

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aurimas ŠIUKŠČIUS

KELIO KONSTRUKCIJOS SUTVIRTINIMO GEOTINKLU VERTINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

VILNIUS TECH leidykla „Technika“, 2020

Disertacija rengta 2014–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Viktoras VOROBOVAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

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

Pirmininkas

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

dr. Viktors HARITONOVS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Artūras KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

prof. dr. Arnoldas NORKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Laura ŽALIMIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. lapkričio 27 d. 13 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@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. spalio 26 d.

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

VILNIUS TECH leidyklos „Technika“ 20202-037-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

© VILNIUS TECH leidykla „Technika“, 2020

© Aurimas Šiukščius, 2020

aurimas.siukscius@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aurimas ŠIUKŠČIUS

ASSESSMENT OF ROAD STRUCTURE STRENGTHENING WITH GEOGRID

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

VILNIUS TECH Press "Technika", 2020

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2020.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Viktoras VOROBOVAS (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 Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Dr Viktors HARITONOVs (Ryga Technical University, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Artūras KERŠYS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003),

Prof. Dr Arnoldas NORKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Laura ŽALIMIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

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 **1 p. m. on 27 November 2020**.

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

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

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 October 2020.

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

Reziumė

Tvaram ir ilgalaikiam automobilių kelių dangos konstrukcijų funkcionalumui užtikrinti, kai žemės sankasoje yra organinių gruntų sluoksnių, būtina naudoti papildomas medžiagas žemės sankasos sutvirtinimui. Grunto sutvirtinimui geosintetinės medžiagos pasauliniu mastu yra naudojamos jau daugiau nei 40 metų, o Lietuvoje 20 metų. Žemės sankasos sutvirtinimo virš silpnų gruntų problemoms spręsti, geotinklų pritaikymas Lietuvoje naudojamas pastaruosius 10 metų. Disertacijoje yra nagrinėjama virš silpnų gruntų esančios geotinklais sutvirtintos kelio dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos įtaka kelio konstrukcijos degradacijai.

Disertacijos tikslas – sudaryti geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą eksperimentiniais tyrimais nustatčius dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais poveikį automobilių kelio konstrukcijos degradacijai. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, naudotos literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir 6 priedai.

Įvadiniamе skyriuje suformuluojama problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, gimamieji teiginiai bei disertacijos struktūra. Pirmame skyriuje pateikiama mokslinės literatūros analizė apie grunto sutvirtinimo geotinklais principus, geotinklų savybių analizė, geotinklų savybių ir jų kitimo įtaka kelio konstrukcijos pastovumui, silpnos žemės sankasos sustiprinimo metodų analizė, geotinklų parinkimo bendrieji principai, geotinklų panaudojimą žemės darbams keliuose reglamentuojančių dokumentų analizė Lietuvoje bei kitose šalyse. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje pateikti automobilių kelių dangos konstrukcijų eksperimentiniai tyrimai. Aprašomas eksperimentinio tyrimo planas ir metodika, nustatomi tiriamieji ruožai ir dangos konstrukcijų tipai, pateikiama žemės sankasos geologinės sandaros analizė bei tiriamųjų kelių ruožų dangos apkrovų, nelygumo ir konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių rezultatai. Trečiajame skyriuje pateikta eksperimentinio tyrimo rezultatų statistinė analizė. Atliktas optimalaus geotinklu sutvirtintos žemės sankasos varianto parinkimas taikant daugiakriterinį SAW metodą, geotinklo naudojimo tikslingumo ir svarbiausių savybių vertinimas. Sudaroma geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, trys – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuotose *Clarivate Analytics* duomenų bazėje *Proceedings*. Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai tarptautinėse konferencijose.

Abstract

In order to ensure sustainable and long-term functioning of the road pavement structure over the subgrade with organic soil layers, it is necessary to use additional materials to improve earth subgrade strength. Geosynthetic materials are used worldwide for soil reinforcement for more than 40 years, when in Lithuania for 20 years. To solve road subgrade strengthening problems over soft soils, geogrids in Lithuania are used over the last decade. The dissertation examines the influence of geogrid reinforced pavement and (or) subgrade on the road structure degradation.

The aim of the dissertation is to develop the geogrid usage demand assessment and selection scheme by determining the effect of pavement structure and (or) earth subgrade reinforcement with geogrids on the degradation of a road structure through the experimental investigations. The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions and recommendations, references and a list of scientific publications by the author on the topic of the thesis, summary in English and six annexes.

The introduction reveals the investigated problem, relevance of the thesis, describes the object of thesis, formulates the aim and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty of the thesis, the practical value of the research findings, defended statements and the structure of the dissertation. Chapter 1 revises used scientific literature and provides an analysis of soil reinforcement principles and geogrid characteristics, analysis of geogrid properties and their variation influence on the permanence of the road structure, analysis of weak subgrade strengthening methods, geogrid selection principles, an analysis of the documents regulating the use of geogrids for earthworks in Lithuania and other countries. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks of the dissertation are reconsidered. Chapter 2 provides the experimental research of road pavement structures. It describes the experimental research plan and methodology, identifies the tested pavement structure types, geological structure, the results of road pavement loading, roughness and road structure layer elasticity modulus. Chapter 3 provides the statistical analysis of the results of the experimental study. Indicates the rational geogrid reinforced subgrade option using the multi-criteria SAW method, evaluates the purposefulness and the most important properties of geogrid. Provides the geogrid usage demand assessment and selection scheme.

On the topic of the thesis, 6 scientific articles were published: three – in scientific journals included in the *Clarivate Analytics Web of Science* data base, three – in the international conferences *Clarivate Analytics Proceedings* data base. 3 presentations on the subject have been given in conferences at international level.

Sąvokos

Apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis – apatinis pagrindo sluoksnis be rišiklių, kuriam įrengti naudojami reikalaujamos granulometrinės sudėties nesurištieji mišiniai arba gruntai, bei apsaugantis dangos konstrukciją nuo žalingo šalčio poveikio.

Dangos konstrukcija – kelio konstrukcijos dalis, kurią sudaro danga ir pagrindo sluoksnis(-iai).

Ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrova – vienos faktinės ašies apkrova, sunorminta vienos 10 t svorio ašies apkrovos pagrindu.

Kelio konstrukcija – statinio dalis, kurią sudaro dangos konstrukcija, kelkraščio konstrukcija, vandens nuleidimo sistemos arba jų dalis ir žemės sankasa.

Organiniai gruntai – durpės, dumblas ir sapropelis bei gruntai kuriuose organinių medžiagų priemaiša yra didesnė kaip 20 %.

Pylimas – žemės sankasos ruožas, kurio viršus yra aukščiau vietovės lygio.

Projektinė apkrova A – numatoma ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendra suma (ESAs) per numatytą projektinį naudojimo laikotarpį (naujų dangos konstrukcijų projektavimo atveju) arba naujai numatytą projektinį naudojimo laikotarpį (atnaujinamų dangos konstrukcijų atveju) didžiausio sunkiojo transporto eismo intensyvumo važiuojamosios dalies eismo juostoje.

Silpni gruntai – mažos laikomosios galios gruntai, iš kurių įrengus žemės sankasą galimi nusėdimai ir kitos deformacijos. Jiems priskiriama: įvairios kilmės dumblai, durpės, gruntai su didele organinės medžiagos priemaiša, buitinės ir pramoninės atliekos, kuriose yra daugiau kaip 6 % organinių medžiagų.

Skaldos sluoksnis – viršutinis pagrindo sluoksnis be rišiklių, kuriam įrengti naudojami reikalaujamos granulometrinės sudėties nesurištieji skaldytų medžiagų mišiniai.

Žemės sankasa – grunto statinys, atliekantis dangos konstrukcijos pagrindo paskirtį ir įrengiamas iš atvežto ir supilto grunto ir (arba) neišjudinto natūralaus grunto.

Žemės sankasos viršus – natūraliojo arba supilto grunto paviršius, skiriantis dangos konstrukciją nuo žemės sankasos.

Žymėjimai

Simboliai

A – ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičiaus suma;

c_v – variacijos koeficientas;

C_u – grunto vienodumo koeficientas;

c_u – grunto nedrenuotoji sankiba, kPa;

CBR – laikomosios gebos Kalifornijos rodiklis, %;

E – tamprumo modulis (Jungo modulis), MPa;

E_0 – paviršiaus tamprumo modulis apkrovos plokštės centre, MPa;

E_1 – asfalto sluoksnių tamprumo modulis, MPa;

E_2 – skaldos sluoksnio tamprumo modulis, MPa;

E_3 – apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulis, MPa;

E_r – liekamasis deformacijų modulis, MPa;

E_V – deformacijų modulis nustatytas pagal statinio zondavimo bandymus, MPa;

E_{V2} – deformacijos modulis, nustatytas pagal statinio bandymo antrinę apkrovą, MPa;

ε – geotinklo pailgėjimas, %;

ε_h – horizontalioji deformacija, %;

ε_v – vertikalioji deformacija, %;

φ – grunto vidinės trinties kampas, °;

$F_{GSY,k}$ – geotinklo stiprio tempiant charakteristinė vertė, kN/m;
 $F_{GSY,d}$ – geotinklo stiprio tempiant skaičiuotinė vertė, kN/m;
 h – grunto sluoksnio storis su armavimu geotinklu, kN;
 h_0 – grunto sluoksnio storis be armavimo geotinklu, kN;
 γ – grunto savitasis sunkis, kN/m³;
 $\gamma_{GSY,M}$ – dalinis grunto armavimo elemento laikomosios gebos saugos koeficientas;
 P – transporto priemonės ašinė apkrova, kN;
 p – grunto slėgis į žemės sankasą su armavimu geotinklu, kN;
 p_0 – grunto slėgis į žemės sankasą be armavimo geotinklu, kN;
 σ_h – horizontalūs įtempiai, Pa;
 σ_v – vertikalūs įtempiai, Pa;
 τ – tangentiniai įtempiai, Pa.

