę. 2020 m. buvo pakartotinai išmatuotas atsparumas slydimui – jis taip pat viršijo pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę 30 %.

Aptariant $D_{(IV)}$ užpildo eksperimentinio tyrimo rezultatus $G_{(IV)}$ atžvilgiu per pirmuosius penkerius kelio eksploatacijos metus, vertinami tos pačios kelio reikšmės kelio ruožai, paviršiaus apdaro dangos rajoninių kelių ruožai. Juose nustatytos $D_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui vertės 0,54 ir 0,55, vertinant $G_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui koeficientą, nustatytos 6,7–8,4 % mažesnės, bet 20–22,2 % didesnės už įrengiant kelią nustatytą pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę per pirmuosius penkerius kelio eksploatacijos metus.

3.2 paveiksle pateiktas atsparumo slydimui vertes magistralinio kelio Nr. A4 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu. Nuo 2013 m., kai ruožas buvo įrengtas, suminis VMPEI – 15 412 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių ruože yra 5 %, kelio eksploatavimo trukmė – 6-eri metai. Ruože nustatytas atsparumas slydimui pusantro karto viršijo pradinę ribinę $\leq 0,5$ vertę.

Krašto kelio Nr. 136 dviejuose kelio ruožuose su $D_{(IV)}$ užpildu suminis VMPEI nuo 2014 m., kai ruožas buvo įrengtas, buvo 12 261 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių ruože yra iki 5 %, kelio eksploatavimo trukmė – 5-eri metai. Nustatytas atsparumas slydimui didesnis nuo 15 % iki 46 % už pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę. Krašto kelio Nr. 130 ruože su $G_{(IV)}$ užpildu suminis VMPEI nuo 2016 m., kai ruožas buvo įrengtas, sudarė 39 147 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių yra 8 %, kelio eksploatavimo trukmė yra 4-eri metai. Ruože du kartus (2018 ir 2020 m.) buvo nustatytas atsparumas slydimui. Jis net 29 % viršijo pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę (pagal 2018 m. matavimus) ir 2 % (pagal 2020 m. matavimus).

Vertinant eksperimentinio tyrimo rezultatus $D_{(IV)}$, užpildo $G_{(IV)}$ atžvilgiu per pirmuosius 5-erius kelio eksploatacijos metus vertinami krašto kelio reikšmės ruožai asfaltbetonio AC 11 VS. Juose nustatytos $D_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui vertės – 0,52 ir 0,66, vertinant su $G_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui koeficientu, jos didesnės 11,5 % ir 30,3 %, ir didesnės 15,5–46,6 % už įrengiant kelią pateiktą pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę.

3.3 paveiksle pateiktas atsparumo slydimui vertes, magistralinio kelio Nr. A3 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu. Nuo 2013 m., kai ruožas buvo įrengtas, suminis VMPEI – 25 866 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių ruože yra 20 %, automobilių kelio viršutinės dangos eksploatavimo trukmė – 6-eri metai. Ruože nustatytas atsparumas slydimui buvo 14 % mažesnis už pradinę ribinę $\leq 0,5$ vertę.

Magistralinio kelio Nr. A15 pirmajame ir antrajame ruožuose su $D_{(IV)}$ užpildu suminis VMPEI nuo 2012 m., kai šie ruožai buvo įrengti, sudarė 35 739 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių ruože yra 12 %, automobilių kelio viršutinės dangos eksploatavimo trukmė – 7-eri metai. Nustatyta, kad pirmajame ruože atsparumas slydimui, buvo 14 % mažesnis už pradinę ribinę $< 0,50$ vertę, antrajame ruože 6 % mažesnis už pradinę ribinę $< 0,50$ vertę. Per tą periodą kelio ruožais važiavo 35 tūkstančiai automašinų.

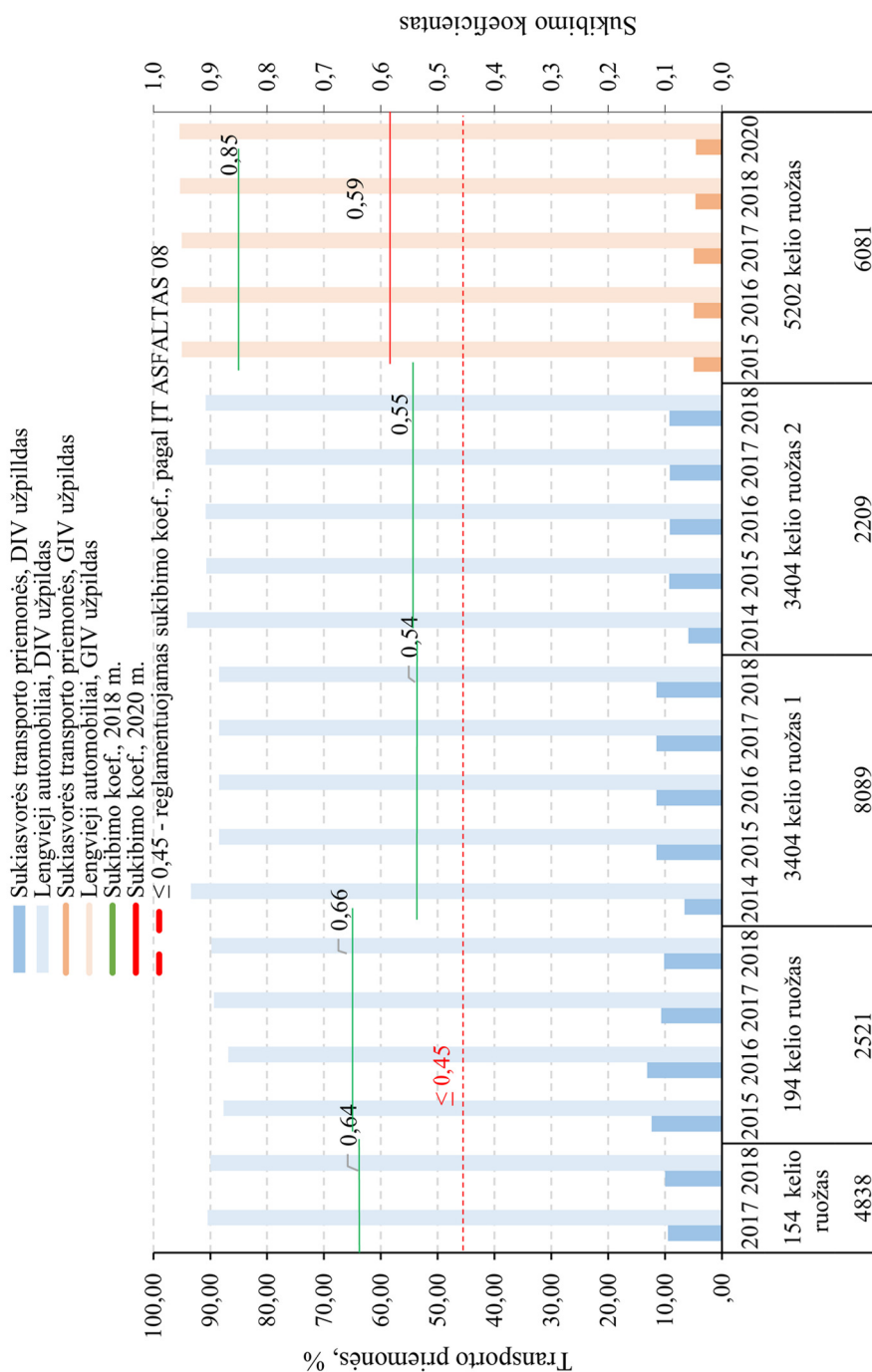
Magistralinio kelio Nr. A6 ruože su $G_{(IV)}$ užpildu suminis VPMEI nuo 2015 m., kai ruožas buvo įrengtas, yra 2246 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių ruože yra 17 %, automobilių kelio viršutinės dangos eksploatavimo trukmė – 5-eri metai. Ruože 2018 m. nustatytas atsparumas slydimui pusantro karto viršijo pradinę ribinę $< 0,5$ vertę. Pakartotinai atlikus matavimus 2020 m., jis viršijo vertę 18 %.

Krašto kelio Nr. 149 ruože su $D_{(IV)}$ užpildu suminis VMPEI nuo 2014 m., kai ruožas buvo įrengtas, sudarė 18 233 aut. Sunkiasvorių transporto priemonių yra 10 %, automobilių kelio viršutinės dangos eksploatavimo trukmė – 5-eri metai. Ruože nustatytas atsparumas slydimui buvo skaičiuotas atliekant du matavimus. Jie pasiskirstė taip: pirmąkart išmatavus, gauta 20 %, antrąkart išmatavus – 16 % mažiau už pradinę ribinę $\leq 0,45$ vertę. Per tą laikotarpį kelio ruožu važiojo 18 tūkst. automašinų.

Vertinant eksperimentinio tyrimo rezultatus $D_{(IV)}$ užpildo $G_{(IV)}$ atžvilgiu per pirmuosius 5-erius kelio eksploatacijos metus, vertinami tos pačios kelio reikšmės kelio ruožai, skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S – magistralinių kelių ruožai. Juose nustatytos $D_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui vertės – 0,43, 0,43 ir 0,47, vertinant su $G_{(IV)}$ užpildo atsparumo slydimui koeficientu, jos mažesnės 20,3 % ir 27,0 % bei mažesnės 6 % ir 14,0 % už įrengiant kelią nustatytą pradinę ribinę $< 0,45$ vertę.

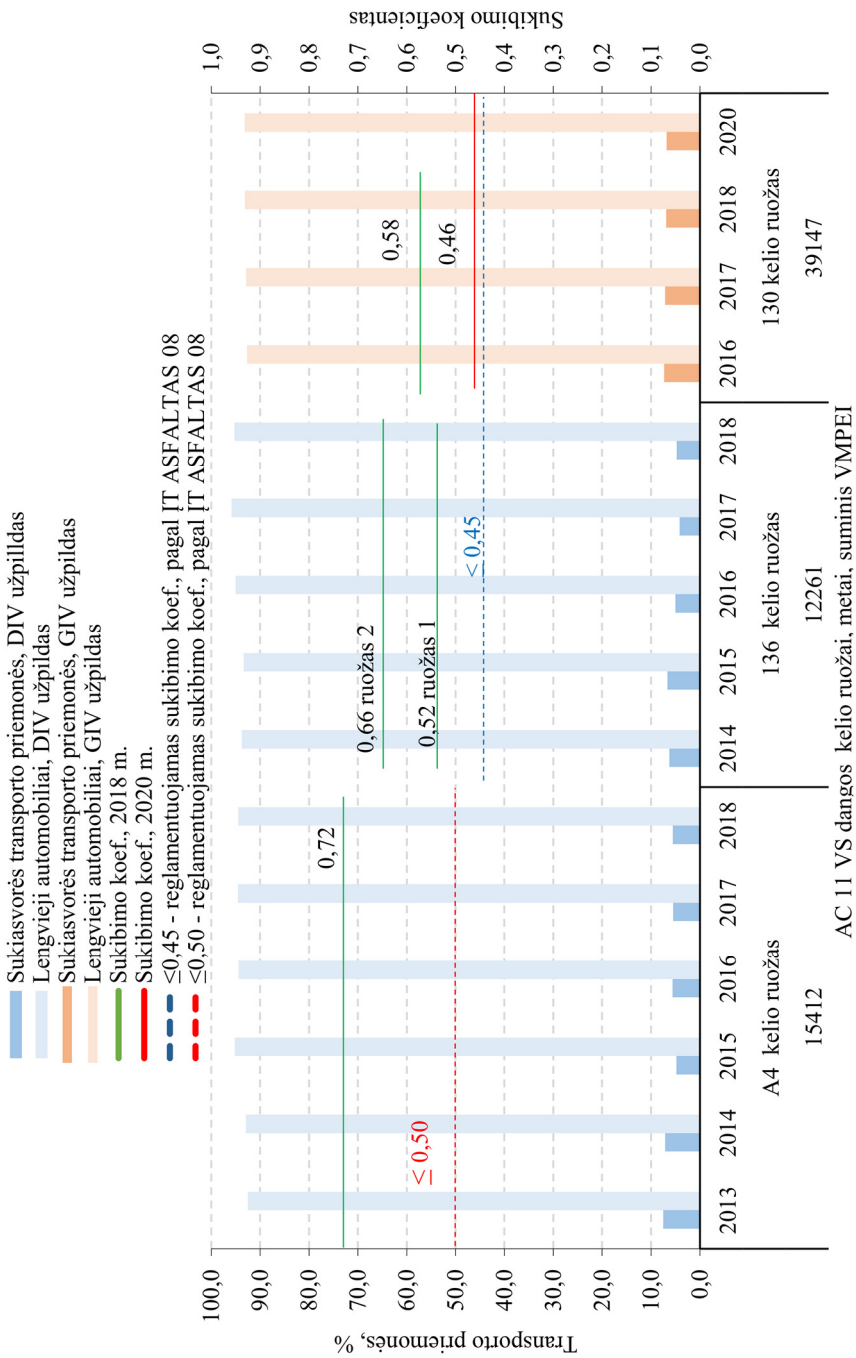
Svarbu pažymėti, kad, vertinant skaldos ir mastikos asfaltą SMA 11 S ($D_{(IV)}$ užpildas) su paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS dangomis ($D_{(IV)}$ užpildas), nustatyta, jog automobilių kelio viršutinė danga – paviršiaus apdaras iki dvejų metų ilgiau eksploatuojama, taip pat nustatytas dvigubai didesnis suminis bei sunkiasvorių transporto priemonių VMPEI.

Taip pat svarbu pažymėti, kad atlikus daugkartinio trupinimo dolomito užpildo automobilių kelio viršutinėje dangoje vertinimą, kelio ruožuose eksploatuojamuose 2-ėjus – 7-erius metus, nustatyta, kad atsparumas slydimui: paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS dangose 15–47 % didesnis už įrengiant kelią nustatytas pradines ribines vertes, skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangose 6–14 % mažesnis už įrengiant kelią nustatytas pradines ribines vertes. Taip pat analizuojant tirtų granito: paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS, skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangas, nustatyta, kad sukibimo koeficientas – 31 %, 2 %, 18 %, didesnis už įrengiant kelią nustatytas pradines ribines vertes. Kaip matyti iš sukibimo koeficiento rezultatų, skirtumai tarp jų yra santykinai nedideli, ir galime teigti, kad daugkartinio trupinimo dolomito užpildas yra lygiavertis granito užpildui automobilių kelio viršutinėje dangoje, atsparumo slydimui aspektu.