Santrumpos

AASHTO – Amerikos (JAV) kelių ir transporto asociacija (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*);
 AR – aramidai;
 AŠAS – apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis;
 CBR – Kaliforniškas pagrindo stipris (angl. *California Bearing Ratio*);
 DK – dangos konstrukcija;
 ESA – ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrova;
 FWD – krintančio svorio deflektometras (angl. *Falling Weight Deflectometer*);
 GRK3 – trečios stiprumo klasės geotekstilė (angl. *Geotextile robustness class 3*);
 HDPE – aukšto tankio polietilenas;
 IRI – kelių dangos nelygumo tarptautinis rodiklis (angl. *International Roughness Index*);
 LCR – struktūrinis sluoksnio koeficientas (angl. *Structural layer coefficient*);
 M – sprendimų priėmimo matrica;
 PA – poliamidas;
 PE – polietilenas;
 PET – poliesteris;
 PP – polipropilenas;
 PVA – polivinilalkoholis;
 PVC – polivinilchloridas;
 SAW – daugiakriteris paprastojo sudėtinio įvertinimo metodas (angl. *Simple Additive Weighing*);
 SN – struktūrinis skaičius (angl. *Structural number*);

TKA – Transporto kompetenciju agentūra;

UV – ultravioletiniai spinduliai;

ŽS – žemės sankasa.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika.....	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	5
1. KELIŲ ŽEMĖS SANKASOS SUTVIRTINIMUI NAUDOJAMŲ GEOTINKLŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	7
1.1. Automobilių kelių konstrukcijos grunto sutvirtinimo geotinklais principas	7
1.2. Geotinklų savybės ir ilgaamžiškumas	13
1.3. Geotinklų savybių ir jų kitimo įtaka kelio konstrukcijos pastovumui	15
1.4. Geotinklų parinkimo ir naudojimo žemės darbams keliuose analizė	27
1.4.1. Silpnos žemės sankasos sustiprinimo ir sutvirtinimo metodų analizė....	27
1.4.2. Geotinklų parinkimas silpnos žemės sankasos sutvirtinimui	30

1.4.3. Geotinklų panaudojimą žemės darbams keliuose reglamentuojančių dokumentų analizė	33
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	36
2. AUTOMOBILIŲ KELIŲ DANGŲ KONSTRUKCIJŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA IR REZULTATAI	39
2.1. Teorinis geotinklų taikymas kelio dangų konstrukcijos ant silpnos žemės sankasos funkcionalumui užtikrinti	40
2.2. Eksperimentinio tyrimo planas.....	41
2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika	43
2.3.1. Kelių dangų konstrukcijos tiriamųjų ruožų nustatymas.....	43
2.3.2. Tiriamųjų kelių dangų konstrukcijų ir geotinklų tipai.....	44
2.3.3. Tiriamųjų kelių dangų konstrukcijų parametrų nustatymas	49
2.4. Tiriamųjų kelių ruožų žemės sankasos geologinės sandaros analizė.....	53
2.4.1. Kelio A6 ruožas pirmajam dangų konstrukcijos tipui.....	53
2.4.2. Kelio 131 ruožas antrajam dangų konstrukcijos tipui	54
2.4.3. Kelio 131 ruožas trečiajam dangų konstrukcijos tipui	55
2.4.4. Kelio A6 ruožas ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui.....	58
2.5. Tiriamųjų kelių ruožų projektinių ir išmatuotų apkrovų rezultatai.....	60
2.6. Tiriamųjų kelių ruožų dangos nelygumo rezultatai	63
2.7. Tiriamųjų kelių ruožų dangų konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulių rezultatai	74
2.8. Antrojo skyriaus išvados	80
3. KELIO KONSTRUKCIJOS SUTVIRTINIMO GEOTINKLU VERTINIMAS IR PARINKIMO SCHEMOS SUDARYMAS.....	83
3.1. Tyrimo rezultatų statistinės duomenų charakteristikos ir analizė.....	83
3.1.1. Kelio dangos nelygumo statistinių rezultatų analizė.....	85
3.1.2. Kelio dangų konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulių statistinių rezultatų analizė	91
3.2. Optimalaus geotinklų sutvirtintos žemės sankasos varianto parinkimas taikant daugiakriterinį SAW metodą.....	101
3.3. Geotinklų naudojimo tikslingumas ir rekomenduojamos savybės	104
3.4. Geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema.....	106
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	108
BENDROSIOS IŠVADOS	111
REKOMENDACIJOS	113
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	115
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	121
SUMMARY IN ENGLISH.....	123

PRIEDAI ¹	139
A priedas. Geotinklams taikomi saugos koeficientai	141
B priedas. Tiriamųjų kelių ruožų dangų detalės	143
C priedas. Tiriamųjų kelių ruožų projektinės apkrovos nustatymas.....	156
D priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	162
E priedas. Bendraautorijų sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	163
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	171

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
Object of the thesis	2
Aim of the thesis	3
Tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statments	4
Approval of the research findings	5
The structure of the thesis	5
Acknowledgements	5
1. ANALYSIS OF RESEARCH ON THE USE OF GEOGRIDS FOR THE REINFORCEMENT OF THE ROAD EARTH SUBGRADE	7
1.1. Principals of geogrid reinforced soil for road subgrade	7
1.2. Geogrid properties and durability	13
1.3. Geogrid properties and their variation influence to the road structure consistency	15
1.4. Analysis of geogrid selection and aplication in road earthworks	27

1.4.1. Analysis of weak subgrade strengthening and reinforcement methods.....	27
1.4.2. Geogrid selection for soil reinforcement over weak subgrade.....	30
1.4.3. Analysis of technical normative documents regulating geogrid application in road earthworks.....	33
1.5. First chapter conclusions, formulation of the thesis tasks	36
2. METHODOLOGY AND RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF ROAD PAVEMENT STRUCTURES.....	39
2.1. Theoretical geogrid application on weak subgrade assuring functionality of the road structure	40
2.2. Plan of experimental research	41
2.3. Methodology of experimental research	43
2.3.1. Determination of tested road pavement structures.....	43
2.3.2. Types of tested road pavement structures and geogrids.....	44
2.3.3. Determination of road pavement structure parameters.	49
2.4. Analysis of geological structure for tested road section subgrades	53
2.4.1. Road A6 section for the first type of road structure.....	53
2.4.2. Road 131 section for the second type of road structure	54
2.4.3. Road 131 section for the third type of road structure.....	55
2.4.4. Road A6 section for the fourth type of road structure.....	58
2.5. Design and measured live load results for tested road pavement sections	60
2.6. Results of international roughness index for tested road pavement sections.....	63
2.7. Results of elasticity modulus for tested road structure layers	74
2.8. Second chapter conclusions.....	80
3. GEOGRID REINFORCED ROAD STRUCTURE ASSESSMENT AND SELECTION SCHEME FORMATION	83
3.1. Statistical characteristics and analysis of the research data	83
3.1.1. Statistical result analysis of road pavement roughness.	85
3.1.2. Statistical result analysis of road structure layer elasticity modulus.....	91
3.2. Determination of the most rational geogrid strengthened subgrade type using Multi-Criteria SAW method.....	101
3.3. Expedience of using geogrid and recommended geogrid properties	104
3.4. Assessment of geogrid usage demand and selection scheme	106
3.5. Third chapter conclusions.....	108
GENERAL CONCLUSIONS	111
RECOMMENDATIONS	113
REFERENCES	115
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF DISSERTATION	121

SUMMARY IN ENGLISH.....	123
ANNEXES ²	139
Annex A. Reduction coefficients applied for geogrids	141
Annex B. Details of the tested road structures	143
Annex C. Live load determination for tested road pavement sections	156
Annex D. Declaration of academic integrity	162
Annex E. The co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation defense	163
Annex F. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	171

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Automobilių kelių ir gatvių naujos statybos ir rekonstravimo metu dažnai tenka spręsti silpnos žemės sankasos problemas. Kelių tiesybos techniniai norminiai dokumentai nurodo, kad organinių gruntų sluoksnių turinčią žemės sankasą reikia sustiprinti atliekant grunto pakeitimą, konsolidavimą arba žemės sankasos sustiprinimą poliais ir geotinklais armuoto grunto platforma, tačiau konkrečiai neapibrėžia tokio tipo problemos sprendimo pagal geologinę sandarą.

Dažnai pasitaikanti geologinė sandara, kai žemės sankasoje yra sutinkami iki 3,0 m storio, silpni organinių gruntų sluoksniai. Kai organikos ar jų priemaišų dūlėjimas nebevyksta, o didieji žemės sankasos sėdimai jau yra įvykę dėl buvusių transporto apkrovų, kyla abejonės, kokią žemės sankasos sutvirtinimo būdą reikia taikyti. Ypač atvejais, kai virš organinio grunto yra pakankamos laikomosios gebos piltinio ar natūralaus grunto sluoksnis ir žemės sankasos nuosėdžio mažinimas papildomomis techninėmis priemonėmis nereikalingas. Tačiau išlieka rizika, kad žemės sankasoje esantys silpni organinių gruntų sluoksniai gali deformuotis pasikeitus žemės sankasos elgsenai dėl gruntinio vandens lygio svyravimų organinių gruntų sluoksniuose, transporto apkrovų dinaminio poveikio pokyčio bei smulkiųjų gruntų sluoksniuose susidarius valkšnumo deformacijoms. Dėl šių ilgalaikių defor-

macijų kelio dangos paviršiuje gali atsirasti duobės, lokalios įdubos, skersiniai plyšiai. Dangos nelygumas yra viena iš pagrindinių kelio dangos savybių bei eksploataavimo (važiavimo) kokybę nusakančių parametrų. Todėl neužtikrintas žemės sankasos, o vėliau ir kelio dangų konstrukcijos pagrindo, laikomosios gebos tolygumas gali turėti įtakos dangos nelygumui visame kelio ruože. Šiai problemai išspręsti vis dažniau yra naudojami geotinklai, nes papildomas kelio konstrukcijos sutvirtinimas užtikrina tolygų pagrindo apkrovimą ir vienodesnę deformavimą.

Siekiant įvertinti geotinklų panaudojimo tinkamumą dangos konstrukcijų ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimui, būtina sudaryti geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą, nurodant geotinklų pritaikymą pagal geologinę sandarą.

Darbo aktualumas

Pastaruosius 10 metų, virš organinių gruntų įrengiamos kelio dangos lygumui užtikrinti vis dažniau taikomas gruntų sutvirtinimas (armavimas) geotinklais. Tačiau tokiai panaudojimo sričiai taikomų geotinklų parinkimas, įrengimas ir eksploataavimas nėra aiškiai reglamentuotas normatyviniuose techniniuose dokumentuose. Todėl inžinerinėje praktikoje žemės sankasos sutvirtinimas virš konsoliduotų organinių gruntų dažnai yra atliekamas remiantis bendrinėmis teorinėmis žiniomis.

Dėl skirtingas fizikines ir mechanines savybes turinčių žemės sankasos gruntų, kelio konstrukcijos laikomoji geba gali skirtis priklausomai nuo gruntinio ir podirvio vandens lygio kitimo dėl klimato sezoniskumo bei šalio gylio. Kelio eksploatacijos metu tai turi įtakos kelio dangos nelygumui, kartais net provėžų susidarymui. Esant nepakankamai ir (arba) netolygiai žemės sankasos laikomajai gebai bei organinių gruntų elgsenos kitimui, kuris vyksta dėl gruntų struktūrinių pokyčių, lemiančių mechaninių savybių degradaciją, gali susiformuoti nelygus kelio dangos paviršius. Kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio silpni, tame tarpe ir organinio grunto sluoksniai, kelio konstrukcijos funkcionalumui užtikrinti yra naudojami geotinklai. Jų parinkimo pagrindimas ir geologinės sandaros apibrėžimas iki šiol nėra nurodytas visuotinai taikytinose parinkimo metodikose. Todėl būtina nurodyti geotinklų panaudojimo ribas pagal geologinę sandarą.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – geotinklų mechaninių ir fizikinių savybių įtaka automobilių kelio dangos nelygumui ir dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modu-

liams. Tyrimui pasirinktos keturios įrengtos ir daugiau kaip 7-nerius metus eksploatuojamos automobilių kelio konstrukcijos, sutvirtintos arba sustiprintos skirtingais metodais. Dangų konstrukcijos buvo įrengtos ant pagrindų su silpnais gruntais, tame tarpe organinių gruntų sluoksniais, esančiais įvairiuose pagrindo gyliuose.

Darbo tikslas

Sudaryti geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą eksperimentiniais tyrimais nustčius dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais poveikį automobilių kelio konstrukcijos degradacijai.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti automobilių kelių dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos gruntų sutvirtinimui taikomų principų ir geotinklų parinkimo metodų analizę ir nustatyti geotinklams keliamus reikalavimus kai jie naudojami silpnos žemės sankasos sutvirtinimui bei kelio konstrukcijos funkcionalumui užtikrinti.
2. Nustatyti tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos paviršiaus nelygumą bei dangos konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulį atsižvelgiant į išmatuotą ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendrą sumą (ESA) per kelio naudojimo laikotarpį.
3. Nustatyti geotinklų įtaką automobilių kelių dangos nelygumui ir dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliams, esant skirtingiems dangos konstrukcijų ir žemės sankasos tipams.
4. Nustatyti geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai, tinkamumą naudoti kelio dangos degradacijos spartos atžvilgiu, palyginant su sprendimais apibrėžtais teisės aktuose.
5. Pateikti geotinklų poreikio nustatymo ir parinkimo schemą, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai.

Tyrimų metodika

Disertacijos darbo tikslui pasiekti buvo naudoti šie tyrimų metodai: archyvinės statinio statybos dokumentacijos analizė, eksperimentinių tyrimų planavimas, eksperimentiniai automobilių kelių dangos nelygumo ir dangos paviršiaus įlinkių

matavimai veikiant dinaminei apkrovai. Taip pat buvo naudojami matematinės statistikos ir daugiakriteriniai metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Atlikta palyginamoji automobilių kelių dangos nelygumo ir dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių analizė siekiant nustatyti skirtingų žemės sankasos sutvirtinimo ir sustiprinimo metodų įtaką kelio degradacijai, tačiau kai žemės sankasoje sutinkami organinių gruntų sluoksniai yra iki 3,0 m storio, naudojant geotinklus dangų konstrukcijų kokybei užtikrinti taip eliminuojant lokalių kelio dangos deformacijų atsiradimą.
2. Sudaryta geotinklų poreikio nustatymo ir parinkimo schema, siekiant užtikrinti automobilių kelio konstrukcijos funkcionalumą, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta geotinklų poreikio nustatymo ir parinkimo schema, siekiant užtikrinti automobilių kelio konstrukcijos funkcionalumą, kuris gali būti taikomas inžinerinėje praktikoje projektuojant naujų ir (arba) rekonstruojant esamų kelių konstrukcijas, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai. Tyrimų rezultatai gali būti naudojami esamų normatyvinių techninių dokumentų papildymui.

Ginamieji teiginiai

1. Automobilių kelio dangos degradavimo spartos atžvilgiu, geotinklais sutvirtinta dangų konstrukcija ir (arba) žemės sankasa, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai yra lygiavertė normatyviniais techniniais dokumentais apibrėžtai žemės sankasai. Tai leidžia užtikrinti reikiamą kelio konstrukcijos funkcionalumą, išlaikant normatyviniuose techniniuose dokumentuose nurodytą kelio dangos lygumą, kurio ribinė vertė priklauso nuo kelio kategorijos.
2. Geotinklų poreikio nustatymo ir parinkimo schemos panaudojimas, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai, leidžia išvengti žemės sankasos sustiprinimo atliekant grunto pakeitimą,

konsolidavimą arba žemės sankasos sustiprinimo poliais ir geotinklais armuoto grunto platforma.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę, trys – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose.

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

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2015 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2017 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Resilient and Safe Road Infrastructure*“ 2018 m. Kielcuose, Lenkijoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūra ir šaltiniai, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santrauka anglų kalba. Pabaigoje pateikiami 6 priedai.

Darbo apimtis yra 139 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 23 numeruotos formulės, 67 paveikslai ir 14 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 85 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacijos autorius dėkoja moksliniam vadovui doc. dr. Viktorui Vorobjovui už vertingas mokslines konsultacijas, pastabas ir patarimus, visokeriopą pagalbą ir kantrybę. Taip pat dėkoja prof. dr. Audriui Vaitkui už mokslines išvalgas, idėjas ir pastabas disertacijos rengimo metu. Autorius reiškia padėką disertacijos ekspertams už jų vertingas pastabas ir komentarus bei supratingumą. Už suteiktas tobulėjimo galimybes ir skirtą finansinę paramą doktorantūros studijoms bei eksperimentiniams tyrimams autorius dėkingas įmonei UAB „ViaCon Baltic“. Ne mažiau dėkingas šeimai už visokeriopą palaikymą ir supratimą.

Kelių žemės sankasos sutvirtinimui naudojamų geotinklų tyrimų analizė

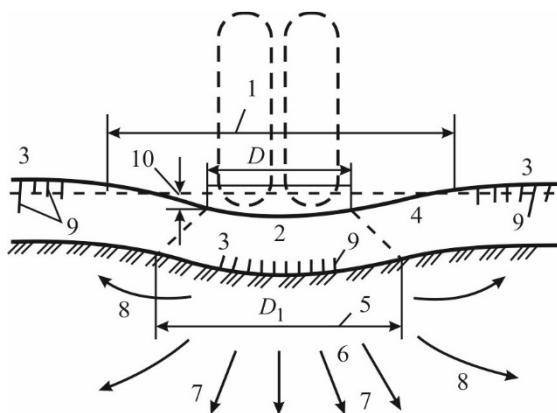
Šiame skyriuje pateikiama grunto sutvirtinimo geotinklais samprata, daugiausiai dėmesio skiriant geotinklų įtakai kelio konstrukcijos, esančios virš silpnų gruntų, laikomosios gebos ir lygumo užtikrinimui. Analizuojama naujausia praktika taikoma skirtingų tipų geotinklų savybių ir jų kitimo įtakai kelio konstrukcijos patovumui nustatyti. Išskiriami gruntų sutvirtinimo ir sustiprinimo privalumai ir trūkumai. Apibendrinami normatyvinių techninių dokumentų reikalavimai geotinklų parinkimui ir jų apribojimai.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Šiukščius *et al.* 2014; Šiukščius *et al.* 2015; Šiukščius *et al.* 2017 ir Ramūnas *et al.* 2017).

1.1. Automobilių kelių konstrukcijos grunto sutvirtinimo geotinklais principas

Automobilių kelių konstrukcija susideda iš dangos konstrukcijos ir žemės sankasos. Dangos konstrukciją sudaro danga ir pagrindo sluoksniai, kai žemės sankasa yra pagrindas dangos konstrukcijai įrengti. Kelio dangos konstrukcija yra skirta atlaikyti transporto priemonių apkrovas ir taip pat jas perduoti į žemės sankasą.

Dėl veikiančių ciklišių transporto priemonių apkrovų kelio dangą deformuojasi, o ilgainiui pradeda formuotis liekamosios deformacijos – nelygumai ir provėžos (1.1 pav.). Norint užtikrinti kelio dangos konstrukcijos ilgalaikį funkcionalumą ant silpnos žemės sankasos, labai svarbu sumažinti silpnam žemės sankasos gruntui tenkančius įtempius ir jo deformacijas. Siekiant sumažinti įtempius ir deformacijas žemės sankasos grunte reikia apkrovos slėgį paskirstyti į kuo didesnį plotą. Apkrova grunte sklinda kampu α lygiu grunto vidinės trinties kampui φ° . Dėl šios priežasties norint apkrovos įtempį išskirstyti į kuo didesnę žemės sankasos plotą, reikia didinti dangų konstrukcijos sluoksnių storį arba šių sluoksnių įrengimui naudoti jų standumą padidinančias medžiagas.