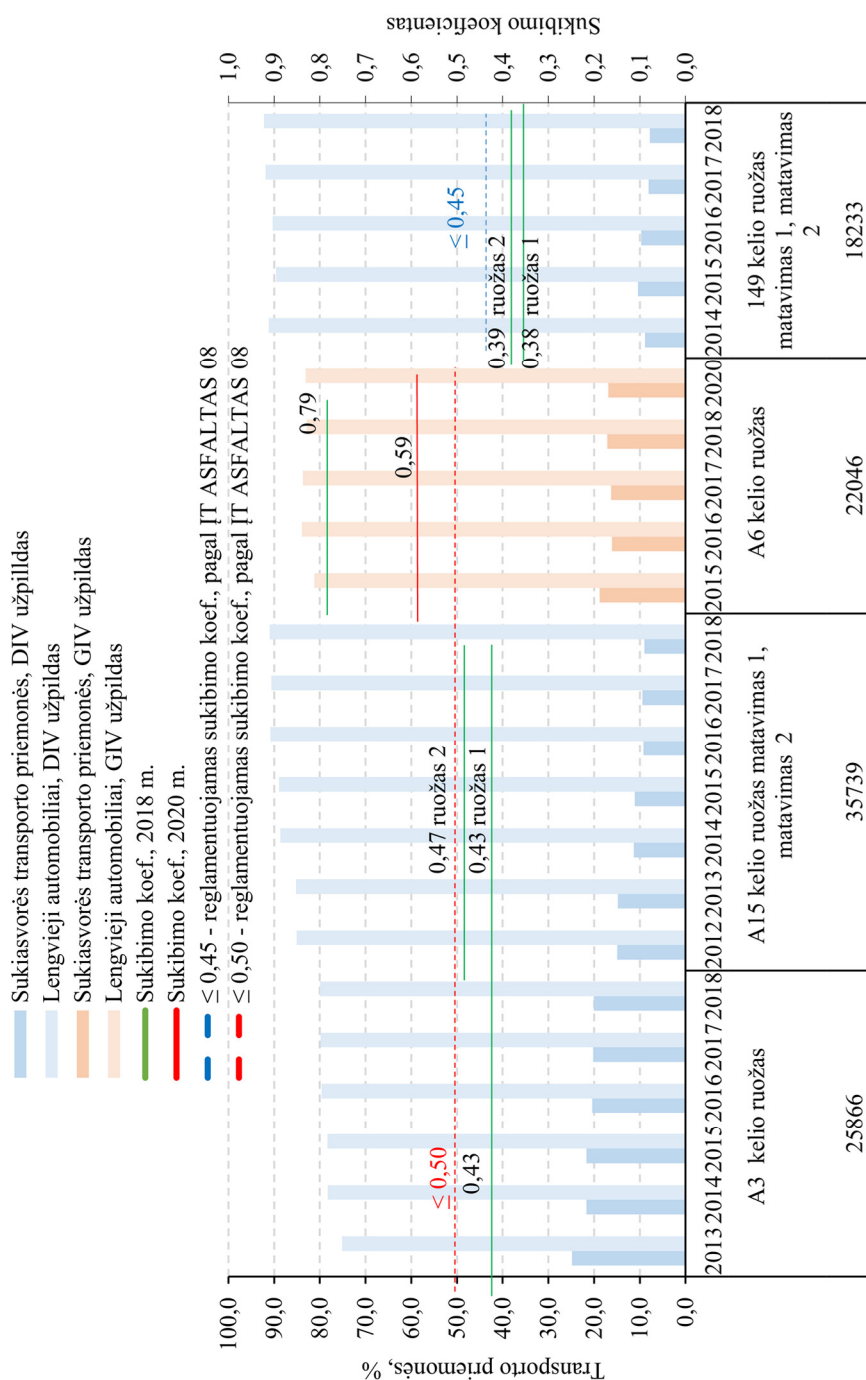
3.1 pav. Atsparumas slydimui paviršiaus apdaro dangos ruožuose

Fig.3.1. Skid resistance of the surface dressing road sections



3.2 pav. Atsparumas slydimui asfaltbetonio kelių ruožuose

Fig. 3.2. Skid resistance of the asphalt concrete road sections



3.3 pav. Atsparumas slydimui skaldos ir mastikos asfalto kelio ruožuose

Fig. 3.3. Skid resistance of the stone mastic asphalt road sections

3.3. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo mišinių, naudojamų asfalto mišiniuose, ekonominis efektas

Automobilių kelio viršutinės dangos sluoksnio mišinius sudaro tolydžios granuliometrinės sudėties užpildo mišinys ir rišiklis – bitumas, arba polimerais modifikuotas bitumas. Dangos viršutiniam sluoksniui įrengti dažniausiai naudojama kelių tipų asfalto danga: paviršiaus apdaras, asfaltbetonio mišinys, skaldos ir mastikos asfaltas. Asfalto mišiniai projektuojami pagal Lietuvos Respublikoje galiojančių normatyvinių techninių dokumentų reikalavimus, aptartus 1 skyriuje.

Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo mišinio, automobilių kelio viršutinei dangai įrengti ekonominis efektas skaičiuojamas asfalto mišiniams: asfaltbetoniui AC 11 VS ir skaldos ir mastikos asfaltui SMA 11 S. Šie asfalto mišiniai pagaminti su daugkartinio trupinimo dolomito užpildu, naudojant aktyvintuosius mineralinius miltelius arba mikroužpildą. Paviršiaus apdaro ekonominio efekto skaičiavimas skiriasi nuo asfalto mišinių skaičiavimo, nes ji skaičiuojama euraiš už m^2 . Pažymima, kad paviršiaus apdaro įrengimas yra technologinis procesas, o ne produktas – asfalto mišinys. Prieš įrengiant paviršiaus apdarą, paklojamas išlyginamasis asfaltbetonio mišinio sluoksnis, kurio išlyginamojo sluoksnio storis kinta visame ruože.

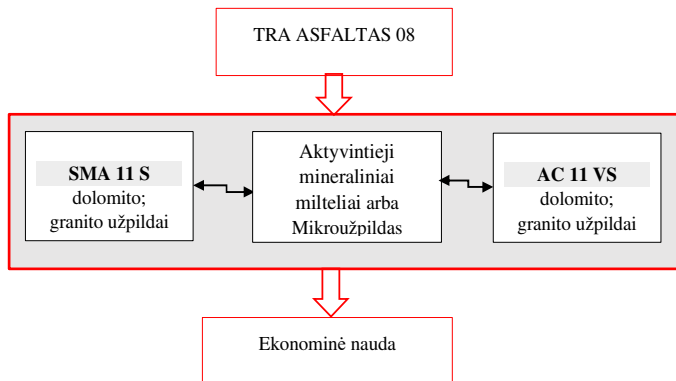
Ekonominis efektas apskaičiuotas imant mažiausią užpildų ir mikroužpildo kainą, nustatytą šių medžiagų tiekėjų. Šiuo metu galiojančios kainos pateiktos G priede. Lietuvos Respublikos teritorijoje išsidėsčiusios užpildų, aktyvintųjų mineralinių miltelių ir mikroužpildų tiekėjų vietos pateiktos 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Užpildų tiekėjų išsidėstymas Lietuvos Respublikos teritorijoje
Fig. 3.4. Aggregates suppliers in the territory of the Republic of Lithuania

Asfalto mišinių AC 11 VS ir SMA 11 S su skirtingais užpildais ekonominio efekto vertinimo schema pateikta 3.5 paveiksle. Skaičiuotas tipinių asfalto mišinių

AC 11 S ir SMA 11 S ekonominis efektas, kurių granuliometrinės sudėties ribos nurodytos TRA ASFALTAS 08.



3.5 pav. Asfalto mišinių AC 11 VS ir SMA 11 S su skirtingais užpildais ekonominio efekto vertinimo schema

Fig. 3.5. Scheme of evaluation of economic effect of the asphalt mixtures AC 11 VS and SMA 11 S graded aggregate

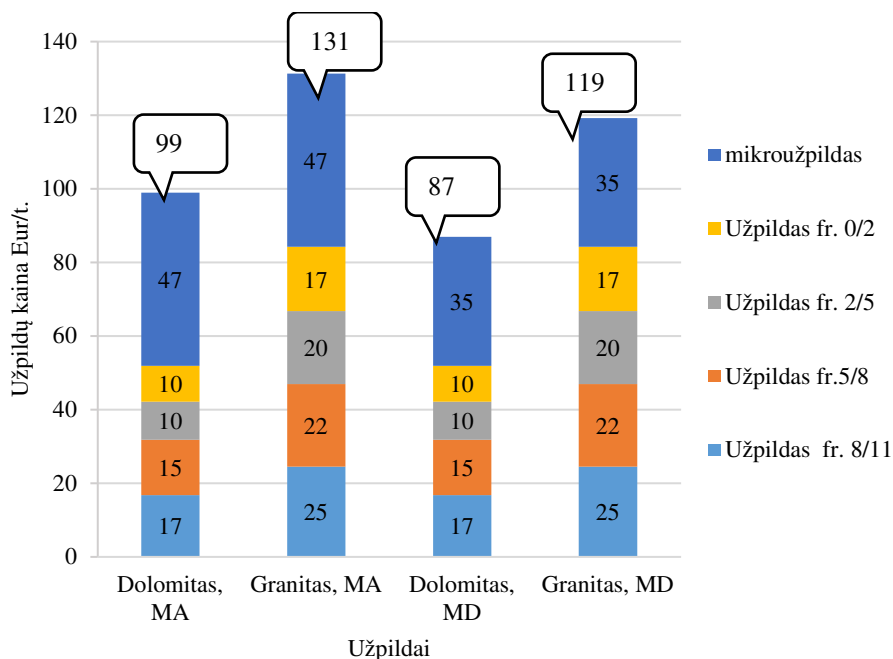
Asfalto mišiniams gaminti naudojamų medžiagų $D_{(S)}$ ir granito užpildų frakcijų, aktyvintųjų mineralinių miltelių ir mikroužpildo (dolomito) kaina Eur/t (be PVM) apskaičiuota pagal (3.1) formulę. Skaičiavimai atlikti su aktyvintaisiais mineraliniais milteliais MA ir mikroužpildu (dolomito) MD. Gauti rezultatai pateikti 3.6 paveiksle.

$$K_{MM} = S_{MM} + M_{MM}, \quad (3.1)$$

čia: K_{MM} – asfalto mišinių medžiagų kaina, Eur/t; S_{MM} – užpildų frakcijų kaina, Eur/t; M_{MM} – aktyvintieji mineraliniai milteliai – MA arba mikroužpildas (dolomito) – MD, kaina, Eur/t.

Apskaičiavus asfalto mišiniams naudotų medžiagų $D_{(S)}$ ir granito užpildų frakcijų bei aktyvintųjų mineralinių miltelių – MA vienos tonos kainą eurai, nustatyta, kad asfalto mišinio su granito užpildų frakcijomis tonos kaina 25 % didesnė už asfalto mišinio su $D_{(S)}$ užpildų frakcijomis. Vietoje aktyvintųjų mineralinių miltelių – MA naudojant mikroužpildą (dolomito) – MD, asfalto mišinio su granito užpildų frakcijomis kaina padidėjo iki 27 %.

Gaminant asfalto mišinius, naudojamas polimerais modifikuotas bituminis rišiklis PMB 45/80-55, adhezinis priedas „Adhezin“ ir paviršiaus apdarui reikalinga bitumo emulsija. Kaina Eur/t pateikta 3.1 lentelėje.



3.6 pav. Asfalto mišiniui gaminti naudojamų medžiagų tonos kaina, Eur

Fig. 3.6. Price per tonne of materials used for asphalt mix Eur

3.1 lentelė. Asfalto mišiniuose naudojami priedai ir jų kainos

Table 3.1. Asphalt mix additives and their prices

Pavadinimas	Kaina, Eur/t
Bitumas PMB 45/80-55	500,00
Adhezinis priedas	300,00
Bitumo emulsija	200,00

Vadovaujantis TRA ASFALTAS 08, asfalto mišinių AC 11 VS ir SMA 11 S projektinė laboratorinė sudėtis nurodyta 3.3 lentelėje. Paviršiaus apdarui gaminti naudojami stambieji užpildai fr. 2/5, fr. 5/8 arba fr. 8/11 (TRA UŽPILDAI 19). Jų faktinės kainos pateiktos G priede. Įrengiant paviršiaus apdarą 1 m², dozuoama (normuojama) nuo 1,5 l iki 2,0 l modifikuotos bitumo emulsijos ir nuo 11 kg iki 17 kg užpildo. Įrengto paviršiaus apdaro su granito užpildu 1 m² kaina – nuo 5 Eur iki 7 Eur, su D_(S) užpildu – apie 17 % pigiau. Apskaičiavę vienos asfalto mišiniams naudojamų medžiagų tonos kainą, atsižvelgdami į projektinius laboratorinius asfalto mišinių sudėčių pasiskirstymus (3.2 lentelė). Pagal 3.2 formulę apskaičiuojame asfalto mišinių AC 11 VS bei SMA 11 S kainą, Eur/t.

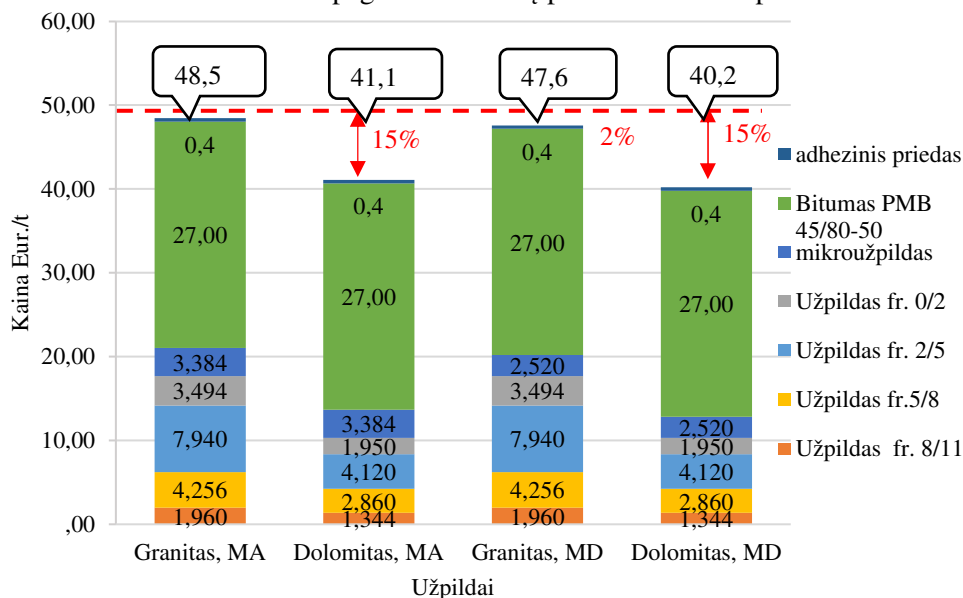
3.2 lentelė. Asfalto mišinių AC 11 VS, SMA 11 S projektinė–laboratorinė sudėtis, %**Table 3.2.** Design laboratory composition of asphalt mixtures AC 11 VS, SMA 11 S, %

Asfalto mišinio medžiagos pavadinimas	AC 11 VS, %	SMA 11 S, %
Užpildas fr. 8/11	8,0	42,0
Užpildas fr.5/8	19,0	18,0
Užpildas fr. 2/5	40,0	8,0
Užpildas fr. 0/2	20,0	17,1
mikroužpildas	7,2	8,2
Bitumas PMB 45/80-50	5,4	6,4
Priedas	0,4	0,3
%	100	100

$$K_{AMn} = \frac{K_{MM} \times P_{MM}}{100}, \quad (3.2)$$

čia K_{AMn} – asfalto mišinio kaina, Eur/t; K_{MM} – asfalto mišinių medžiagų kaina, Eur/t; P_{MM} – užpildo kiekis asfalto mišinyje, %.