1.1 pav. Nestandžios dangos įlinkis ir deformacijos veikiant automobilio rato apkrovai:

- 1 – įlinkio zona; 2 – dangos suspaudimo zona; 3 – dangos tempimo zona;
- 4 – dangos kirpimo linija; 5 – sankasos grunto slėgio zona; 6 – grunto tankėjimas;
- 7 – grunto tankėjimo kryptis; 8 – grunto išspaudimas; 9 – dangos plyšiai;
- 10 – dangos deformacija Δ (H. Sivilevičius 2012)

Fig. 1.1. Flexible pavement deflection and deformations under wheel load:

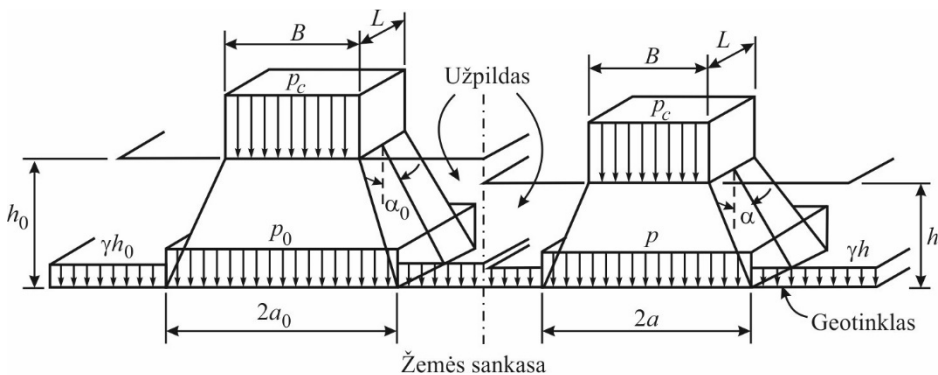
- 1 – deflection area; 2 – pavement compression area; 3 – pavement tension area;
- 4 – shear line in the pavement; 5 – pressure area in the subgrade; 6 – soil compaction;
- 7 – compaction direction in the soil; 8 – soil extrusion; 9 – cracks in the pavement;
- 10 – pavement deformation Δ (H. Sivilevičius 2012)

Dangų konstrukcijoje atsiranda deformacijos, kai ji yra įrengiama ant žemės sankasos kurioje vyrauja silpni sankabūs (dukliai ir moliai) ir organiniai gruntai (durpės, sapropelis), dėl grunte atsirandančių šlyties įtempių, kurių silpnas gruntas pilnai perimti negali. Dėl kelio dangų veikiančių transporto priemonių apkrovų, grunto sluoksnyje susidaro horizontalieji poslinkiai. Horizontalūs tempimo įtempimai susidaro gruntuose, žemiau apkrovos lygio, kai grunto dalelės slenka žemyn

ir į šonus veikiant apkrovai. Horizontalūs grunto poslinkiai leidžia susidaryti vertikaliesiems įtempimams, o tai leidžia formuotis pastoviai provėžai rato judėjimo linijoje.

Šlyties įtempių grunte perėmimui yra plačiai naudojamas grunto armavimas, kurio vienas seniausių pavyzdžių yra Ziggurat šventykloje Aquar Quf, Irake (1500 m. pr. kr.). Grunto armavimo technologija yra žinoma daugiau nei 3500 metų (Ziegler 2016). Šiandien grunto armavimui yra naudojamos geosintetinės medžiagos, dažniausiai naudojant geotinklus. Geotinklai yra naudojami kaip grunto armavimo priemonė. Geotinklo veikimas grunte apibrėžiamas kaip įtempto būvio geosintetikos gaminių panaudojimas, siekiant sutvirtinti gruntą.

Gera su kibe su gruntu geotinklai perima šlyties įtempius ir tuo pačiu padidina užpildo grunto vidinės trinties kampą (Cheng Chen *et al.* 2012), tokiu būdu leidžiant apkrovų slėgiui pasiskirstyti į silpnus žemės sankasos gruntu didesniu plotu arba sumažinus užpylimo aukštį išlaikant tokį patį įtempį kaip konstrukcijai be geotinklo (1.2 pav.).



1.2 pav. Apkrovų pasiskirstymas grunto sluoksnyje. Kairėje pusėje be geotinklo, dešinėje su geotinklu: p_c – padangos slėgis; B – apkrovos veikimo plotis; L – apkrovos veikimo ilgis; h, h_0 – užpildo grunto sluoksnio storis; p, p_0 – slėgis į žemės sankasą per grunto sluoksnį; α, α_0 – apkrovos sklidimo kampas; γ – grunto savitasis svoris; $2a, 2a_0$ – įtempio į žemės sankasą veikimo plotis (R. M. Koerner 2012)

Fig. 1.2. Load distribution by aggregate layer. In the left side without geogrid, in the right with geogrid: p_c – tyre inflation pressure; B – loading width; L – loading length; h, h_0 – aggregate thickness; p, p_0 – stress on the subgrade soil; α, α_0 – angle of load distribution; γ – unit weight of the aggregate; $2a, 2a_0$ – stress acting width on the subgrade soil (R. M. Koerner 2012)

R. M. Koerner'is (2012) pateikia analitinį metodą grunto sluoksnio storio parinkimui, pagal naudojamo geotinklo standumą (1.2 pav.). Nuo rato apkrovos tenkantis įtempis p_c į plotą $B \times L$, kuris pasiskirsto per grunto sluoksnį, kurio storis h_0 be geotinklo ir grunto sluoksnį, kurio storis h su geotinklu. Pagal pateiktą geometriją įtempis į žemės sankasą per grunto sluoksnį be geotinklo yra p_0 ir su geotinklu yra p :

$$p_0 = \frac{P}{2(B + 2h_0 \tan \alpha_0)(L + 2h_0 \tan \alpha_0)} + \gamma h_0; \quad (1.1)$$

$$p = \frac{P}{2(B + 2h \tan \alpha)(L + 2h \tan \alpha)} + \gamma h, \quad (1.2)$$

čia P – ašinė transporto apkrova.

Pagal seklaus pamato teoriją yra priimamos nedrenuojančios sąlygos, kai gruntas yra smulkiagrūdis ir drėgnas (dulkis, molis). Dėl šios priežasties silpno grunto šlyties įtempiai yra apibrėžiami kaip sankiba ($\tau = c$). Šis skaičiavimo metodas vertina, kad didžiausias įtempis kuris gali būti atlaikomas konstrukcijos be geotinklo atitinka grunto tampriąją būseną:

$$p_0 = \pi c + \gamma h_0. \quad (1.3)$$

Didžiausias įtempis kuris gali būti atlaikomas konstrukcijos su geotinklu gali būti padidinamas iki didžiausios grunto laikomosios gebos:

$$p^* = (\pi + 2)c + \gamma h. \quad (1.4)$$

Remiantis formulėmis 1.1–1.4 sudaroma priklausomybė kurioje nežinomasis yra reikalingas grunto sluoksnio storis, nenaudojant geotinklo h_0 :

$$c = \frac{P}{2\pi \left(\sqrt{\frac{P}{p_c}} + 2h_0 \tan \alpha_0 \right) \left(\sqrt{\frac{P}{2p_c}} + 2h_0 \tan \alpha_0 \right)}, \quad (1.5)$$

čia c – grunto sankiba; P – ašinė apkrova; p_c – padangos slėgis; h_0 – grunto sluoksnio storis; α_0 – apkrovos sklidimo kampas.

Skaičiuojant reikalingą grunto sluoksnio storį naudojant geotinklą, 1.4 formulės narys p^* yra pakeičiamas nariu $(p - p_g)$, kur p_g yra geotinklo tempimo funkcija. Todėl geotinklo pailgėjimas yra labai svarbus. Numatant tikėtiną provėžos gylį geotinklu sutvirtintai sistemai taikoma formulė:

$$p_g = \frac{E\varepsilon}{\sqrt[3]{1 + \left(\frac{a}{2S}\right)^2}}, \quad (1.6)$$

čia E – geotinklo tamprumo modulis; ε – geotinklo pailgėjimas; a – pusė įtempio į žemės sankasą veikimo pločio (1.2 pav.); S – nuosėdis po ratu (provėžos gylis).

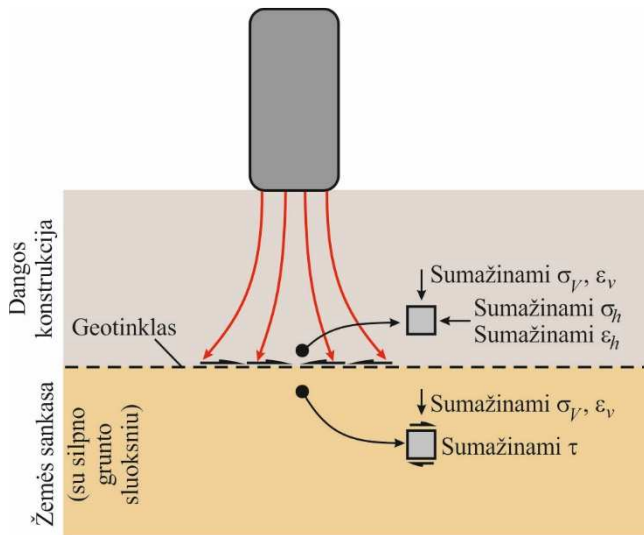
Apjungiant formules 1.4, 1.5 ir 1.6 ir naudojant $p^* = p - p_g$, gauname formulę kurioje nežinomasis yra reikiamo grunto sluoksnio storis su geotinklu h :

$$(\pi + 2)c = \frac{P}{2(B + 2h \tan \alpha)(L + 2h \tan \alpha)} - \frac{E\varepsilon}{\sqrt[3]{1 + \left(\frac{a}{2s}\right)^2}}. \quad (1.7)$$

Su šiais dviem formulių rinkiniais (1.5 ir 1.7), atliekamas skaičiavimas siekiant nustatyti grunto sluoksnio storį nesutvirtintai h_0 ir sutvirtintai konstrukcijai h . Geotinklų įtaka grunto sutvirtinimui realizuojama per geotinklo standumą t. y. jo stiprio tempiant ir pailgėjimo santykį. Šis santykis turi įtaką naudojamo geotinklo parinkimui jį siejant su nustatomu užpilamo grunto sluoksniu. Standūs geotinklai pasižymi geriausiu stiprio tempiant ir pailgėjimo santykiu todėl žemės sankasos sutvirtinimui buvo panaudoti įvairaus stiprio standaus tipo geotinklai, kai žemės sankasoje yra sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai.

Pagrindinis geotinklų panaudojimo tikslas yra žemės sankasos laikomosios gebos padidinimas (Duncan-Williams *et al.* 2008). Grunto armavimo efektas susideda iš geotinklo ir grunto dalelių susikabinimo sukuriant pakankamą horizontalių jėgų suvaržymą grunte (J. H. Kim *et al.* 2019). Standesnis kelio konstrukcijos pagrindas sumažina deformacijas, nes veikiant dinaminėms transporto apkrovoms yra suvaržomas dalelių judėjimas užpildo grunte. Mažesni horizontalūs įtempimai konstrukcijos gruntuose leidžia užtikrinti mažesnius vertikalius poslinkius kelio dangos paviršiuje. Šis horizontalių poslinkių suvaržymas, taip pat, yra vadinamas stabilizavimu ir tai gali būti sulyginta su adhezija ir (arba) tariamuju sankabumu, kuris dažnai pasiekiamas gruntu sumaišant su kalkėmis ar cementu. Papildomas stabilizavimo efektas pasireiškia, kai geotinklas turi standžią ir reikiamo dydžio akutę, kuri leidžia užpildo gruntui susikabinti su geotinklu (C. Psiorz *et al.* 2014). Grunto ir geotinklo sąveikos dėka, konstrukcijoje padidinamas atsparumas horizontalių jėgų poveikiui ir sumažinami horizontalūs poslinkiai; pagerinamas vertikalinių įtempių pasiskirstymas į silpną gruntą, dėl padidinto konstrukcijos standumo; sumažinami šlyties įtempiai ant silpno grunto paviršiaus; sumažinamos vertikalios deformacijos ir įtempiai silpno grunto sluoksnyje (Psiorz *et al.* 2014). Todėl grunto ir geotinklo sąveika leidžia sumažinti konstrukcijoje atsirandančias deformacijas, o atsiradusios deformaci-

jos yra tolygesnės (1.3 pav.). Geotinklu sutvirtintas grunto sluoksnis leidžia atlaikyti kur kas didesnę apkrovų ciklų skaičių lyginant su nesustiprinta konstrukcija (Christopher *et al.* 2008) ir turi įtakos didesniai atsparumui plastinio pobūdžio deformacijų susidarymui (Gökova *et al.* 2018).



1.3 pav. Geotinklo įtaka apkrovų pasiskirstymui grunte (Heerten *et al.* 2010)

Fig. 1.3. Geogrid influence on the load distribution in the soil (Heerten *et al.* 2010)

Transporto priemonių eismo apkrovų veikiamos kelio dangų konstrukcijos nesurištojo mišinio užpildo dalelės yra apkraunamos ir jos perduoda įtempius į žemės sankasą arba į geotinklą paklotą ant jos. Kai žemės sankasa neturi pakankamos laikomosios gebos ir nenaudojamas geotinklas, dangos konstrukcijoje atsiranda didelės deformacijos, todėl geotinklo panaudojimas leidžia jas smarkiai sumažinti (Chandra *et al.* 2006). Grunte veikiančių jėgų sukeltiems įtempiams perimti turi būti aktyvuotas geotinklo stipris tempiant (L. Vollmert *et al.* 2014) ir tai visada lemia poslinkių suvaržymą (Safadoust *et al.* 2013). Geotinklu sutvirtintame grunte veikiant normaliniams ir šlyties įtempiams geotinklas įsitempia ir tokiu būdu geotinklo sluoksnyje atsiranda tempimo jėgos esant labai mažoms deformacijoms. Geotinklas dėl savo standumo yra daug atsparesnis tempimo jėgoms negu gruntas, todėl šlyties įtempiai yra neutralizuojami geotinklu sutvirtintame sluoksnyje (Alimohammadi *et al.* 2019). Atsižvelgiant į bandymų rezultatus dviašio slėgio aparatu sutvirtinto grunto sluoksniams (Ruiken *et al.* 2012), kur pastebimas labai aiškus poveikis grunto sluoksniui, pateikiama sutvirtinto grunto sluoksnio laikomosios gebos didėjimo priklausomybė

nuo geotinklo standumo didėjimo. Standesnio geotinklo naudojimas lemia mažesnes vertikalias deformacijas dangų konstrukcijos paviršiuje. Kuo didesnis armavimo efektas pasiekiamas grunte, tuo labiau yra sumažinamas progresuojantis grunto sluoksnio nusidėvėjimas (Psiorz *et al.* 2014). Geotinklas gali daugiau nei du kartus sumažinti šlyties deformacijas grunte, ypač keliuose kur yra tikėtinos dangų konstrukcijos deformacijos dėl silpnos žemės sankasos gruntų ar smarkiai padidėjusių apkrovų dėl perkrautų sunkvežimių ar transporto srauto (Vollmert *et al.* 2018). Atsižvelgiant į šių funkcijų visumą geotinklu sutvirtinto grunto sluoksnis padidina dangų konstrukcijos tarnavimo laiką visais jos eksploatavimo etapais (Kazimierowicz-Frankowska 2012).

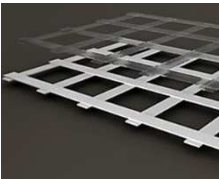
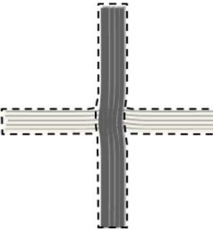
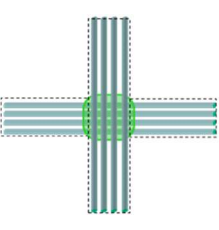
Pagal šio poskyrio geotinklo įtakos konstrukcijai analizę galima teigti, kad parenkant geotinklą itin svarbus yra jo standumas. Kuo standesnis geotinklas, tuo didesnius šlyties įtempius jis gali perimti, tuo geriau gali paskirstyti įtempį į silpną žemės sankasą, tačiau geotinklo standumas labai priklauso nuo geotinklo tipo, kuris analizuojamas 1.2 poskyryje.

1.2. Geotinklų savybės ir ilgaamžiškumas

Geotinklas, įrengtas kelio konstrukcijoje, turi išlaikyti reikiamą standumą visu kelio tarnavimo laikotarpiu. Normatyviniai techniniai dokumentai nurodo įvertinti geotinklo savybes ilgalaikėje perspektyvoje, pagal jo įrengimo vietą. Įrengiant geotinklus žemės sankasoje reikalaujama, kad geotinklo projektinis stipris temptiant būtų išlaikomas 100 metų. Dėl šios priežasties turi būti įvertinami visi neigiamą poveikį geotinklui turintys veiksniai, kurie priklauso nuo geotinklo tipo (Chow *et al.* 2014). Geotinklai pagal gamybos būdą skirstomi į 1.1 lentelėje nurodytus tipus:

- a) austinius – kurie yra pagaminti suaudžiant gijas mazguose. Dažniausiai šie gaminiai yra su didesnėmis nei 10 mm kiaurymėmis ir papildomai turi polimerinę padengimą.
- b) ištemptuosius (ekstrudinius) – kurie yra pagaminti ištemptoje membranoje išspaudžiant kiaurymes. Dažniausiai šių gaminių mazgas yra žymiai storesnis už juostą, kurios plotis yra nevienodas (prie mazgų plačiausias).
- c) virintinius – kurie yra pagaminti suvirinant geotinklo juostas mazguose (juostos mazge yra sudėtos viena ant kitos). Dažniausiai šių gaminių juostos yra plokščios, geotinklai yra standūs ir nepadengti jokia papildoma danga.

1.1 lentelė. Geotinklų tipai**Table 1.1.** Geogrid types

Požymiai	Austiniai geotinklai	Ištemptieji geotinklai	Virintiniai geotinklai
Geotinklo tipas			
Mazgas/Jungtis			
Molekulinė orientacija			

Nors visi geotinklų tipai gali turėti panašias stiprio tempiant ir pailgėjimo savybių reikšmes, tačiau jų darbas realiomis sąlygomis labai skiriasi. Austiniai geotinklai yra gaminami perpinant dvi ar daugiau gijų, dažniausiai dešiniu kampu. Šie geotinklai papildomai padengti apsauginiu polimeru ar netoksiška medžiaga, kuri padidina gaminio atsparumą UV spinduliams, rūgštims ir šarmams. Austiniai geotinklai yra lankstūs, jungtys nėra standžios. Dažniausiai jie turi mažiausią atsparumą pažeidimams įrengimo metu (Rüegger 2003). Dėl jų lankstumo šio tipo geotinklai dažniausiai turi mažiausią standumą esant mažoms deformacijoms. Ištemptieji ir virintiniai geotinklai nėra padengiami papildomais polimerais, šių tipų geotinklai yra standūs ir turi standžias jungtis, tačiau skirtumas tarp jų yra jų paviršiaus plotas ir pati jungtis. Ištemptieji geotinklai turi netiesinę molekulinę orientaciją mazguose ir gijose, tačiau turi vientisą mazgą, kai virintiniai geotinklai tiesinę molekulinę orientaciją, tačiau turi virintinę gijų jungtį. Pagal atsparumą pažeidimams įrengimo metu bendroju atveju atsparesni yra virintiniai geotinklai ir jeigu yra sugadinama virintinio geotinklo jungtis, sugadinimas nepersiduoda kitam mazgui kaip tai vyksta su ištemptaisiais geotinklais.

Tačiau virintiniai geotinklai turi būti įrengiami atsargiau, kad nebūtų pažeidžiamos virintinės jungtys. Vertinant stiprį tempiant, esant mažoms deformacijoms, virintiniai geotinklai taip pat turi pranašumą prieš ištemptuosius (Šiukščius *et al.* 2017).

Nustatant geotinklo projekcinį ilgalaikį stiprį tempiant numatytam tarnavimo laikui yra įvertinami geotinklų saugos koeficientai. Geotinklų saugos koeficientai priklauso nuo: valkšnumo – geotinklo gamybai naudojamos žaliavos; atsparumo pažeidimams įrengimo metu – užpilamo grunto dalelių dydžio ir formos; atsparumo aplinkos cheminiam poveikiui – geotinklo gamybai panaudoto polimero. Dėl labai didelės geotinklų įvairovės ir gamybos būdo, visi šie koeficientai yra skirtingi, tačiau pagal geotinklo tipą ir gaminio žaliavą galima suskirstyti saugos koeficientus intervalais (Rüegger 2003). Geotinklų saugos koeficientai pateikti A priede.