Skaiciavimo rezultatai pagal 3.2 formulę pateikti 3.7 ir 3.8 paveiksluose.

**3.7 pav.** AC 11 VS asfalto mišinio kaina Eur/t**Fig. 3.7.** The cost of AC 11 VS asphalt mixture in Eur/t

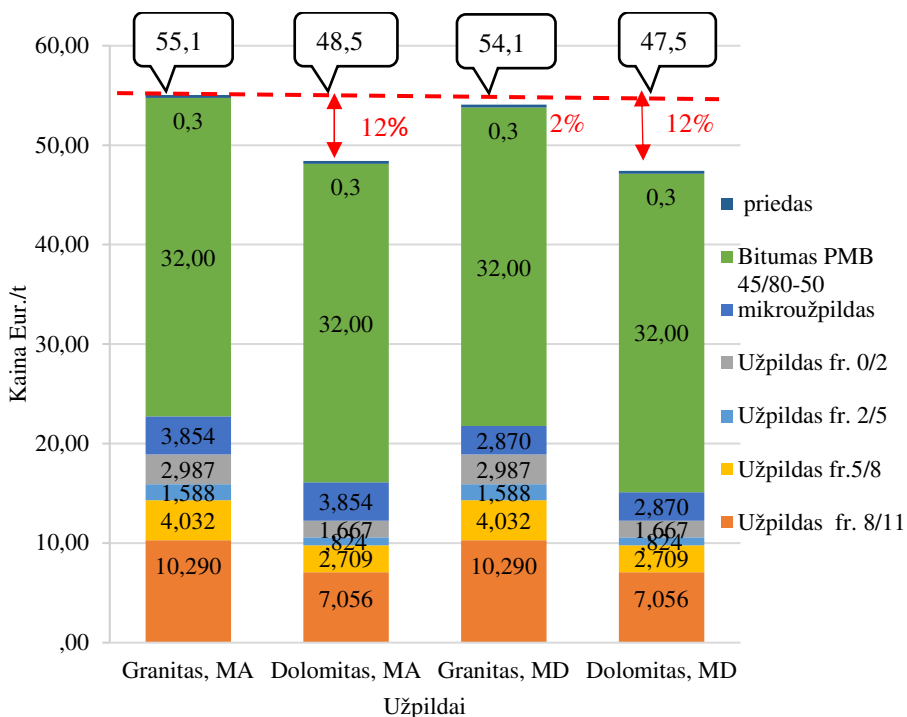
3.7 paveiksle pateikta, kad didžiausia – 49 Eur/t – asfaltbetonio AC 11 VS kaina yra, kai asfaltbetonio mišinys sudarytas iš granito užpildo. Mažiausia kaina – 41 Eur/t, kai asfaltbetonio mišinys susideda iš $D_{(S)}$ užpildo.

3.8 paveiksle parodyta, kad didžiausia – 56 Eur/t – skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S mišinio kaina, kai asfalto mišinys sudarytas iš granito užpildo. Mažiausia kaina – 48 Eur/t, kai asfalto mišinys susideda iš $D_{(S)}$ užpildo.

Asfalto mišinių E_{Vn} ekonominis efektas apskaičiuojamas pagal 3.3 formulę.

$$E_{Vn} = \left(\frac{K_{AMnD} \times 100}{K_{AMnG}} \right) - 100, \quad (3.3)$$

čia: asfalto mišinių E_{Vn} ekonominis efektas, %, K_{AMnD} – sudėtinių dalių kaina asfalto mišinio, Eur/t (dolomito); K_{AMnG} – sudėtinių dalių kaina asfalto mišinio, Eur/t (granito).



3.8 pav. SMA 11 S asfalto mišinio kaina Eur/t
Fig. 3.8. The cost of SMA 11 S asphalt mixture in Eur/t

Pagal 3.3 formulę apskaičiuota, kad asfaltbetonio AC 11 VS ekonominis efektas yra 15 %. Sudarius asfaltbetonio mišinį iš $D_{(S)}$ užpildo ir mikroužpildo (dolomito), gautas 2 % ekonominis efektas, nei suformavus asfaltbetonio mišinį iš $D_{(S)}$ užpildo bei aktyvintųjų mineralinių miltelių. Nustatyta, kad skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S ekonominis efektas – 12 % (3.3 formulė). Asfalto mišinį sudarius iš $D_{(S)}$ užpildo ir mikroužpildo (dolomito), gautos 2 % mažesnės sąnaudos, nei suformavus asfalto mišinį iš $D_{(S)}$ užpildo bei aktyvintųjų mineralinių miltelių. Apibendrinant pažymėtina, kad asfalto mišinių asfalto AC 11 VS ir SMA 11 S ekonominis efektas, naudojant $D_{(S)}$ užpildą, siekia nuo 12 % iki 15 %.

Atlikus teorinius ekonominio efekto skaičiavimus, kai buvo vertinami tos pačios markės asfalto mišinio gamybos kaštai, nustatyta, kad stambiojo užpildo $D_{(S)}$ dalis asfalto mišinio kainoje AC 11 VS yra 20 %, granito užpildo – 29 %, įvertinta, kad $D_{(S)}$ užpildo kainą yra iki 9 % mažesnė už granito užpildo kainą asfalto mišinyje. Skaldos ir mastikos asfalto mišinyje SMA 11 S, $D_{(S)}$ užpildo dalis kainoje yra 22 %, granito užpildo – 29 %, įvertinta, kad $D_{(S)}$ užpildo kainą yra iki 7 % mažesnė už granito užpildo kainą asfalto mišinyje. Tarus, kad pirmųjų 5-erių metų laikotarpiu esminių eksploatacinių skirtumų tarp asfalto dangų su dolomito ir granito užpildu nenustatyta, daroma prielaida, kad asfalto mišinių su dolomito užpildu, pagamintu naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, galimas pranašumas sudaro iki 10 %.

Svarbu pažymėti, kad ekonominė daugkartinio trupinimo dolomito užpildo mišinių, naudojamų automobilių kelio viršutinei dangai įrengti, ekonominis efektas, lyginant su granito užpildo mišiniu, įvertintas naudojantis užpildų bei mikroužpildų tiekėjų nustatytomis kainomis be PVM, nevertinant gabenimo, perkrovimo, sandėliavimo ir kitų sąnaudų. Todėl, norint atlikti išsamesnę ekonominę analizę, rekomenduotina toliau tęsti tyrimus.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus daugkartinio trupinimo dolomito ir granito užpildo fizikinių, mechaninių savybių palyginimą nustatyta, kad šių užpildų šaldymo ir atšildymo tyrimo rezultatai bei sausųjų dalelių tankis vienodi. Daugkartinio trupinimo dolomito užpildo atsparumas dėvėjimuisi (mikro Devalio koeficientas), atsparumas trupinimui (Los Andželo koeficientas), atsparumas smūgiams rezultatai iki 10 proc. didesni nei granito užpildo. Todėl galima teigti, kad skirtumai tarp rezultatų yra santykinai nedideli ir daugkartinio trupinimo dolomito užpildas yra lygiavertis granito užpildui.
2. Atsižvelgiant į gautus eksperimentinio laboratorinio tyrimo rezultatus, įvertinta, kad daugkartinio trupinimo dolomito užpildo savybių vertės yra tolygios tirtoms granito užpildo vertėms, taip pat nustatyta, kad savybės atitinka

kategorijas – $M_{DE}15$, LA_{20} , SZ_{18} , PSV_{50} , F_1 , kurios nurodomos normatyviniuose dokumentuose.

3. Atlikus daugkartinio trupinimo dolomito užpildo automobilių kelio viršutinėje dangoje vertinimą, kelio ruožuose eksploatuojamuose 2-ejus – 7-erius metus, nustatyta, kad atsparumas slydimui paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS dangose 15–47 % didesnis už įrengiant kelią nustatytas pradinės ribines vertes, skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangose 6–14 % mažesnis už įrengiant kelią nustatytas pradinės ribines vertes.
4. Analizuojant granito užpildo paviršiaus apdaro, asfaltbetonio AC 11 VS, skaldos ir mastikos asfalto SMA 11 S dangų paviršiaus atsparumo slydimui kitimą, nustatyta, kad sukibimo koeficientas 31 %, 2 %, 18 % didesnis už įrengiant kelią nustatytas pradinės ribines vertes. Atlikus daugkartinio trupinimo dolomito užpildo ir garinto užpildo nustatytų sukibimo koeficiento vertčių palyginimą galima teigti, kad, skirtumai tarp rezultatų yra santykinai nedideli ir daugkartinio trupinimo dolomito užpildas yra lygiavertis granito užpildui automobilių kelio viršutinėje dangoje atsparumo slydimui aspektu.
5. Atlikus teorinius ekonominio efekto skaičiavimus, apskaičiuota, kad stambiojo $D_{(S)}$ užpildo dalis asfalto mišinių AC 11 VS ir SMA 11 VS kainoje sudaro iki 20 %, o granito užpildo iki 29 %. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad dolomito užpildo, pagaminto naudojant daugkartinio trupinimo technologiją, kaina yra iki 10 % mažesnė už lygiavertčių savybių granito užpildo ir, kad tai ekonomiškai naudinga.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyta, kad užpildų gamybos technologijomis pagaminti užpildai turi tenkinti ne tik Europinius bei nacionalinius normatyvinius techninius reikalavimus užpildams, bei atsparumo slydimui reikalavimus, bet ir turėtų būti ekonomiškai naudingi.
2. Eksperimentiniais laboratoriniais tyrimais nustatčius daugkartinio trupinimo dolomito užpildo savybes: sausų dalelių tankį, atsparumą dėvėjimuisi (mikro Devalio koeficientas), atsparumą trupinimui (Los Andželo koeficientas), atsparumą smūgiams, atsparumą poliruojamumui, atsparumą dilimui dėl dygliuotųjų padangų, atsparumą šaldymui ir atšildymui, atliktas mechaninių savybių vertinimas su dolomito užpildu, kuris pagamintas nenaudojant daugkartinio trupinimo technologijos, nustatyta, kad iki 23 % jis atsparesnis už minėtą dolomito užpildą.
3. Įvertinus daugkartinio trupinimo dolomito užpildo, fizikinių ir mechaninių savybių vertes su kitos rūšies užpildo – granito savybių vertėmis, pagal gautus eksperimentinius laboratorinius tyrimo rezultatus, nustatytos iki 10 % didesnės vertės už granito užpildo vertes. Bet jos lygiavertės, vertinant minėtų savybių atitiktį sunkiojo transporto veikiamo automobilių kelio viršutinės dangos mišinio normatyviniams techniniams reikala-

vimams TRA UŽPILDAI 19, t. y. daugkartinio trupinimo dolomito užpildas tolygus granito užpildui.

4. Atlikus natūrinius tyrimus Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose, kuriuose automobilio kelio viršutinė danga įrengta su dolomito užpildu, pagamintu taikant daugkartinį trupinimą, bei įvertinus kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui kitimą kelio dangos eksploatacijos metu nustatyta, kad dangos paviršiaus atsparumo slydimui vertės per pirmuosius 5-erius metus sumažėja ne daugiau kaip 15 % nuo pradinės vertės.
5. Atlikus teorinius ekonominio efekto skaičiavimus, kai asfalto mišiniai: asfaltbetonis, skaldos ir mastikos asfaltas, pagaminti su stambiuoju daugkartinio trupinimo dolomito užpildu, nustatyta, kad galimas dolomito užpildo panaudojimo asfalto mišiniuose ekonominis efektas iki 10 % lyginant su granito užpildo.

Literatūra ir šaltiniai

- Aavik, A. 2006. Estonian Road Network and Road Management. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 1(1), 39–44. ISSN:1822-427X.
- Abuhasel, K. A. (2020). Aggregate Production Optimization in a Stone-Crushing Plant Using the Taguchi Approach. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 1–6.
- Adel, G., Kojovic, T., & Thornton, D. (2006). *Mine-to-mill optimization of aggregate production*. Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Andriejauskas, T., Vorobjovas, V., & Mielonas, V. (2014, May). Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods. In *The 9th International Conference 'Environmental Engineering*.
- Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., & Góra, J. (2019). Physical properties of mineral and recycled aggregates used to mineral-asphalt mixtures. *Materials*, 12(20), 3437.
- Anfosso-Lédée, F., Kokot, D., Roe, P., Schwalbe, G., & Spielhofer, R. (2009). Recommendations for future harmonised EU policies on skid resistance, rolling resistance and noise emissions. *TYROSAFE project deliverable D*, 8, 70.
- Arasan, S., Yenera, E., Hattatoglu, F., Hınıslıoğlu, S., & Akbuluta, S. (2011). Correlation between shape of aggregate and mechanical properties of asphalt concrete: Digital image processing approach. *Road Materials and Pavement Design*, 12(2), 239–262. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9695245>.

Arndt, N. T., Fontboté, L., Hedenquist, J. W., Kesler, S. E., Thompson, J. F., & Wood, D. G. (2017). Future global mineral resources. *Geochemical Perspectives*, 6(1), 1–171. <https://doi.org/10.7185 / geochempersp.1.6>.

Asi, I. M. (2007). Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>.

Balasubramanian, A. (2017). Size reduction by crushing methods. March). doi, 10.13140 / RG.2.2.28195.45606.

Bartuska, L., Jerabek, K., & Chenguang, L. (2017). Determination of traffic patterns on urban roads. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 19(2), 103–108.

Bessa, I. S., Branco, V. T. C., Soares, J. B., & Neto, J. A. N. (2015). Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014212.