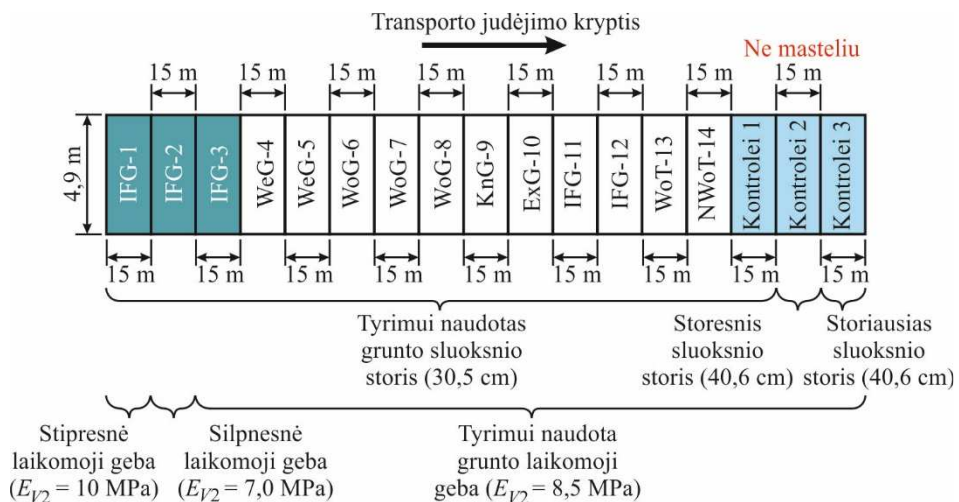
Virintiniai geotinklai užtikrina geriausią atsparumą valkšnumui pagal žaliavos tipą. Taip pat virintinių geotinklų atsparumas pažeidimams įrengimo metu yra geriausias, lyginant su kitų tipų geotinklais. Atsparumas įrengimo metu yra itin svarbus, nes geotinklas ir jo mazgai turi nesuirti grunto tankinimo metu, ypač naudojant skaldos mišinį. Pagal atsparumą cheminiam poveikiui visų tipų geotinklai yra labai panašaus lygio, todėl esminiai skirtumai tarp geotinklų tipų išryškėja vertinant valkšnumą ir atsparumą pažeidimams įrengimo metu. Dėl šių savybių ilgalaikėje perspektyvoje, labai išryškėja virintinių geotinklų pranašumas, kurie yra naudojami eksperimentiniame tyrime.

Atliekant skaičiavimus su konkrečiai pasirinktu geotinklo modeliu, geriausia naudoti konkrečiai tam gaminiui nustatytus atsparumo rodiklius, nebent tokie nenustatyti. Naudojant gamintojo pateiktus atsparumo rodiklius reikia įvertinti tai, koku būdu jie nustatyti, nes atliekant laboratorinius ir lauko bandymus rezultatai gali smarkiai skirtis (Stolyarov *et al.* 2014).

1.3. Geotinklų savybių ir jų kitimo įtaka kelio konstrukcijos pastovumui

Siekiant nustatyti svarbiausias geotinklų savybes, kurios turi įtakos laikomosios geobos rezultatams buvo atlikti didelės apimties lauko bandymai. 2009–2014 metais, Jungtinėse Amerikos Valstijose, Montanos valstijos universitetas (Cuelho *et al.* 2009) atliko lauko bandymus siekiant apibrėžti geotinklų savybes kurios yra labiausiai susijusios su realiu geotinklo darbu grunte jį stabilizuojant. Todėl projektuojant geotinklus būtų galima objektyviai įvertinti naudojamo gaminio savybes.

Šis tyrimas buvo atliktas dviem etapais. Pirmasis baigtas 2009 metais, antrasis 2014 metais. Tiriamieji ruožai buvo įrengti taip, kad būtų galima nustatyti rinkoje esančių skirtingų tipų geotinklų įtaką sutvirtintam grunto sluoksniui. Silpnas gruntas (smėlingas molis), imituojantis silpną žemės sankasą, įrengtas 1,0 m gylio, visuose ruožuose buvo panašių fizikinių ir mechaninių savybių (takumo rodiklis 34 %, plastiškumo rodiklis 17 %, optimalus drėgnis 16 %, sauso grunto svoris $17,5 \text{ kN/m}^3$), kurio $E_{v2} = 10 \text{ MPa}$. Lygiai taip pat, 0,305 m storio užpilo gruntas (smėlingas žvyras, klasė A-2-4, pagal AASHTO M-145 klasifikaciją) virš geotinklų visuose ruožuose buvo panašių fizikinių ir mechaninių savybių. Pirminis veiksnys, parodęs geotinklo įtaką užpiltam gruntui buvo provėžos gylis transporto apkrovos (trijų ašių sunkvežimis sveriantis 20,6 t) judėjimo kryptimi. Kritinis provėžos gylis buvo 75 mm. Geotinklų savybės nustatytos laboratorijoje buvo naudojamos toliau analizuoti jų ir lauko bandymais gautų rezultatų priklausomybę. Siekiant, kad rezultatai būtų kiek įmanoma tikslesni ir būtų galima juos tiesiogiai palyginti, tyrimo autorius (Cuelho *et al.* 2016) naudojo kontrolinius ruožus be geotinklų. Ruožai be geotinklų įrengti su ne itin skirtingomis silpno grunto savybėmis ir skirtingu užpildo grunto sluoksnio storium. Tokiu būdu buvo įvestas empirinis rezultatų koregavimo procesas. Tiriamieji ruožai išdėstyti (1.4 pav.) naudojant 4,9 m pločio zoną kurioje kas 15,0 m buvo naudojami skirtingų tipų geotinklai. Viso buvo panaudota 10 geotinklų su skirtingomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis kur kiekvienam jų buvo atliekami 5 laboratoriniai bandymai: stipris tempiant, cikliškasis tempimo modulis, paviršiaus trinties modulis, mazgo stipris ir akutės stabilumo modulis.



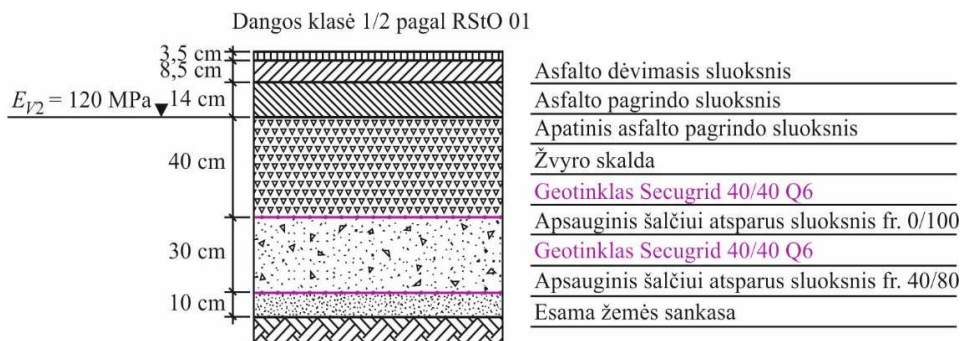
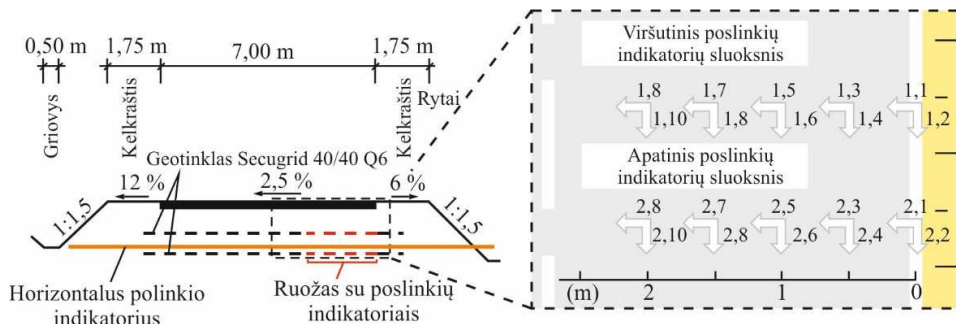
1.4 pav. Tiriamųjų ruožų išdėstymas (Cuelho *et al.* 2016)

Fig. 1.4. Test sections layout (Cuelho *et al.* 2016)

Cuelho *et al.* (2016) atliktas tyrimas parodė, kad situacijose kur yra mažiau efekto iš žvyro sluoksnio ir daugiau iš geotinklo sluoksnio, geotinklo standumas ir stipris tempiant turi didžiausią įtaką provėžos susidarymo mažinimui. Ypatingai tai pasireiškė esant staigiam tiriamojo ruožo susilpnėjimui dėl transporto priemonės sukeltos apkrovos. Geotinklo mazgo stipris ir standumas skersine kryptimi yra svarbus, tačiau sumažėja besiformuojant provėžai. Tačiau esant situacijoms, kur yra didesnis užpilamo grunto sluoksnio storis ir provėžos formavimasis yra lėtesnis, geotinklo mazgo standumas ir stipris yra svarbesni parametrai. Geriausiais rezultatais bandymuose pasižymėjo standūs geotinklai turintys standų mazgą (bent 8,8 kN/m) ir pakankamą stiprį tempiant (bent 30 kN/m). Geotinklai turintys standų mazgą (nuo 12,6 kN/m), bet mažą stiprį tempiant (iki 20 kN/m) arba didelį stiprį tempiant (bent 30 kN/m), bet silpną mazgą (iki 6,5 kN/m) pasižymėjo kur kas prastesniais rezultatais (E. Cuelho *et al.* 2016).

Tačiau šis tyrimas buvo atliktas naudojant automobilių kelio konstrukciją be dangos. Jis parodo, kurie geotinklo parametrai turi didžiausią įtaką jų darbui, kai žemės sankasos laikomoji geba yra $E_{v2} = 10$ MPa. Todėl yra labai svarbu žinoti kokie įtempiai veikia geotinkle, kai kelio konstrukcija yra su danga (Vollmert *et al.* 2014).