Byerly, B. L., Kareem, K., Bao, H., & Byerly, G. R. (2017). Early Earth mantle heterogeneity revealed by light oxygen isotopes of Archaean komatiites. *Nature Geoscience*, 10(11), 871–875. <https://doi.org/ 10.1038 / ngeo3054>.

Blatt, H., Tracy, R., & Owens, B. (2006). *Petrology: igneous, sedimentary, and metamorphic*. Macmillan.

Bouquety, M. N., Descantes, Y., Barcelo, L., de Larrard, F., & Clavaud, B. (2007). Experimental study of crushed aggregate shape. *Construction and Building Materials*, 21(4), 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.013>.

Bourrouilh-Le Jan, F. G. (2000). Déodat de Gratet de Dolomieu (1750–1801), vie et œuvre d'un géologue européen, naturaliste et lithologiste. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 330(1), 83–95. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)00106-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)00106-3).

Braga, A., Puodžiukas, V., Čygas, D., & Laurinavičius, A. (2003). Investigation of automobile roads pavement deterioration trends in Lithuania. *Journal of Civil Engineering and Management*, 9(1), 3–9. <https://doi.org/10.1080/13923730.2003.10531294>.

Bulevičius, M., Petkevičius, K., & Čirba, S. (2013). The influence of geometric parameters on strength properties of the aggregates used to produce asphalt mixtures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 894–902. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.858645>.

Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilioniene, D., & Čirba, S. (2011). Testing of mechanical-physical properties of aggregates, used for producing asphalt mixtures, and statistical analysis of test results/Skaldos, naudojamos asfalto misiniam gaminti, fiziniu bei mechaniniu savybiu tyrimai ir rezultatu statistine analize/Asfaltbetona maisijumu razosanai izmantoto mineralmaterialu fizikali mehanisko ipasibu testesana un testa rezultatu statistiska analize/Asfaltsegude.... *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6(2), 115–115. <https://doi.org/10.3846 / bjrbe.2011.16>.

Carmichael, R. S. (2017). *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals* (1988). CRC Press.

Celų specifikācijas 2019 [Kelių specifikacijos 2019] (latvių k.)

CEN/TS 15901-14:2016 *Road and airfield surface characteristics - Part 14: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal controlled slip (LFCN): ViaFriction (Road Analyser and Recorder of ViaTech AS)*. [Kelių ir aerodromų dangų paviršių charakteristikos. 14 dalis. Dangos paviršiaus atsparumo slydimui nustatymo, naudojant kontroliuojamo išilginio slydimo įtaisą, procedūra: ViaFriction (ViaTech AS kelio analizatorius ir rašytuvas)].

Chen, J. S., Chang, M. K., & Lin, K. Y. (2005). Influence of coarse aggregate shape on the strength of asphalt concrete mixtures. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1062–1075. <https://doi.org/10.11175/easts.6.1062>.

Chilingar, G. V. (1960). Notes on classification of carbonate rocks on basis of chemical composition. *Journal of Sedimentary Research*, 30(1), 157–158. <http://dx.doi.org/10.1306/74D709F2-2B21-11D7-8648000102C1865D>.

Cieżykowski, P., Maciejewski, J., & Bąk, S. (2017). Analysis of energy consumption of crushing processes—comparison of one-stage and two-stage processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(2), 17–24.

Czarnecka, E. T., & Gillott, J. E. (1982). Effect of different types of crushers on shape and roughness of aggregates. *Cement, Concrete and Aggregates*, 4(1), 33–36. <https://doi.org/10.1520/CCA10222J>.

Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., & Puodžiukas, V. (2008a). Research of experimental road pavement structures.

Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., Perveneckas, Z., & Motiejūnas, A. (2008b). Research of asphalt pavement structures on Lithuanian roads (I). *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3(2), 77–83. <https://doi.org/10.3846/1822-427X.2008.3.77-83>.

Cygas, D., Laurinavicius, A., & Skrinskas, S. (2005, May). Feasibility of application of local aggregates in asphalt concrete pavements in Lithuania. In *Proceedings of the 6th International Conference Environmental Engineering: Selected Papers* (Vol. 2, pp. 26–27). ISBN 9986-05-851-1.

Dagilienė, L.; Mykolaitienė, V. 2012. Public Sector Environmental Accounting: the Example of Lithuanian Mineral Resources, *Economics and Management* 17(2):425–432. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.em.17.2.2162>

Deltuva, J., Gailius, A., Gumuliauskas, L., Kulikauskas, M., Malakauskas, M., & Martynaitis, M. (1982). Statybinės medžiagos. *Mokslas, Vilnius*.

Deltuva, J., & Vaitkevičius, V. (2006). Statybinių nerūdinių medžiagų gavyba, perdirbimas ir naudojimas: *vadovėlis*. 276 p.

Descornet, G., Schmidt, B., Boulet, M., Gothie, M., Do, M. T., Fafie, J., ... & Viner, H. (2006). HERMES Project (Harmonization of European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance).

Dickmann, N. (2015). *The Rock Cycle*. Cavendish Square Publishing, LLC.

Diógenes, L. M., Bessa, I. S., Castelo Branco, V. T. F., & Mahmoud, E. (2019). The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 877–894. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422792>.

Do, M-T.; Roe, P. 2008. *Report on state-of-the-art of test methods*. TYROSAFE project deliverable D04, 89 p.

EEA (2001). Late lessons from early warnings: the precautionary principle: 1986–2000. Environmental issue report Nr 22. European Environment Agency. Copenhagen. 132 p.

El-Basyouny, M., & Mamlouk, M. S. (1999, January). Effect of aggregate gradation on the rutting potential of Superpave mixes. In *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, DC.

EN 933-1:2012 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. [Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas]

EN 933-3:2012 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index. [Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 3 dalis. Dalelių formos nustatymas. Plokštumo rodiklis]

EN 933-4:2008 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape - Shape index. [Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 4 dalis. Dalelių formos nustatymas. Formos rodiklis].

EN 933-5:2002 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles [Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 5 dalis. Trupintųjų ir skaldytųjų dalelių santykinio kiekio stambiuosiuose užpilduose nustatymas]

EN 1097-1:2011 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval) [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (Devalio metodas)]

EN 1097-2:2010 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation EN 1097-2:2020, [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai]

EN 1097-6:2013 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas]

EN 1097-8:2009 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 8: Determination of the polished stone value. [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 8 dalis. Akmens poliruojamumo nustatymas]

EN 1097-9:2014 Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres – Nordic test [Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 9 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi dėl dygliuotų padangų poveikio nustatymas. Šiaurės šalių metodas]

EN 13043:2002 *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. [Keliams, skridimo aikštėms ir kitoms eismo zonoms naudojamų bituminių mišinių ir paviršiaus apdorojimo sluoksnio mineralinės medžiagos]*

EN 1367-1 *Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing [Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo šaldymui ir atšildymui nustatymas]*

EN 1367-2 *Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 2: Magnesium sulfate test. [Bandymai užpildų šiluminėms savybėms ir atsparumui atmosferos poveikiams nustatyti. 2 dalis. Magnio sulfato metodas]*

Erichsen, E. (2015). Plotting aggregate degradation results from the Los Angeles test on a triangular diagram: proposal of a new quality ranking for aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 667–671. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0655-z>.

Erichsen, E., Ulvik, A., Wolden, K., & Neeb, P. R. (2008). Aggregates in Norway—Properties defining the quality of sand, gravel and hard rock for use as aggregate for building purposes. *Geology for Society, Geological Survey of Norway Special Publication*, 11, 37–46.

Erlingsson, S., Rahman, S., & Salour, F. (2017). Characteristic of unbound granular materials and subgrades based on multi stage RLT testing. *Transportation Geotechnics*, 13, 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.009>.

Fookes, P. G., Gourley, C. S., & Ohikere, C. (1988). Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 21(1), 33–57.

Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J., & Frost, C. D. (2001). A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of petrology*, 42(11), 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/33.11.2033>.

Gardziejczyk, W., & Wasilewska, M. (2012). Assessment of skid resistance of asphalt mixtures in laboratory conditions. *Archives of Civil Engineering*, 58(4), 521–534. <https://doi.org/10.2478/v.10169-012-0028-6>.

Gasiūnienė, V. E. (2007). Lithuanian mineral resources and their usage: today, future, and problems. *Estonian J. of Earth Sc*, 3, 3–13.

Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., & Khadem, M. (2012). Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.895>.

Gothie, M. 1996 Relationship between Surface Characteristics and Accidents, in *Proceedings of 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, 271–281.

Grybauskienė, V. (2008). *Pažeistos teritorijos, sąvartynai: mokomoji knyga*. 44 p.

Gulevitš, J., Bashkite, V., & Iskūl, R. (2010, June). Sustainable development of Estonian mineral resources for economical usage in roads construction. In *9th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology II* , p. 77–82. Pärnu, Estonia.

- Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). Mineral processing design and operations: an introduction. Elsevier.
- Hafeez, I., Juniad, F., Kamal, M. A., & Hussain, J. (2016). Influence of single-and two-stage aggregate manufacturing mechanisms on asphalt mixture performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015180.
- Hall, J. W., Smith, K. L., Titus-Glover, L., Wambold, J. C., Yager, T. J., & Rado, Z. (2009). *Guide for Pavement Friction*. Final Report for NCHRP Project 01-43. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Haritonovs, V., Tihonovs, J. (2014). Use of Unconventional Aggregates in Hot Mix Asphalt Concrete. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 9(4): 276–282. <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2014.34>
- Haritonovs, V., Tihonovs, J., & Smirnovs, J. (2016). High modulus asphalt concrete with dolomite aggregates. *Transportation Research Procedia*, 14, 3485–3492. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.314>.
- Haritonovs, V., Zaumanis, M., Brencis, G., & Smirnovs, J. (2012). Performance characterization of bituminous mixtures with dolomite sand waste and BOF steel slag. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(7), 1132–1137. <https://doi.org/10.1520/JTE20120187>.
- Hodler, R. (2006). The curse of natural resources in fractionalized countries. *European Economic Review*, 50(6), 1367–1386. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2005.05.004>.
- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116–139.
- Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, conservation and recycling*, 52(1), 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- Izaks, R.; Haritonovs, V.; Klasa, I.; Zaumanis, M. (2015). Hot Mix Asphalt With High RAP Content. *Procedia Engineering*, 114, 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2015.08.009>
- ITASFALTAS 08 Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės. Patvirtintas Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos direktoriaus 2009 m. sausio 12 d. Nr. V-16.*
- Yusof, N. Q. A. M., & Zabidi, H. (2016). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*, 19, 975–980. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.144>.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2009). Fundamentals of rock mechanics. John Wiley & Sons.
- Jakulytė, S., Laurinavičius, A., & Puodžiukas, V. (2019). KELIO SKERSINIO PROFILIO PARINKIMO PAGAL PROJEK TINĮ VIDUTINĮ PAROS EISMO INTENSIVUMĄ IR SUDĖTĮ METODIKOS ANALIZĖ. *Science: Future of Lithuania*, 11. <https://doi.org/10.3846/mla.2019.10589>.
- Junevičius, R. (2012). Kelių tiesimo užpildų gamybos įrenginiai. Trupintuvai.

- Kandhal, P. S., & Parker, F. (1998). Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements, vol. 405. *Transportation Research Board*.
- Kane, M., Scharnigg, K., Conter, M., Roe, P., & Schwalbe, G. (2009). Report on different parameters influencing skid resistance, rolling resistance and noise emissions. *TYROSAFE Deliverable D*, 10.
- Kane, M.; Zhao, D.; Do, M-T.; Chailleux, E.; De-Lalarrard, F. (2010). Exploring the Ageing Effect of Binder on Skid Resistance Evolution of Asphalt Pavement, *Road Materials and Pavement Design* 11: 543–557. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2010.9690346>
- Karu, V.; Notton, A.; Guleviš, J.; Valgma, I., & Rahe, T. (2015). Improvement of Technologies for Mining Waste Management. In *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1, pp. 127–132. <http://dx.doi.org/10.17770etr2013vol1.811>
- Kesler, S. E., Simon, A. C., & Simon, A. F. (2015). *Mineral resources, economics and the environment*. Cambridge University Press.
- Klein, C. A., Cheever, F., Birdsong, B. C., Klass, A. B., & Biber, E. (2018). *Natural Resources Law: A Place-Based Book of Problems and Cases*. Wolters Kluwer Law & Business. ISBN: 9781454893509. 1248 p.
- Klizas, P.; Gadeikis, S.; Žilionienė, D. (2015). Evaluation of Moraine Loams' Filtration Properties, *The Baltic Journal of Road Bridge Engineering* 10(4):293–297. <http://dx.doi.org/103846/bjrbe.2015.37>
- Kogbara, R. B., Masad, E. A., Kassem, E., Scarpas, A. T., & Anupam, K. (2016). A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 114, 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>
- KPT SDK 19 Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės*.
- Laciak, M., & Šofranko, M. (2014). Optimization of device selection in design of technological lines for the aggregates production. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 611, pp. 387–394). Trans Tech Publications Ltd.
- Labus, M., & Such, P. (2016). Microstructural characteristics of wellbore cement and formation rocks under sequestration conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, 77–87.
- Langer, W. (2016). Sustainability of aggregates in construction. In *Sustainability of construction materials* (pp. 181–207). Woodhead Publishing.
- Langer, W. (2006). Crushed stone. In *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets and Uses* (pp. 171–180). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Littleton.
- Laurinavičius, A., & Čygas, D. (2003). Thermal conditions of road pavements and their influence on motor traffic. *Transport*, 18(1), 23–31. [doi/abs/10.1080/16483840.2003.10414059](http://dx.doi.org/10.1080/16483840.2003.10414059)
- Laurinavičius, A., Oginskas, R., & Žilionienė, D. (2006). Research and evaluation of Lithuanian asphalt concrete road pavements reinforced by geosynthetics. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 1(1), 21–28.

Laurinavičius, A., & Žilionienė, D. (2001). Lithuanian state road network and its modernization. *Transportas*, XVI t, (6), 208–214.

Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2019). Automobilių kelių užpildų techninių reikalavimų aprašas TRA UŽPILDAI 19. *TAR*, 2019-06-18, Nr. 9738.

<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/3bbbe4d0910e11e9ae2e9d61b1f977b3>

Lietuvos geologijos tarnyba, 2020, <https://www.lgt.lt/>

Lodhi, D. K. S., & Yadav, R. K. (2016). Effect of gradation of aggregates on Marshall Properties of DBM Mix Design. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, ISSN, 2319–5991.

LST EN 12697-5:2019 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 5 dalis. Didžiausiojo tankio nustatymas.

LST EN 12697-6:2020 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas

LST EN 12697-8:2019 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymėtumo rodiklių nustatymas.

LST EN 12697-30:2019 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 30 dalis. Bandinio paruošimas smūginiu tankintuvu.

LST EN 12697-34:2020 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 34 dalis. Maršalo bandymas.

LST EN 12697-35:2016 Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 35 dalis. Maišymas laboratorijoje.

Maras, E. E., Caniberk, M., Odabas, M. S., Degerli, B., Maras, S. S., & Maras, H. H. (2016). An evaluation of the relationship between physical/mechanical properties and mineralogy of landscape rocks as determined by hyperspectral reflectance. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 164. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2232-6>.

Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., & Nejad, F. M. (2016). Pavement friction and skid resistance measurement methods: A literature review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(04), 537.

Meinert, L., Robinson, G., & Nassar, N. (2016). Mineral resources: Reserves, peak production and the future. *Resources*, 5(1), 14. <https://doi.org/10.3390/resources5010014>.

Mikhail, R., & Ruslan, B. (2019). Selection of the technological line structure for the building aggregates production using centrifugal impact crushers. *Architecture and Engineering*, 4(1). 2020-10-29

Moll, S., Bringezu, S., Schütz, H., Mortensen, L., & Kazmierczyk, P. (2003). Resource use in European countries. *European Topic Centre on Waste and Material Flows*. Copenhagen.

Moll, S., Bringezu, S., & Schütz, H. (2005). *Resource use in European countries: An estimate of materials and waste streams in the community, including imports and exports using the instrument of material flow analysis* (No. 1). Wuppertal Report.

Motuza, G., & Staškus, V. (2009). Seniausios Lietuvos uolienos. *Geologijos akiračiai*, ISSN, 1392-0006.

- Mrugała, J., Chomicz-Kowalska, A. (2017). Influence of the production process on the selected properties of asphalt concrete. *Procedia Engineering*, 172, 754–759. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.112>.
- Mrugała, J., & Iwański, M. M. (2015). Resistance to permanent deformation of asphalt concrete with FT wax modified foamed bitumen. *Procedia Engineering*, 108, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.171>.
- Mukherje, S. (2011). Origin Of Minerals And Their Transformations In Nature Under Various Environmental Conditions. In *Applied Mineralogy* (pp. 231–261). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1162-4_9.
- Naujokaitis, A. (2007). *Statybinės medžiagos. Betonai: mokomoji knyga [Building materials. Concretes]*. Vilnius: Technika. 356 p. ISBN 9955-28-209-9.
- Nilsson, R. (2001). Fatigue of asphalt mixtures: continuum damage mechanics applied to data from laboratory tests. *BULLETIN*, (13). ISSN: 1404–272X.
- Noyce, D. A., Bahia, H. U., Yambo, J. M., & Kim, G. (2005). Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements. *Draft Literature Review and State Surveys, Midwest Regional University Transportation Center (UMTRI), Madison, Wisconsin*.
- Olivares-Marín, M., Cuerda-Correa, E. M., Nieto-Sánchez, A., Garcia, S., Pevida, C., & Román, S. (2013). Influence of morphology, porosity and crystal structure of CaCO₃ precursors on the CO₂ capture performance of CaO-derived sorbents. *Chemical engineering journal*, 217, 71–81.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). Pavement Design and Materials. *John Wiley & Sons*.
- Patašova, T., & Jurgaitis, A. (2008). Comparison of mineral resources calculation methods for different genetic types of gravel and sand deposits. *Geologija*, (63). <https://doi.org/10.2478/v10056-008-0041-2>.
- Pearce, J. (1996). Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19, 120–125. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1996/v19i4/005>.
- Pellant, C., & Pellant, H. (2014). Rocks and minerals. *Bloomsbury Publishing*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408133-8.00001-8>.
- Pilegis, M., Gardner, D., & Lark, R. (2016). An investigation into the use of manufactured sand as a 100% replacement for fine aggregate in concrete. *Materials*, 9(6), 440. <https://doi.org/10.3390/ma9060440>.
- Prowell, B. D. (2001). Design, Construction, and Early Performance of Virginia's Hot-Mix Asphalt Stabilizer and Modifier Test Sections. *Transportation research record*, 1767(1), 7–14. <https://doi.org/10.3141/1767-02>.
- Puodžiukas, V., & Braga, A. (2014). Valstybinės reikšmės kelių suskirstymo pagal paskirtį ir plėtros schemos iki 2040 m. projektas.
- Räsänen, M., Kupiainen, K., & Tervahattu, H. (2003). The effect of mineralogy, texture and mechanical properties of anti-skid and asphalt aggregates on urban dust. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(4), 359–368. <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0200-y>.

Rajan, B., & Singh, D. (2017). Comparison of shape parameters and laboratory performance of coarse aggregates produced from different types of crushing operations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017044.

Ramukevičius, D. (2008). Statybos pagrindai: metodiniai patarimai. Mokomoji knyga. p. 46.

Rees, J. (2017). *Natural resources: allocation, economics and policy*. Routledge, 522 pages

Sachs, J. D.; Warner, A. M. (2001). The curse of natural resources. *European economic review*, 45(4-6), 827–838.

Santucci, L., & Engineer, L. F. (2013). Technology Transfer Program.

Sauffi, A. S., Ibrahim, W. M. W., Abdulla, M. M. A. B., Ahmad, R., Zaidi, F. A., & Sandu, A. V. (2019, August). A Review of Carbonate Minerals as an Additive to Geopolymer Materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 551, No. 1, p. 012084). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/551/1/012084>.

Scharnigg, K., & Schwalbe, G. (2010). Report on knowledge gaps and proposals for further research concerning optimisation for road surfaces and tyres for skid resistance, rolling resistance and noise emissions TYROSAFE project <http://tyrosafe.fehrl.org>.

Schön, J. H. (2015). *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*, vol. 65. Elsevier.

Siriphun, S., Chotisakul, S., & Horpibulsuk, S. (2016). Skid resistance of asphalt concrete at the construction stage based on Thai aggregates. *Journal of materials in civil engineering*, 28(12), 04016145.

Siswosoebrotho, B. I., Kusnianti, N., & Tumewu, W. (2005). Laboratory evaluation of Lawele Buton natural asphalt in asphalt concrete mixture. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, No. 5, pp. 857–867.

Sivilevičius, H., & Šukevičius, Š. (2007). Dynamics of vehicle loads on the asphalt pavement of european roads which cross lithuania. *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering*, 2(4). ISSN 1822-427X print.

Skrinskas, S., Gasiūniene, V. E., Laurinavičius, A., & Podagėlis, I. (2010). Lithuanian mineral resources, their reserves and possibilities for their usage in road building. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(4), 218–228. <https://doi.org/10.3846/bjrb.2010.30>.

Skorseth, K. (2000). *Gravel roads: maintenance and design manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Sousa, L. M. (2013). The influence of the characteristics of quartz and mineral deterioration on the strength of granitic dimensional stones. *Environmental earth sciences*, 69(4), 1333–1346. DOI 10.1007/s12665-012-2036-x

Souza, L. T., Kim, Y.-P., Souza, F. V., & Castro, L. S. (2012). Experimental testing and finite-element modeling to evaluate the effects of aggregate angularity on bituminous mixture performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(3), 249–258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000386](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000386).

Sudonienė, V., & Atkocevičienė, V. (2013). Land Resources Planning and Management. *RURAL DEVELOPMENT* 2013, 456. ISSN 2345-0916

Sun, W., Wang, L., & Wang, Y. (2017). Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(3), 322–328. ISBN-13: 978-1259862618.

Sun, Y. H., Wu, S. P., Zhu, J. Q., & Zhong, J. J. (2012). Classification of fine recycled aggregate used in asphalt concrete. In *Advanced Materials Research* (Vol. 365, pp. 33–37). Trans Tech Publications Ltd. 2020-11-09 del D_BAC

Šernas, O.; Strumskys, M.; Skrodenis, D. 2014. Possibility of use of granite fines in asphalt pavements. 9th *International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23. p. 1–7. ISSN 2029-7092.

Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Tasa, D. (2005). *Earth: an introduction to physical geology*. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.

Topal, A., & Sengoz, B. (2005). Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.004>.

TRA ASFALTAS 08 Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas. Patvirtintas Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos direktoriaus 2009 m. sausio 12 d. Nr. V-15.

TRA BITUMAS 08/14 Automobilių kelių bitumų ir polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų aprašas. Patvirtintas Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos direktoriaus 2014 m. kovo 17 d. Nr. V-86.

TRA UŽPILDAI 19 Automobilių kelių užpildų techninių reikalavimų aprašas. Patvirtintas Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos direktoriaus 2019 m. birželio 17 d. įsakymu Nr. V-110.

Tucker, M. E., & Wright, V. P. (2009). Carbonate sedimentology. *John Wiley & Sons*. ISBN: 978-0-632-01472-9, 496.

European Aggregates Association (UEPG).

Ündül, Ö. (2016). Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks. *Engineering Geology*, 210, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.001>

Vaiana, R., Capiluppi, G. F., Gallelli, V., Iuele, T., & Minani, V. (2012). Pavement surface performances evolution: an experimental application. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1149–1160. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.964>

Vaitkus, A., Andriejauskas, T., Šernas, O., Čygas, D., & Laurinavičius, A. (2019). Definition of concrete and composite precast concrete pavements texture. *Transport*, 34(3), 404–414. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.10411>

Vaitkus, A., Andriejauskas, T., Vorobjovas, V., Jagniatinskis, A., Fiks, B., & Zofka, E. (2017a). Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Construction and Building Materials*, 152, 345–356.

Vaitkus, A., Laurinavičius, A., Oginskas, R., Motiejūnas, A., Paliukaitė, M., & Barvidienė, O. (2012). The road of experimental pavement structures: Experience of five years operation. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7(3), 220–227.

Vaitkus, A., & Vorobjovas, V. (2015). Dolomito skaldos panaudojimas asfalto viršutinio sluoksnio mišiniams, *Lietuvos keliai* 1(34): 57–61. ISSN 1392-8678.

Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Kleizienė, R., Šernas, O., & Gražulytė, J. (2017b). Modified Asphalt Mixtures for Heavy Duty Pavement Wearing Layers. *Construction and Building Materials*. 2017. 503-511. ISSN 0950-0618.

Van der Meulen, M. J., Koopmans, T. P. F., & Pietersen, H. S. (2003). Construction raw materials policy and supply practices in Northwestern Europe. *Industrial Minerals—Resources, Characteristics and Applications*.

Viklander, P., & Eigenbrod, D. (2000). Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing. *Cold Regions Science and Technology*, 31(2), 151–162.

Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1-3), 1–81.

[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)

Wasilewska, M., Gardziejczyk, W., & Gierasimiuk, P. (2018, May). Effect of aggregate grading compositions on skid resistance of Exposed Aggregate Concrete pavement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 356, No. 1, p. 012001. IOP Publishing.

Wasilewska, M., & Zimnoch, K. (2014). Odporność na polerowanie mieszanek mineralnych z kruszywem bazaltowym i granitowym. *Materiały Budowlane*, (5), 123–124. <https://doi.org/10.15199/33.2015.07.27>

West, T. R., Choi, J. C., Bruner, D. W., Park, H. J., & Cho, K. H. (2001). Evaluation of dolomite and related aggregates used in bituminous overlays for Indiana pavements. *Transportation Research Record*, 1757(1), 137–147.

Whalen, J. B., Currie, K. L., & Chappell, B. W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to mineralogy and petrology*, 95(4), 407–419.

Wills, B. A., & Finch, J. (2015). Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann. ISBN-13: 978-0080970530

Wojcik, D. (2018). *The New Oxford Handbook of Economic Geography*. Oxford University Press.

World Road Association. (2003). *Road Safety Manual: Recommendations from the World Road Association (PIARC)*. Route2 Market.

WT-1 2014, Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych. [Asfalto ir paviršiaus apdaro mišinių užpildai valstybinės reikšmės keliuose] (lenkų k.).

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Šneideraitienė, L.; Žilionienė, D., 2020. „Assessment of Skid Resistance of Road Pavements“ the *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. ISSN 1822-427/eISSN1822-4288 2020 Volume 15 Issue 3 (Special Issue):157–168 <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.490>.

Šneideraitienė, L.; Žilionienė, D., 2018. „Mineralinių Medžiagų Mechaninių Savybių Tyrimai, Analizė ir Vertinimas“. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*. ISSN 2029-2341 / eISSN 2029-2252 2018 Volume 10, Article ID: mla.2018.3255, 1–9 <https://doi.org/10.3846/mla.2018.3255>.

Šneideraitienė, L.; Žilionienė, D., 2019. „Asfalto mišinių AC 11 VS ir SMA 11 S su skirtingomis mineralinėmis medžiagomis ekonominio efekto analizė ir vertinimas“, *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania 2019 m.* ISSN 2029-2341 / eISSN 2029-2252., vol. 11, art. no. mla.2019.10588, p. 1–6. <https://doi.org/10.3846/mla.2019.10588>.

Straipsniai kituose leidiniuose

Šernas, O.; Vorobjovas, V.; Šneideraitienė, L.; Vaitkus, A. 2016. Evaluation of asphalt mix with dolomite aggregates for wearing layer. *Transportation research procedia. Transport Research Arena TRA2016*, April 18–21. p. 14. 732–737. ISSN 2352-1465.

Šneideraitienė, L., & Žilionienė, D., 2017. Research and Analysis of Dolomite Aggregate for Resistance to Fragmentation. In *Transport Infrastructure and Systems: Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems*. ISBN 9781138030091. eISBN 9781315281896. p. 233–236.

Vorobjovas, V.; Šernas, O.; Žilionienė D.; Šneideraitienė L.; Filotenkovas, V. 2017. „Evaluation of High-Quality Dolomite Aggregate for Asphalt Wearing Course“, *10th International conference “Environmental Engineering”*, 27–28 April, Vilnius, Lithuania. 2017, art. no. enviro.2017.157. eISBN 9786094760440. eISSN 2029-7092. p. 1–6. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.157>

Šneideraitienė L.; Stasytis G.; Žilionienė D. 2016. „Skalda, Žvyras, Smėlis ir Molis – Vietinės Kelių Tiesybos Medžiagos“, *19-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos pranešimų medžiagoje* (2016-05). 1–8. ISBN 9786094579226. ISSN 2029-7149.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The European Union (EU) road network covers more than 4.8 million km of roads, of which more than 85 thousand km in Lithuania, 73 thousand km in Latvia, and 300 thousand km in Poland. The road network is constantly maintained, upgraded, and developed, seeking to ensure traffic safety and economic benefit. The price of the asphalt mixture increases when imported from other countries. Therefore it is very important to use aggregates locally produced. In the road surfacing the granite aggregate is used most commonly. Dolomite, as a natural material, is widely recognized as a not suitable material for use in road surfacing. The multiple crushing technology dolomite aggregate obtains much better characteristics almost even to the granite aggregate. In the absence of systematic studies and detailed assessment of this aggregate, it is important to research and determine the distribution of physical and mechanical properties and their assessment for the granite aggregate. It is also important to conduct research results of the skid resistance of road surfaces of the several years of exploitation and to evaluate the suitability of the dolomite aggregate.