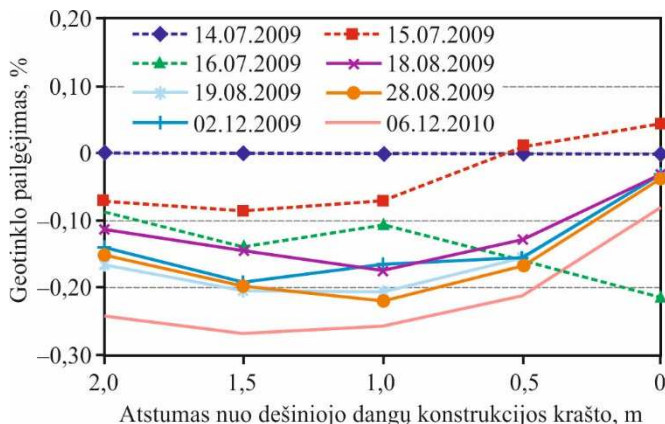
Clausthal technologijos Universiteto, Vokietijoje atliktas tyrimas (2011 metais) siekiant nustatyti, kaip armavimo geotinklais efektas skiriasi praktikoje tarp horizontalaus suvaržymo efekto (tampriojo būvio) ir membranos efekto (plastiškojo būvio). Altenbergo miesto pietiniame aplinkkelyje buvo įrengtas tiriamasis ruožas. Įrengti geotinklai kartu su poslinkių davikliais siekiant išmatuoti geotinklo sluoksnių pailgėjimą automobilių kelio statybų metu ir užbaigus statybas. Žemės sankasoje sutiktas glacialinis molis ir molis su rieduliais, kurių storis nuo 0,7 m iki 1,8 m. Nustatytas žemės sankasos iš molingų gruntų deformacijų modulis $E_{v2} = 10$ MPa. Dėl šios priežasties buvo reikalingas žemės sankasos sutvirtinimas. Siekiant padidinti deformacijų modulį, konstrukcija buvo suarmuota dviem standaus virintinio poliesterio geotinklo sluoksniais, kurio didžiausias trumpalaikis stipris tempiant išilgine ir skersine kryptimis yra 40 kN/m. Įtempių matavimai buvo atlikti tiek išilgine tiek skersine kryptimis (žr. 1.5 pav.). Kiekvienam geotinklo sluoksniui buvo sumontuoti penki poslinkių davikliai tiesiai ant geotinklo juostos 90° kampu kelio ašiai, tarp kurių buvo 0,5 m atstumas. Tai leido nustatyti poslinkius nuo pravažiuojančios transporto priemonės ir deformacijų zoną bei jų intensyvumą. Vertikalių deformacijų nustatymui visame kelio plote buvo įrengtas horizontalaus polinkio matuoklis virš pirmojo geotinklo sluoksnio (1.6 pav.).

1.5 pav. Kelio konstrukcijos detalė (Vollmert *et al.* 2014)Fig. 1.5. Road structure detail (Vollmert *et al.* 2014)1.6 pav. Skersinis pjūvis su prietaisų, įtempių indikatorių pozicijos ir horizontalaus polinkio indikatoriaus išdėstymu (Vollmert *et al.* 2014)Fig. 1.6. Cross section showing instrumentation, position of strain gauges and horizontal inclinometer (Vollmert *et al.* 2014)

Statybų metu, užpylus ir sutankinus pirmąjį grunto sluoksnį ant pirmojo geotinklo iš karto buvo užfiksuotas 10 mm nuosėdis. Aiškiai matomų provėžų formavimasis statybų metu buvo užfiksuotas iki įrengiant asfalto dangą. Didžioji deformacijų dalis susidarė įrengimo metu, t. y. prieš įrengiant skaldos pagrindo sluoksnį. Įtempių daviklių rodmenys (1.7 pav.) skersine keliui kryptimi skirtingais laikotarpiais parodė didžiausius geotinklo poslinkius ties dešinės eismo juostos viduriu, o jos kraštuose nustatytas poslinkių mažėjimas.

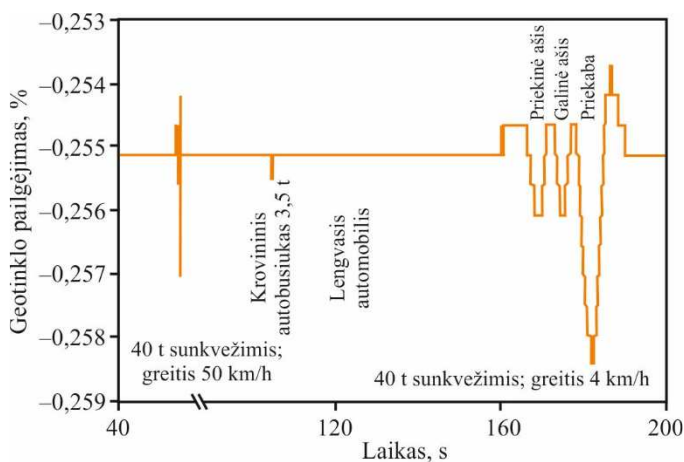
Apatiniame geotinklo sluoksnyje kiekvienu apkrovimo momentu nustatyti tamprūs poslinkiai eismo kryptimi visame plote pasiskirstė labai panašiai, nuo 0,022 % iki 0,028 %. Tyrimų metu nustatyta, kad poslinkiai palaipsniui didėja nuo statybų darbų pradžios ir net praėjus metams po kelio įrengimo. Tai paaiškinama

provėžos formavimusi ir horizontaliu grunto dalelių judėjimu visoje kelio konstrukcijoje, dėl transporto apkrovų poveikio bei po statybų atsirandančių žemės san- kasos deformacijų.



1.7 pav. Poslinkių vystymasis skersine kelio ašiai kryptimi statybų metu ir po vienerių metų (Vollmert *et al.* 2014)

Fig. 1.7. Development of strains transverse to road axis over the construction period and one year of operation (Vollmert *et al.* 2014)



1.8 pav. Geotinklo pailgėjimo kreivės transporto priemonės judėjimo metu (Vollmert *et al.* 2014)

Fig. 1.8. Geogrid strain curves of different events (Vollmert *et al.* 2014)

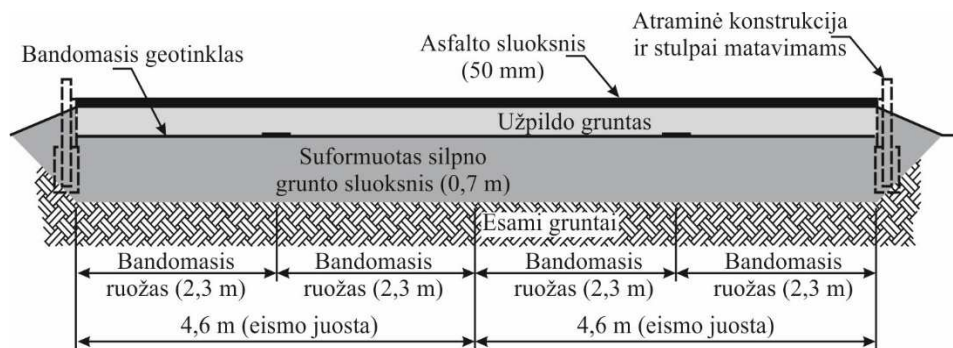
Vertinant apkrovas ant įrengtos kelio dangos pateiktas geotinklo pailgėjimas 2,7 minutės intervale, kurio metu poslinkių indikatoriai užfiksavo pravažiuojant 40 t trijų ašių sunkvežimį 50 km/h greičiu, bei 4 km/h greičiu, 3,5 t krovinių autobusiuką ir lengvąjį automobilį važiujančius 50 km/h greičiu (1.8 pav.). Pailgėjimas buvo matuojamas važiavimo kryptimi. Didžiausią geotinklo pailgėjimą sukėlė 4 km/h greičiu judanti sunkvežimio priekaba, kurios trys ašys yra viena šalia kitos. Šis pailgėjimas užfiksuotas apatiniam geotinklo sluoksnyje. To paties sunkvežimio priekinė ir galinė ašys sukėlė didžiausius geotinklo pailgėjimus viršutiniame geotinklo sluoksnyje. Šių matavimų metu buvo atlikti ir dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių matavimai naudojant krentančio svorio deflektometrą (angl. FWD).

Pagal gautus tamprumo modulių rezultatus buvo išskaičiuota skaldos pagrindo sluoksnio vidutinė antrinio deformacijų modulio reikšmė, kuri yra $E_{v2} = 111$ MPa, o viršutinio geotinklo įtempių davikliais nustatytas 0,04–0,06 % pailgėjimas. Išmatuotas įtempių didėjimas skirtingais laiko tarpais parodė reikšmingą sąsają tarp laikomosios gebos bandymo statiniu štampu ir judančios transporto apkrovos bei tuo pačiu metu veikiančių šlyties įtempių. Nors didžiausia apkrova gali būti aiškiai apibrėžta statinio štampos bandymu, ryškus pasikeitimas tarp tempimo ir susispaudimo, kuris vyksta nuo transporto priemonių apkrovos nėra nustatomas statinio štampos bandymu. Įrengti geotinklų sluoksniai daro didelę įtaką visai kelio konstrukcijai ir nustatyti įtempiai patvirtina Montanos valstijos Universiteto (Cuelho *et al.* 2016) atlikto tyrimo rezultatus. Dėl šios priežasties tyrime panaudoti geotinklai pasižymi geru sukibimu su užpildo gruntu taip jį stabilizuodami dėl esamo stiprio tempiant (40 kN/m) ir standaus mazgo. Geotinklo darbinėje stadijoje plastinės deformacijos labai standžiose konstrukcijose yra itin mažos lyginant su tampriomis deformacijomis. Tačiau tyrimas parodė, kad net ir labai standžiose konstrukcijose atsiranda tam tikra dalis plastinių deformacijų. Todėl siekiant sumažinti plastinių deformacijų susidarymą, geotinklams turi būti gerai perduodami tempimo įtempimai, kurie atsiranda ir esant labai mažoms deformacijoms (Vollmert *et al.* 2014).

Šis tyrimas truko tik vienerius metus ir nėra žinoma kaip ilgai vystosi įtempiai ir provėžos gylis. Vollmert *et al.* 2018 metais taip pat atliko papildomus laboratorinius tyrimus triašio slėgio aparatu siekiant patvirtinti lauko bandymais nustatytą armavimo efektą ir geotinklo pailgėjimą grunte. Laboratorinis tyrimas parodė, kad geotinklo poveikis pasireiškia esant labai mažiems geotinklo pailgėjimams t. y. iki 0,05 %. Taip pat, triašio slėgio aparato tyrimai parodė, kad naudojant geotinklą yra stipriai sumažinamos plastinės deformacijos grunte. Geotinklo pailgėjimas esant 0,9 m nuosėdžiui neviršija 1 % (Vollmert *et al.* 2014).

Dar vienas panašus tyrimas buvo atliktas JAV *TRI Environmental* nepriklausomos laboratorijos. Šio tyrimo tikslas buvo įvertinti įprastų, JAV dažnai naudojamų geotinklų, veikimą realiomis sąlygomis, pagal jų funkcinę paskirtį. Visą bandymą atliko nepriklausoma laboratorija *TRI Environmental*, jiems priklausančiame tyrimų poligone *Denver Downs*, Andersone, Pietų Karolinoje (JAV). Visi

bandomieji ruožai buvo suformuoti į ovalo formos kelią, nepertraukiamai transporto apkrovai sukurti. Bandomieji ruožai buvo tiesiose dalyse (122 m). Konstrukcijos skerspjūvyje (1.9 pav.) įrengti 4 bandomieji ruožai, kurių centras buvo ties numatoma provėžos formavimosi zona.



1.9 pav. Tipinis bandymo skersinis pjūvis (Valero *et al.* 2014)

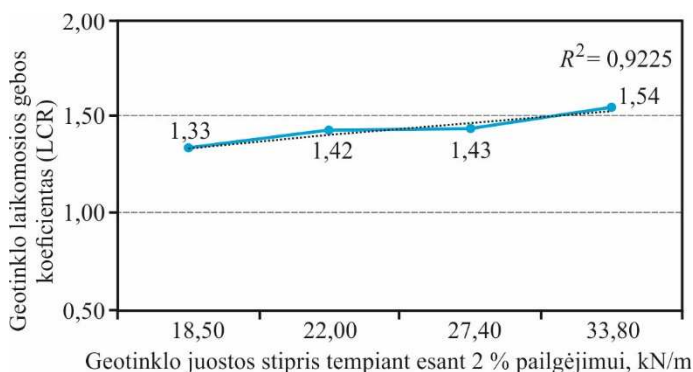
Fig. 1.9. Typical test cross section (Valero *et al.* 2014)

Silpna žemės sankasa imituota supilant dulkingą gruntą, kuris pasižymi labai panašia konsistencija visame tyrimo plote. Papildomai, buvo nustatytas suformuoto grunto laikomosios gebos Kalifornijos rodiklis (*CBR*), kuris kito nuo 2,2 % iki 2,9 %, o tai pagal E_{v2} būtų nuo 11,0 MPa iki 14,5 MPa (*MN GEOSINT ŽD 13* pirmasis priedas). Ant suformuoto silpno grunto buvo paruošta 14 tiriamųjų ruožų, kuriuose buvo įrengti tiriamieji geotinklai. Geotinklai buvo klojami išilgai transporto judėjimo krypties, gretimose juostose juos perdengiant tik keliais centimetrais. Naudoti geotinklai buvo vieno tipo, t. y. ištemptieji, pagaminti iš PP, tačiau skyrėsi akutės forma (kvadratinė arba trikampė). Geotinklų didžiausias trumpalaikis stipris tempiant kito nuo 14,1 kN/m iki 40,7 kN/m. Ant bandomojo geotinklo buvo įrengtas nesurištasis mišinys sudarytas iš natūralaus skaldos užpildo, kurio didžiausios dalelės dydis buvo ne didesnis kaip 50,8 mm. Numatytas vibrovolu sutankinto skaldos sluoksnio storis 20,32 cm. Dangą sudarė 50,8 mm storio asfaltbetonio sluoksnis.

Transporto apkrovai sukurti buvo naudojamas standartinis dviejų ašių sunkvežimis, kurio ašinė apkrova 80 kN. Bandymas buvo tęsiamas iki buvo pasiektas 10000 pravažiavimų ciklų skaičius arba tol, kol susiformavo 25 mm gylio provėža. Vienas sunkvežimio pravažiavimas buvo vertinamas kaip du apkrovos ciklai, nes sunkvežimis buvo dviejų ašių.

Valero *et al.* (2014) nustatė, kad visi geotinklais sutvirtinti ruožai pasižymi daug geresniu atsparumu provėžos susidarymui nei kontroliniai ruožai be geotinklų. Atliktais tyrimais nustatyta priklausomybė, kuo standesnis geotinklas, tuo

geresnį grunto stabilizavimo efektą jis suteikia, tuo labiau sumažindamas provėžos dydį, nepriklausomai nuo geotinklo akutės formos, ką patvirtino ir Fischer *et al.* 2016 atlikti laboratoriniai tyrimai atliekant grunto kirpimo bandymus su geotinklais. Ypač aiški priklausomybė (1.10 pav.) buvo nustatyta tarp išbandyto geotinklo laikomosios gebos koeficiento (LCR) ir geotinklo juostos stiprio tempiant esant 2 % pailgėjimui (Valero *et al.* 2014).



1.10 pav. Geotinklo laikomosios gebos koeficiento ir juostos stiprio tempiant esant 2 % pailgėjimui priklausomybė

Fig. 1.10. Relation between geogrid bearing capacity coefficient and rib tensile strength at 2 % elongation

Taigi, šis tyrimas gana gerai atspindi geotinklo veikimo principą, leidžia tiksliau numatyti geotinklo poveikį dangų konstrukcijai, tačiau neatspindi dažniausiai naudojamų dangų konstrukcijų sąlygų, kur geotinklai yra naudojami ne dangų konstrukcijos armavimui ir stabilizavimui, o žemės sankasos pagerinimui.

Tačiau nė vienas iš minimų tyrimų tiesiogiai nenagrinėja geotinklų įtakos kelio konstrukcijai, kai gilesniuose žemės sankasos sluoksniuose yra sutinkami organinių gruntų sluoksniai. Tokio tipo tyrimai yra atlikti tik Vokietijos geležinkelio keliuose.

Lieberenz *et al.* (2009) atliko mokslinius tyrimus siekdamas nustatyti kokį poveikį geležinkelio keliui turi geotinklai kai žemės sankasoje po pylimu yra sutinkami iki 3,0 m storio organiniai grantai (durpės, dumblas). Geležinkelio keliuose tai yra ypač aktualu dėl dinaminių apkrovų sukeltų vibracijų grunte, kurios padidina grunto deformacijas ir įtempius. Didėjant traukinių greičiui, didėja dinaminės apkrovos ir vibracijos gruntuose. Tai padidina šlyties įtempius grunte. Lieberenz *et al.* (2009) šlyties įtempius prilygina dinaminiam grunto apkrovimo laipsniui, o norint jas sumažinti reikia gruntuose įterpti tamprų elementą (geotinklą). Tyrimams naudoti geležinkelio kelių ruožai:

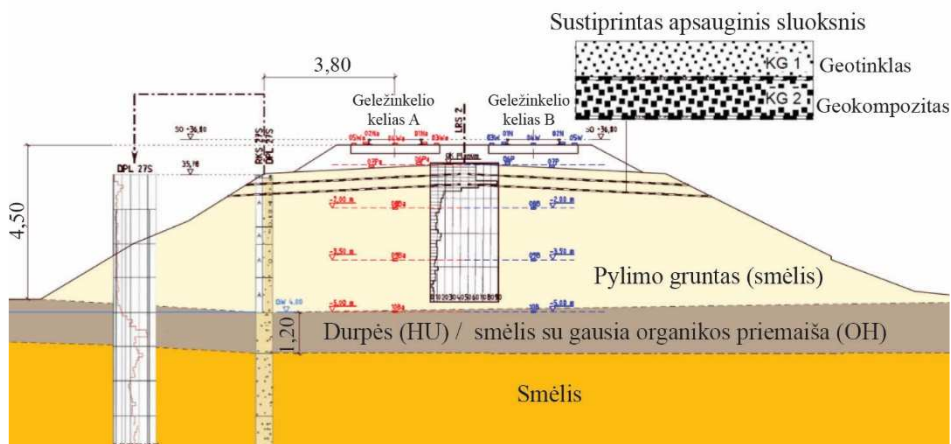
- Hamburg–Berlin, kur traukinių greitis buvo padidintas nuo 160 km/h iki 230 km/h;

- Casekow–Tantow;
- Ausbaustrecke Saarbrücken–Ludwigshafen, kur traukinių greitis buvo padidintas nuo 160 km/h iki 200 km/h.

Ruože Hamburg–Berlin 4,5 m gylyje nuo pabėgio viršaus buvo 1,2 m storio silpno organinio grunto sluoksnis. 0,6 m storio apsauginiame sluoksnyje buvo įrengti du 60 kN/m stiprio tempiant geotinklų sluoksniai (1.11 pav.). Vibracijų ir deformacijų matavimai buvo atliekami 5 metus. Lieberenz *et al.* (2009) nustatė, kad geotinklai, kaip amortizuojantys elementai, sumažina kvazistatinį ir ypač dinaminį poveikį silpniems organiniams gruntams. Dėl šios priežasties tamprųjų deformacijų dydis apsauginiame sluoksnyje yra labai panašus (1.12 pav.).

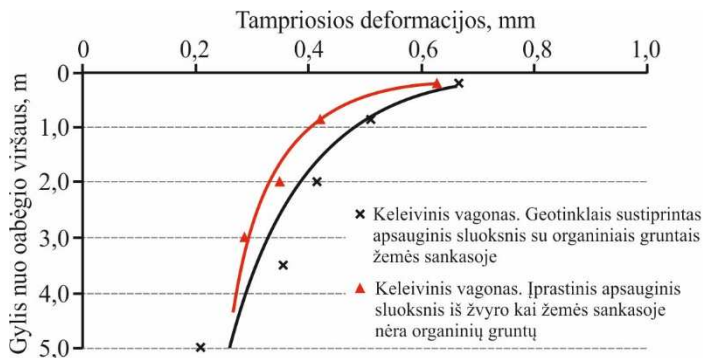
Atliekant vibracijų sklaidimo greičių analizę pastebėta, kad geotinklais sutvirtintas apsauginis sluoksnis esantis virš žemės sankasos su organinių gruntų sluoksniais parodo neprastesnius arba geresnius rodiklius nei etaloninė konstrukcija.

Remiantis Hamburg–Berlin projekto patirtimi Lieberenz *et al.* (2009) numatė geležinkelio ruožo Casekow–Tantow rekonstravimo virš pelkėtų vietovių sprendinius nekeičiant organinio grunto ir vietoje to naudojant dviem geotinklų sluoksniais sutvirtintą apsauginį sluoksnį (1.13 pav.). Siekiant įrodyti sprendinio veiksmingumą buvo atlikti vibracijų sklaidimo ir konstrukcijos nuosėdžių matavimai. Vibracijos dažnio matavimui panaudoti davikliai buvo įrengti ant pabėgio, apsauginiame sluoksnyje (1,6 m gylyje nuo bėgio viršaus) ir durpių sluoksnyje (2,6 m gylyje nuo bėgio viršaus).