Relevance of the thesis

When choosing aggregates produced in other countries and using them for road surfacing, the cost of road construction increases. To reduce the road construction costs, it is necessary to replace the imported aggregates with those made in Lithuania, meeting the

requirements for the wearing courses of asphalt pavement. After processing dolomite rock into aggregates by multiple crushing technology in Lithuania, the produced dolomite aggregate is used for road surfacing. It should also be noted that the production technology of this aggregate has not been described in any research works till now. No scientific research has been carried out on the properties of this aggregate. It has not been studied or assessed if the road surfacing will still be skid resistant several years of using the dolomite aggregate in road surfacing – asphalt concrete, stone mastic asphalt, or surface dressing.

Therefore, an experimental research plan was developed to investigate the physical and mechanical properties of the multiple crushing technology dolomite aggregate and the skid resistance of road surfacing.

Object of the thesis

The object of the theses is the dispersion of the values of physical and mechanical properties of dolomite aggregate, produced using multiple crushing technology, and change in the skid resistance of the road surface during the operation of the road surface.

Aim of the thesis

The theses aim to evaluate the dolomite aggregate produced using multiple crushing technology for automobile road surfacing.

Tasks of the thesis

In order to achieve the aim of the thesis, the following tasks were set:

1. To analyze scientific studies and normative technical documents regulating the processes and requirements for the production of aggregates to be used for road surfacing. And to analyze scientific studies related to the impact of aggregates on the performance of asphalt mixtures used for road surfacing.
2. To set the physical and mechanical properties of dolomite aggregate produced using multiple crushing through the experimental laboratory tests, in comparison with dolomite aggregate without the multiple crushing technology.
3. To evaluate the equivalence of the physical and mechanical properties of dolomite aggregate, produced by multiple crushing technology, compared with another type of aggregate, and determine the possibility of its application for road surfacing of heavy vehicles.
4. After the research on the roads of the national significance of Lithuania road surfacing of the asphalt mixture with dolomite aggregate, produced by multiple crushing technology, to identify the change in the skid resistance of pavement surface during road operation.
5. To calculate the possible economic effect of dolomite aggregate for the production of mixtures to be used in road surfacing compared to alternative aggregates available on the market.

Research methodology

To achieve the goal of the dissertation the following research methods were used to determine the physical and mechanical properties of aggregates: resistance to wear (Micro-Deval coefficient), resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient), impact value, particle density, resistance to polishing, resistance to abrasion from studded tires, resistance to freezing and thawing, to identify the skid resistance of the automobile road surfacing – pavement surface. Mathematical statistical methods and analyses were also applied to estimate the potential economic effect.

Scientific novelty of the thesis

Having prepared the dissertations, the following new results significant for the science of civil engineering were obtained:

1. Determined physical and mechanical properties of the dolomite aggregate, compared to the other types of aggregate, are equivalent and meet the normative technical requirements for the mixtures used in the wearing courses of asphalt pavement exposed to heavy traffic.
2. Specific measurements on roads of national importance in Lithuania, where the automobile road surfacing is made of asphalt concrete mixture with dolomite aggregate, produced using multiple crushing technology, showed that the values of the skid resistance of the road surface decreased by no more than 15% during the first five years of operation.

Practical value of the research findings

When using multiple crushing production technology of dolomite aggregate, the physical and mechanical properties of the aggregate comply with the normative technical requirements for asphalt mixtures used for heavy traffic loads. When dolomite aggregate is used in road surfacing the values of the skid resistance of pavement surface during the first 5 years of road operation decreased by not more than 15% from the initial value. The economic effect of this aggregate is also possible since it is used to produce mixtures for the wearing courses, up to 10% savings can be achieved compared to the granite aggregate used in the production of asphalt mixtures.

Defended statements

1. Dolomite aggregate, produced by multiple crushing technology, guarantees the physical and mechanical properties, meeting the normative technical requirements for road surfacing exposed to heavy traffic loads.
2. The values of the skid resistance of road surfacing with dolomite aggregate, produced by multiple crushing technology, decrease by not more than 15% from the initial value during the first five years of road operation.

Approval of the research findings

7 scientific articles were published on the topic of the thesis: 1 article in a scientific journal included in *Clarivate Analytics Web of Science* database (Šneideraitienė & Žilionienė

2020); 2 articles of conference material recorded in the databases of the *Clarivate Analytics Web of Science* (Šernas et al., 2016; Vorobjovas et al., 2017); 2 articles in other peer-reviewed conference databases (Šneideraitienė et al., 2016; Šneideraitienė & Žilionienė, 2017); and 2 articles in other databases (Šneideraitienė & Žilionienė, 2018; Šneideraitienė & Žilionienė 2019).

The results of the research conducted in this thesis have been published in nine international conferences in Lithuania and abroad:

Conference of Young Scientists “*Science – Future of Lithuania*” 2016, 2018, 2019, 2020, Vilnius, Lithuania;

International Conference *Transport Research Arena TRA 2016*, Warsaw, Poland;

The AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems 2017, Rome, Italy;

International Conference “*Environmental Engineering*” 2017, Vilnius, Lithuania;

The XXIX International Baltic Road Conference 2017, Tallinn, Estonia;

International Conference “*Trends in the Change of Regional Competitiveness*” 2019, Šiauliai, Lithuania.

The structure of the thesis

The theses consist of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, literature sources, a list of the author's scientific publications on the topic of the dissertation and a summary in English. There are also ten appendices at the end.

The volume of this scientific work is 119 pages, excluding appendices; 5 numbered formulas, 45 figures and 18 tables were used in the text. 168 literature sources were used when preparing the theses.

Acknowledgements

First of all, the author is grateful to her scientific supervisor Prof. Dr. Daiva Žilionienė for her valuable scientific consultations and advice, all kinds of help and patience while studying for a doctorate and preparing the dissertation. The author also thanks Prof. Dr Audrius Vaitkus for his helpful scientific consultations and insights, ideas and remarks on the preparation of the dissertation, proposals for the experimental. The author also expresses her gratitude to the dissertation experts for their accurate remarks and comments, patience and comments, their patience and understanding. The author thanks all the colleagues of the Road Department of VILNIUS TECH and the Road Research Laboratory of the Road Research Institute of VILNIUS TECH for their support during the doctoral studies. The author is grateful to the Board of the company Dolomitas AB for the financial support for doctoral studies, especially to Mr. Geraldas Statulevičius, who encouraged her to take up research activities. The author sincerely thanks her family and friends for their support, patience, understanding and encouragement not to stop in the most challenging moments while studying for a doctorate.

1. Analysis of scientific research on the properties of aggregates

Natural resources are divided and grouped by scientists according to the purpose of their use (Ben-Itzhak *et al.*, 2016; Bringezu *et al.*, 2006; Grybauskienė, 2008; Klein *et al.*, 2018;

Mališauskas, 1993; Moll, 2003; Rees, 2017). When classifying rocks and summarizing characteristics of dolomite and granite, the main chemical elements that make up the dolomite rock are CaO and MgO, the main chemical element of the granite rock is SiO₂ (Haritonovs *et al.*, 2012; Sauffi *et al.*, 2019). More than 50% of the resources in the construction sector of the world are crushed stone (processed rock) (Langer, 2016; Meulen *et al.*, 2003, UEPG 2017). When building roads it is cost-effective to use local rocks processed into aggregates as this allows to save 30% of import costs (Čygas *et al.*, 2005; Dagilienė *et al.*, 2012; Gulevičius *et al.*, 2010; Haritonovs *et al.*, 2014; Karu *et al.*, 2015; Klizas *et al.*, 2015; Skrinskas *et al.*, 2010). Aggregates suitable for the production of asphalt mixtures are produced in technological lines by crushing granite rock in at least three stages (Deltuva ir Vaitkevičius, 2006; Gupta *et al.*, 2016; Holmberg *et al.*, 2017; Wills *et al.*, 2015).

The analysis of scientific works shows that the values and categories for the properties of aggregates used in the production of asphalt mixtures in European countries are given in the standard *EN 13043:2002 Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Treatments for Roads, Airfields and other Trafficked Areas*. Many European countries have developed national normative technical documents which contain the main requirements and values for the properties of aggregates used in the production of mixtures of the asphalt wearing courses: grading – G_F85, G_C90/20; particle shape: shape index SI₂₀ and flatness index FI₂₀, the values of which ≤ 20%, relative content of crushed and broken particles C_{100/0}, value ≤ 100%, resistance to wear M_{DE}15, value ≤ 15, resistance to fragmentation LA₂₀, value ≤ 20, impact value SZ₁₈, value ≤ 18%, resistance to polishing PSV₅₀, value ≥ 50, resistance to abrasion from studded tyres A_N10, value ≤ 10, resistance to freezing and thawing F₁. The most important factors in the structure of aggregate of asphalt mixture are grading and particle shape (Šernas *et al.*, 2016; Vaitkus ir Vorobjovas 2015; Wasilewska *et al.*, 2018). It is very important to ensure a proper index of particle shape in order to obtain asphalt mixture resistant to plastic deformations (Arasan *et al.*, 2011; El-Basyouny ir Mamlouk, 1999; Bessa *et al.*, 2015; Golalipour *et al.*, 2012; Prowell, 2001; Vorobjovas *et al.*, 2017). Arasanas *et al.*, (2011), Asis (2007), Chenas *et al.*, (2005) and Siswosoebrotho *et al.*, (2005) investigated how the particle shape of aggregate determines the mechanical properties of asphalt mixture. When using only cube-shaped aggregates in the production of asphalt mixtures that are resistant to fragmentation, wear, polishing and water absorption, it is possible to ensure a sustainable functioning of asphalt mixture (Wasilewska *et al.*, 2018). According to Vaitkus *et al.* (2017) the use of crushed aggregates in the production of asphalt mixtures improves not only the friction between the particles, but also the friction between the vehicle wheels and the road pavement.

During road operation it is important to ensure a proper skid resistance of automobile road surfacing. It depends on the extent to which the aggregates of the automobile road surfacing are able to resist the forces of friction. The wheel, continuously acting on the pavement over an appropriate period of time, can polish aggregate particles, reduce surface roughness and angularity of the aggregate particles, and pavement becomes slippery. A wet or icy asphalt pavement is extremely dangerous, since the friction force between the wheel and the pavement reduces to a minimum and such pavement is unsafe and dan-

gerous to operate (Kandhal ir Parker, 1998; Laurinavičius *et al.*, 2006; Santucci and Engineer, 2013; Siriphun *et al.*, 2016; Mataei *et al.*, 2016; Noyce *et al.*, 2005; Räisänen *et al.*, 2003; Vaiana *et al.*, 2012; Wasilevska *et al.*, 2018).

In Lithuania, during the acceptance of works the values of the skid resistance index of automobile road surface (basic method) depending on the significance of the road and measured at a speed of 60 km/h with a longitudinal controlled slip device according to *CEN/TS 15901-14:2016 Road and Airfield Surface Characteristics – Part 14: Procedure for Determining the Skid Resistance of a Pavement Surface Using a Device with Longitudinal Controlled Slip (LFCN): ViaFriction (Road Analyser and Recorder of ViaTech AS)* shall be not less than the following limit values: on the main roads – 0.50, on the national and regional roads – 0.45 (IT ASFALTAS 08).

2. Experimental investigations of dolomite aggregates

The analysis of the scientific studies of other countries showed that the production process of asphalt mixtures from granite aggregates usually involves at least three crushing stages. When using those three stages to crush dolomite – one of the Lithuanian mineral resources – into aggregates the impact value (*SZ*) is $\leq 22\%$. One of the producers of dolomite aggregate in the Northern Lithuania the “Petrašiūnai 2” quarry has developed a technology for producing dolomite aggregate to be used in the automobile road surfacing. The description of the production process of multiple crushing dolomite aggregate is unique, since when using the 4th crushing stage, during which by crushing dolomite aggregate particles from 16 mm to 45 mm in size with the impact value (*SZ*) of $\leq 22\%$, the dolomite aggregate of multiple crushing is produced with the impact value (*SZ*) of $\leq 18\%$.

The experimental research plan included two stages of experimental research: in stage I the physical and mechanical properties of dolomite aggregate, produced by multiple crushing, were determined by experimental laboratory testing; in stage II the field measurements of skid resistance were carried out on Lithuanian roads of national significance where the automobile road surfacing was laid from dolomite aggregate produced by multiple crushing (Fig. S2.1, Fig. S2.2). The following codes were given to the aggregates: $D_{(P)}$ – dolomite aggregate produced from dolomite rock extracted in the “Petrašiūnai 2” deposit in Lithuania without using the multiple crushing aggregate production technology and the impact value (*SZ*) of which is less than or equal to 22 %; $D_{(I-III)}$ – dolomite aggregate produced from dolomite rock extracted in the “Petrašiūnai 2” deposit in Lithuania by using the multiple crushing aggregate production technology and the impact value (*SZ*) of which is less than or equal to 18%; $G_{(I)}$ – granite aggregate produced in the Republic of Belarus; $G_{(II)}$ – granite aggregate produced in the Kingdom of Norway; $G_{(III)}$ – granite aggregate produced in the Republic of Ukraine.

The scope of research and the research methods used were as follows:

- resistance to wear (*Micro-Deval coefficient*) (M_{DE}), *EN 1097-1:2011 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 1: Determination of the Resistance to Wear (Micro-Deval)*, number of tests: 24 pcs. – D_P , D_{III} , G_{III} ;
- resistance to fragmentataion (*Los Angeles coefficient*) (*LA*), *EN 1097-2:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 2: Methods*

- for the Determination of Resistance to Fragmentation, number of tests: 32 pcs. – $D_{(I)}$; 9¹⁾ pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 24 pcs. – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$;
- impact value (SZ), EN 1097-2:2010, number of tests: 42 pcs. – D_I ; 9¹⁾ pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 24 pcs. – D_P , D_{III} , G_{III} ;
 - particle density, EN 1097-6:2013 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption: 7 pcs. – $D_{(P)}$, $D_{(I-III)}$, $G_{(I-III)}$; 9¹⁾ pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$;
 - resistance to polishing (PSV), EN 1097-8:2009 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 8: Determination of the Polished Stone Value: 2 pcs. – D_I ; 9²⁾ pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 18 pcs. – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$;
 - resistance to abrasion from studded tyres (A_N), EN 1097- 9:2014 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 9: Determination of the Resistance to Wear by Abrasion from Studded Tyres - Nordic test: 24 pcs. – $D_{(P)}$, $D_{(III)}$, $G_{(III)}$;
 - resistance to freezing and thawing (F)³⁾, EN 1367-1:2007 Tests for Thermal and Weathering Properties of Aggregates - Part 1: Determination of Resistance to Freezing and Thawing: 3 pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$; 24³⁾ pcs. – $D_{(II)}$, $G_{(I)}$, $G_{(II)}$.

Tests (LA)¹⁾, (SZ)¹⁾, particle density¹⁾ – freezing and thawing of 10-30 cycles, (PSV)²⁾ 1 standard and 2 and 3 cycles; (F)³⁾ 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 and 150 freezing and thawing cycles.

Experimental research $D_{(I)}$ was conducted in 2015–2016; $D_{(P)}$; $D_{(II-III)}$; $G_{(I-III)}$ – in 2017.

The stage II of experimental research was implemented according to the sequence presented in Fig. S2.2. The field measurements were carried out on the road sections of the national significance of Lithuania. Different types of pavements were selected for the measurements: surface dressing, asphalt concrete AC 11 VS and stone mastic asphalt SMA 11 S. Experimental research was conducted together with the Road Research Institute of the Faculty of Environmental Engineering of Vilnius TECH. To study the results of experimental research the following codes were given to the aggregates: $D_{(IV)}$ – $D_{(I-III)}$ dolomite aggregate in automobile road surfacing; $G_{(IV)}$ – $G_{(I-III)}$ granite aggregate in the automobile road surfacing. The number of measurements (in pcs) was: surface dressing: $D_{(IV)}$ – 932, $G_{(IV)}$ – 730; asphalt concrete: $D_{(IV)}$ – 623, $G_{(IV)}$ – 1016; stone mastic asphalt: $D_{(IV)}$ – 2029, $G_{(IV)}$ – 5672. The experimental research was conducted in 2018 and 2020 according to the standard method CEN/TS 15901-14:2016. The service life of the selected pavements varied from 2 to 7 years.

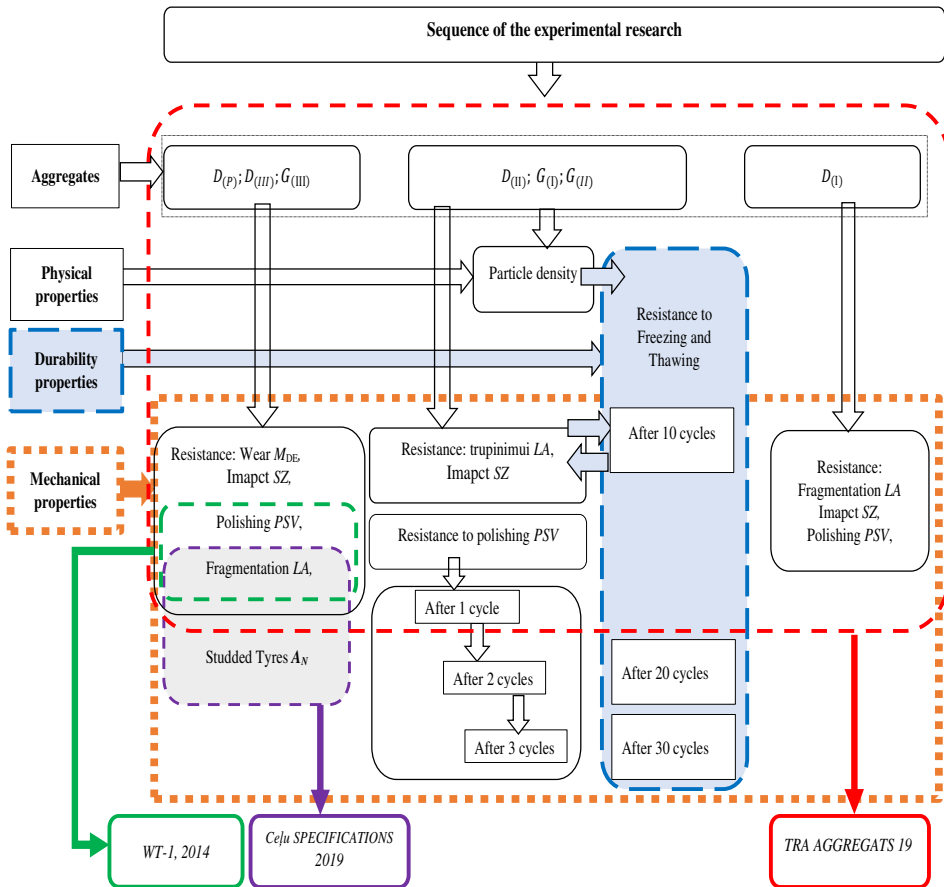


Fig. S2.1. Sequence of the stage I of experimental research

In stage I of the experimental research the following properties of aggregates $D_{(P)}$; $D_{(I-III)}$; $G_{(I-III)}$ were determined: mechanical – resistance to wear (Micro-Deval coefficient) (M_{DE}); resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient) (LA); impact value (SZ); polishing (PSV); resistance to abrasion from studded tyres (A_N); physical – dry particle density. Durability: (after 10–30 of freezing and thawing cycles) resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient) (LA), impact value (SZ), particle density; resistance to freezing and thawing (F) (after 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 and 150 cycles), resistance to polishing (PSV) after 1 standard and 2 and 3 polishing cycles.

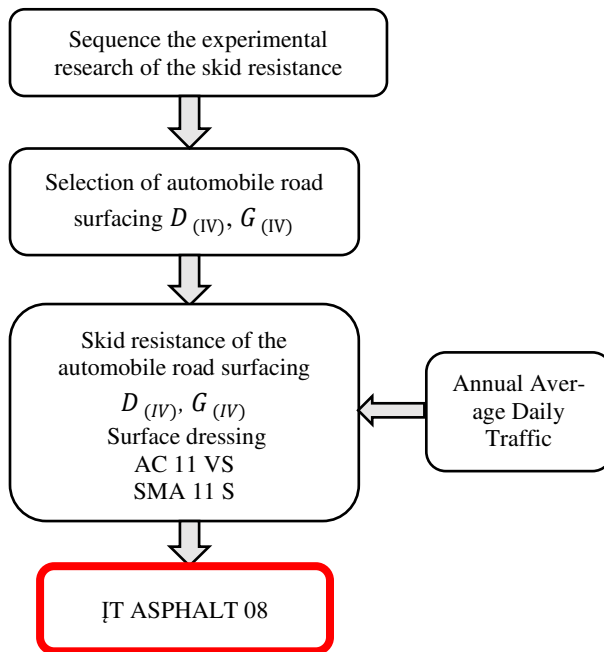


Fig. S2.2. Sequence of the stage II of experimental research

With the help of experimental laboratory tests of the stage I the following properties of multiple crushing dolomite aggregate were determined: density of dry particles – 2.801 Mg/m³ (2.801 Mg/m³, 2.800 Mg/m³, 2.801 Mg/m³ – after 10-30 freezing and thawing cycles); resistance to wear (Micro-Deval coefficient) (M_{DE}) – 11.2; resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient) (LA) – 15,2; 15,3; 15,0 (14;16;16 – after 10-30 freezing and thawing cycles); impact value (SZ) – 16.8%, 16.6%, 16.7%, (17%, 17%, 17% – after 10-30 freezing and thawing cycles); resistance to polishing (PSV) – 50; 51 (50;51;50, after 1 standard and 2 and 3 polishing cycles); resistance to abrasion from studded tyres (A_N) – 13.5; resistance to freezing and thawing (F) – 0.2% (0.4%, after the standard 10 freezing and thawing cycles; 0.6%, 1.0%, 1.1%, 1.3%, 1.4%, 1.7% non-standard 20, 30, 40, 50, 75, 100 and 150 freezing and thawing cycles).

In stage II of the experimental research the field measurements of the skid resistance of the automobile road surfacing on the sections of the roads of national significance of Lithuania were carried out.

The skid resistance of the automobile road surfacing was measured on the road sections where $D_{(IV)}$ and $G_{(IV)}$ aggregates were used. For the data analysis, the measurement results were re-calculated at a 95% probability. Results of the field measurements of the skid resistance of the automobile road surfacing are as follows: *surface dressing*: with $D_{(IV)}$ aggregate on section 1 of the regional road No. 3404 – 0.54±0.074, on section

2 – 0.55 ± 0.043 ; on the section of the national road No. 194 – 0.6643 ± 0.0633 ; on the section of the national road No. 154 – 0.638 ± 0.0133 . With $G_{(IV)}$ aggregate on the section of the regional road No. 5202 – 0.85 ± 0.018 , after repeated measurement in 2020 the coefficient was 0.59 ± 0.0263 . *Asphalt concrete AC 11 VS*: with $D_{(IV)}$ aggregate – on the section of the main road No. A4 – 0.72 ± 0.0455 ; on the section 1 of the national road No. 136 – 0.52 ± 0.014 , on the section 2 – 0.66 ± 0.026 . With $G_{(IV)}$ aggregate on the section of the national road No. 130 – 0.58 ± 0.0301 , after repeated measurement in 2020 the coefficient was 0.46 ± 0.0156 . *Stone and mastic asphalt SMA 11 S*: with $D_{(IV)}$ aggregate on the section of the main road No. A3 – 0.43 ± 0.023 , on the main road No. A15. the measurement 1 – 0.43 ± 0.021 , the measurement 2 – 0.47 ± 0.0245 ; on the national road No. 149, the measurement 1 – 0.38 ± 0.017 , the measurement 2 – 0.39 ± 0.044 . With $G_{(IV)}$ aggregate on the section of the main road No. A6 – 0.79 ± 0.03 , after repeated measurement in 2020 the coefficient was 0.59 ± 0.0233 .

It should be emphasized, that the highest value of skid resistance, determined by the experimental research, was on the asphalt concrete pavement with $D_{(IV)}$ aggregate, on the section of the main road No. A4 – 0.72 ± 0.0455 ; the lowest value of skid resistance was determined on the stone mastic asphalt pavement, on the section of the national road No. 149 after the repeated measurement – 0.38 ± 0.014 . The AADT analysis was performed and the change in the AADT of heavy vehicles was determined: surface dressing: the change in AADT varied from 1.0% to 12.6%, the change in heavy vehicles varied from 0.5% to 11.2%; asphalt concrete AC 11 VS: the change in AADT – 3%, the change in heavy vehicles varied from 1.5% to 2%; stone mastic asphalt SMA 11 S: the change in AADT varied from 13.0% to 36%, the change in heavy vehicles varied from 1.0% to 5.9%.

3. Evaluation of the suitability of dolomite aggregate in the automobile road surfacing

Evaluation the physical and mechanical properties of multiple crushing dolomite aggregate. Having made a comparison of the equivalence of physical and mechanical properties of multiple crushing dolomite aggregate with other type of aggregate – granite, the obtained experimental laboratory test results showed that: the value of dry particle density was 0.4% higher than that of granite; the values of resistance to wear (Micro-Deval coefficient) (M_{DE}); resistance to fragmentation (Los Angeles coefficient) (LA); impact value (SZ); resistance to polishing (PSV) were 6% – 8% lower than that of granite aggregate, the value of resistance to abrasion from studded tyres (A_N) was 26% lower than that of granite aggregate; resistance to freezing and thawing (F) – 0.2%, i.e., the same of both aggregates compared. When assessing the compliance of the above properties with the normative technical requirements for the asphalt mixtures to be used in the wearing courses of asphalt pavement exposed to heavy traffic, indicated in TRA UŽPILDAI 19, the following categories were assigned to multiple crushing dolomite aggregate equivalent to granite aggregate: $M_{DE}15$; LA_{20} ; SZ_{18} ; PSV_{50} ; F_1 .

Evaluation of the skid resistance of multiple crushing dolomite aggregate and the automobile road surfacing. Figs. S3.1–S3.3 gives the change in the skid resistance of the automobile road surfacing with $D_{(IV)}$ aggregate which was determined during the first 5

years of the service life of the following types of automobile road surfacing: surface dressing, asphalt concrete, stone mastic asphalt.

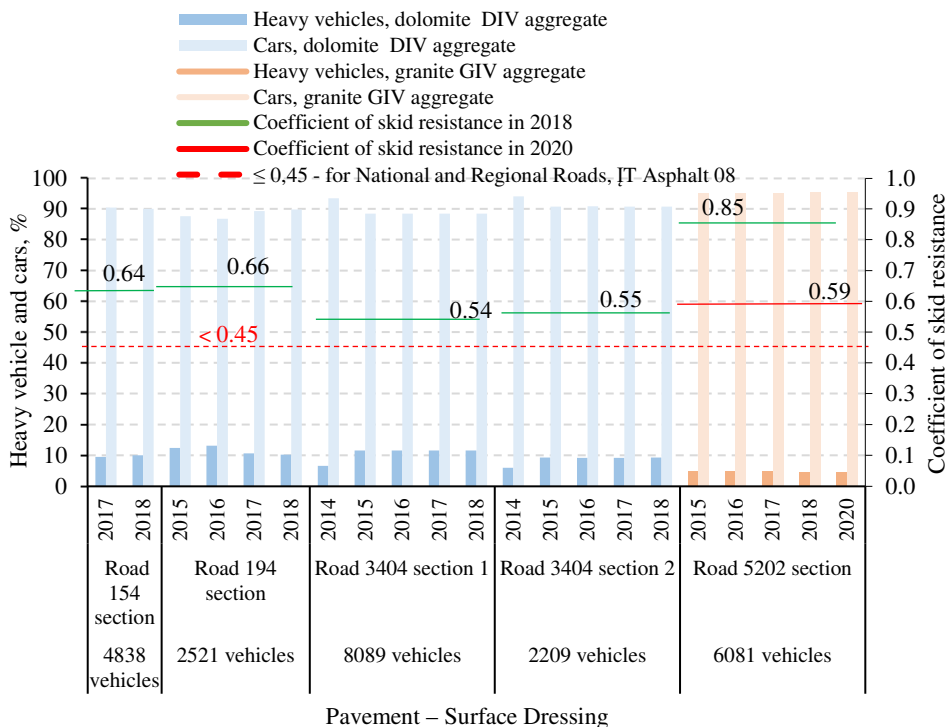


Fig. S3.1. Skid resistance of the surface dressing road sections

Figure S3.1. shows that on the first section of the regional road No. 3404, laid with $D_{(IV)}$ aggregate, the total AADT was 8089 veh., i.e., four times higher compared to the second section where the total AADT was 2209 veh. The share of heavy vehicles on the first section was higher than 10%, on the second section—up to 10%. The service life of both road sections is 5 years. The skid resistance of both sections was determined. On the first road section the skid resistance was higher than 20%, on the second road section – up to 20% than the initial limit value of <0.45 . The skid resistance value of the national road No. 154 – 42%, national road No. 194 – 46% and exceeded the initial value of <0.45 .

The total AADT on the section of the regional road No. 5202, laid with $G_{(IV)}$ aggregate in 2015, amounted to 6081 veh. The share of heavy vehicles on this road section was 5%, the service life of the section – 5 years. The skid resistance was determined to be 88%, in 2020 the skid resistance was measured once again and amounted to 31%, also exceeding the initial limit value of <0.45 .

To get the results of experimental research in respect of $G_{(IV)}$ aggregate during the first 5 service years of the road, the road sections of the same significance were studied – surface dressing sections of the regional roads where the determined skid

resistance values of $D_{(IV)}$ aggregate were 0.54 and 0.55, compared to the friction coefficient of $G_{(IV)}$ aggregate they were 6.7% – 8.4%, lower, but 20% – 22.2% higher than the initial limit value of ≤ 0.45 set for the newly laid pavement.

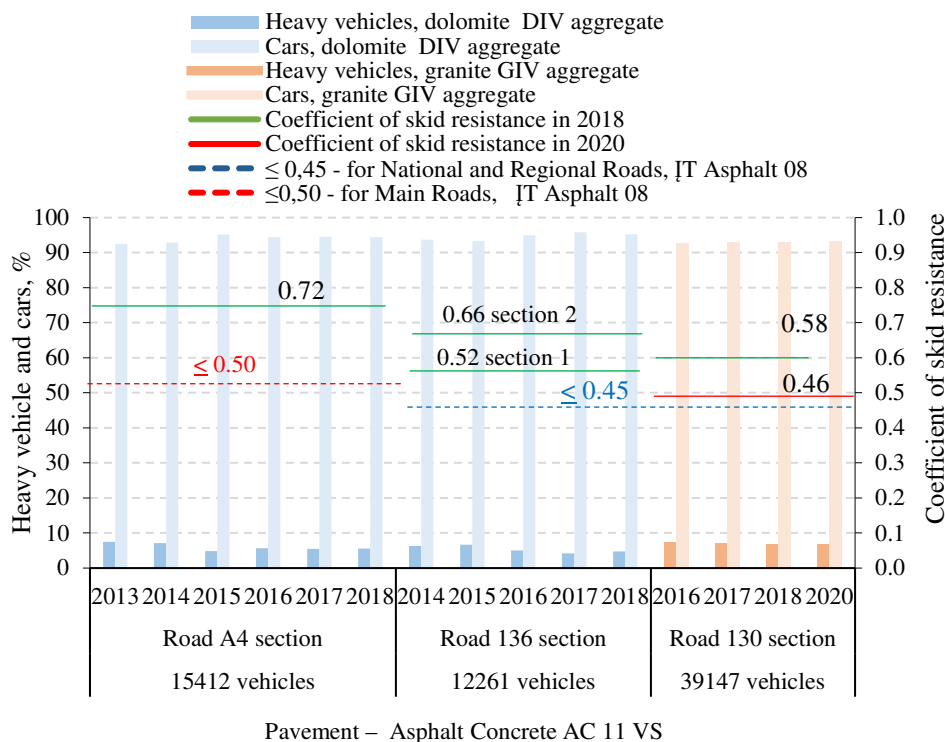


Fig. S3.2. Skid resistance of the asphalt concrete road sections

Fig. S3.2. gives the skid resistance values on the section of the main road No. A4 with $D_{(IV)}$ aggregate. The total AADT – 15 412 veh. The share of heavy vehicles was 5 %, the road service life – 6 years. The determined skid resistance was 44%, one and a half times exceeding the initial value of ≤ 0.5 . The total AADT on two sections of the national road No. 136 with $D_{(IV)}$ aggregate since the year 2014 when the sections were laid was 12 261 veh. The share of heavy vehicles was up to 5%, the road service life – 5 years. The determined skid resistance was 15% and 46% higher than the initial value of ≤ 0.45 .

The total AADT on the section of the national road No. 130 with $G_{(IV)}$ aggregate since the year 2016 when the section was laid was 39147 veh. The share of heavy vehicles was 8%, the road service life – 4 years. The skid resistance on this road section was measured twice (in 2018 and 2020) and exceeded the initial limit value of ≤ 0.45 by 29% (based on 2018 measurements) and by 2% (based on 2020 measurements). To get the results of experimental research in respect of $G_{(IV)}$ aggregate during the first 5 service years of the road, the road sections of the same significance were studied – asphalt concrete AC 11 VS

sections of the national road where the determined skid resistance values of $D_{(IV)}$ aggregate were 0.52 and 0.66, compared to the friction coefficient of $G_{(IV)}$ aggregate they were 11.5% and 30. % higher, and 15.5% – 46.6% higher than the initial limit value of ≤ 0.45 set for the newly laid pavement.

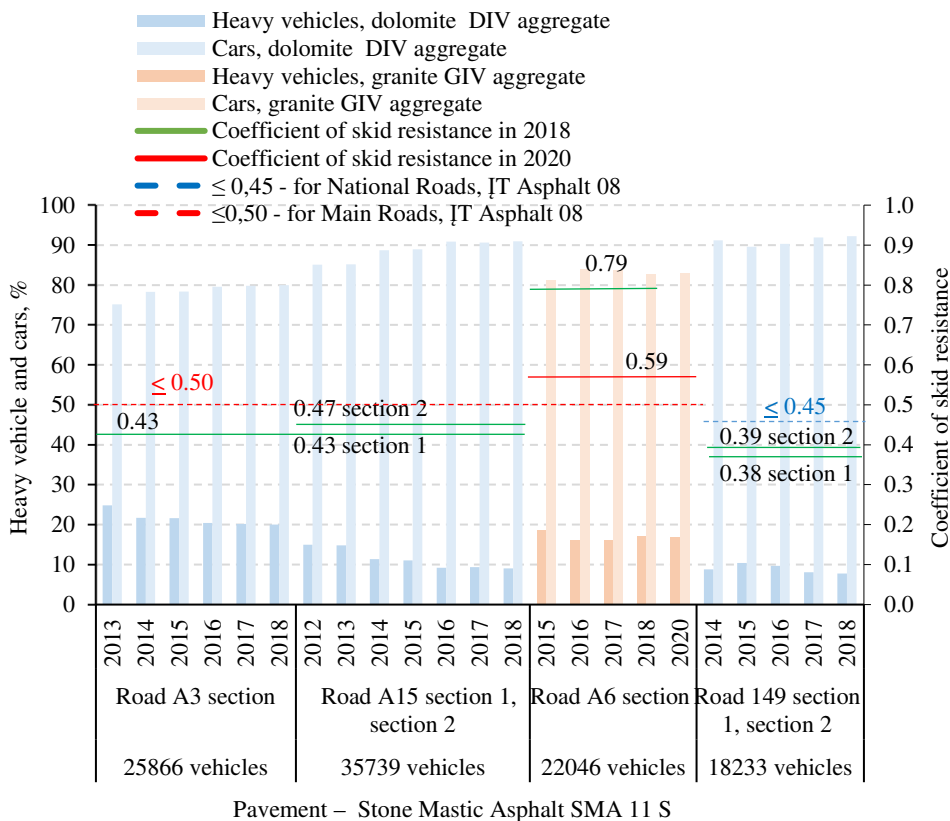


Fig. S3.3. Skid resistance of the stone mastic asphalt road sections

Fig. S3.3. gives the skid resistance values on the section of the main road No. A3 with $D_{(IV)}$ aggregate. Since 2013 when the section was laid, the total AADT – 25 866 veh. The share of heavy vehicles was 20%, the service life of the wearing course – 6 years. The determined skid resistance was 14% lower than the initial limit value of ≤ 0.5 .

On the first and the second section of the main road No. A15 with $D_{(IV)}$ aggregate the total AADT since the year 2012 when they were laid – 35739 veh. The share of heavy vehicles was 12%, the service life of asphalt pavement – 7 years. The skid resistance on the first road section was determined to be 14% lower than the initial limit value of ≤ 0.50 , on the second – 6% lower than the initial limit value of ≤ 0.50 . During that period 35 thousand of vehicles passed the road sections.

On the section of the main road No. A6 with $D_{(IV)}$ aggregate the total AADT since the year 2015 when it was laid – 2246 veh. The share of heavy vehicles is 17%, the service life of asphalt pavement – 5 years. The skid resistance of the road section was determined to be 58% and almost one and a half times exceeded the initial limit value of ≤ 0.50 , determined in 2018. After the repeated measurements in 2020, the value was exceeded by 18%.

On the section of the national road No. 149 with $D_{(IV)}$ aggregate the total AADT since the year 2014 when it was laid – 18 233 veh. The share of heavy vehicles is 10%, the service life of asphalt pavement – 5 years. The skid resistance of the road section was measured twice. The first measurement showed that the skid resistance value was 15 % lower, the second measurement showed that it was 13% lower than the initial limit value of ≤ 0.45 . During that period 18 thousand of vehicles passed the road section.

To determine the change in the skid resistance in respect of $G_{(IV)}$ aggregate during the first 5 service years of road pavements, the road sections of the same significance were studied – stone mastic asphalt SMA 11 S sections of the main roads where the determined skid resistance values of $D_{(IV)}$ aggregate were 0.43, 0.43 and 0.47, compared to the friction coefficient of $G_{(IV)}$ aggregate they were 20.3% and 27.0% lower, and 6% and 14.0% lower than the initial limit value of ≤ 0.45 set for the newly laid road.

It should be emphasized that the surface dressing road pavement was in operation for two years longer than the stone mastic asphalt pavement (with $D_{(IV)}$ aggregate) and asphalt concrete pavement (with $D_{(IV)}$ aggregate), also the total AADT and the number of heavy vehicles on the surface dressing road pavement were twice as much.

Economic effect of the multiple crushing dolomite aggregate used in automobile road surfacing. Asphalt mixtures are designed in accordance with the requirements of the currently valid normative technical documents of the Republic of Lithuania, discussed in Chapter 1.

The economic effect of multiple crushing dolomite aggregate to be used in the wearing courses of asphalt pavement was estimated for conventional asphalt mixtures: asphalt concrete and stone mastic asphalt, taking into account the lowest price of aggregates and micro-aggregates defined by material suppliers. The selected asphalt mixtures contained multiple crushing dolomite aggregate and activated mineral powder or micro-aggregates. Having calculated the price in euros of one tonne of multiple crushing dolomite aggregate and granite aggregate fractions as well as activated mineral powder used in asphalt mixtures, it was found that the price of asphalt mixture with granite aggregates per tonne is 25% higher than that of asphalt mixture with multiple crushing dolomite aggregates. When using micro-aggregate (dolomite) instead of activated mineral powder, the price of asphalt mixture with granite aggregates increases up to 27%. In the production of asphalt mixtures the polymer-modified bitumen binder PMB 45/80-55, the binding agent Adhezin and the bitumen emulsion, necessary for surface dressing, are used.

Having calculated the price of one tonne of materials used in asphalt mixtures, taking into account the design and laboratory distributions in asphalt mixture composition, the price of asphalt concrete and stone mastic asphalt was calculated, in Eur/t. The highest price of asphalt concrete – 49 Eur/t was obtained when the asphalt concrete mixture consisted of granite aggregate and activated mineral powder. The lowest price – 41 Eur/t was

obtained when the asphalt concrete mixture consisted of multiple crushing dolomite aggregate and micro-aggregate (dolomite).

Having calculated the price of stone mastic asphalt mixture, the highest price – 56 Eur/t was obtained when the asphalt mixture consisted of granite aggregate and activated mineral powder. The lowest price – 48 Eur/t was obtained when the asphalt mixture consisted of multiple crushing dolomite aggregate and micro-aggregate (dolomite). It should be emphasized that theoretical estimations of the economic effect, based on the production costs of the same grade of asphalt mixture, have determined that the part of coarse aggregate dolomite in the price of asphalt mixture asphalt concrete and stone mastic asphalt makes 20%, granite – 29%. The price of the multiple crushing dolomite aggregate is up to 10% lower than that of granite aggregate of equivalent properties. The price of multiple crushing dolomite aggregate is up to 10% lower than that of granite aggregate of equivalent properties.

General conclusions

1. Analysis of the scientific literature has shown that aggregates produced by aggregate production technologies must meet not only European and national normative technical requirements and skid resistance requirements, but should also be economically viable.
2. After determining the properties of multiple crushing technology dolomite aggregate by experimental laboratory tests: density of dry particles, wear resistance (micro-Deval coefficient), resistance to crushing (Los Angeles coefficient), impact resistance, resistance to polishing, resistance to abrasion due to studded tires, resistance to freezing and thawing, assessment of mechanical properties with dolomite aggregate produced without the use of multiple crushing technology, it was found to be up to 23% more resistant than said dolomite aggregate.
3. After evaluating the physical and mechanical properties of reusable dolomite aggregate with the values of other types of aggregate - granite, according to the obtained experimental laboratory test results, values up to 10% higher than the values of granite aggregate were determined. But they are equivalent in assessing the compliance of the above properties with the normative technical requirements of the road pavement mixture exposed to heavy vehicles TRA UŽPILDAI 19, reusable dolomite aggregate is equivalent to granite aggregate.
4. After performing field research on Lithuanian state roads, where the automobile road surface is equipped with dolomite aggregate, produced by applying multiple crushing, and evaluating the change of road surface skid resistance during road operation, it was found that the surface skid resistance values during the first 5 years year by no more than 15% of the initial value.
5. Theoretical calculations of economic effect, when asphalt mixtures: asphalt concrete, stone and mastic asphalt, made with large reusable dolomite aggregate, show that the potential economic effect of using dolomite aggregate in asphalt mixtures is up to 10% compared to granite aggregate.

Priedai³

A priedas. Eksperimentinių tyrimų metodika ir įranga

B priedas. Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių eksperimentinio tyrimo bendrieji, statistiniai rezultatai

C priedas. Vidutinio metinio paros eismo intensyvumo duomenys

D priedas. Kelio dangos paviršiaus atsparumo slydimui matavimų grafikai

E priedas. Kelio dangos paviršiaus atsparumas slydimui matavimų skaitinių charakteristikų histogramos

F priedas. Užpildų faktinių savybių ir norminių reikalavimų lyginamosios analizės grafiniai rezultatai

G priedas. Užpildų kainos

H priedas. Autorės sąžiningumo deklaracija

I priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

J priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Lina ŠNEIDERAITIENĖ

AUTOMOBILIŲ KELIO VIRŠUTINĖS
DANGOS DOLOMITO UŽPILDO
SAVYBIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

RESEARCH OF THE DOLOMITE AGGREGATE
PROPERTIES OF THE AUTOMOBILE
ROAD SURFACING

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2021 05 13. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2021-025-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius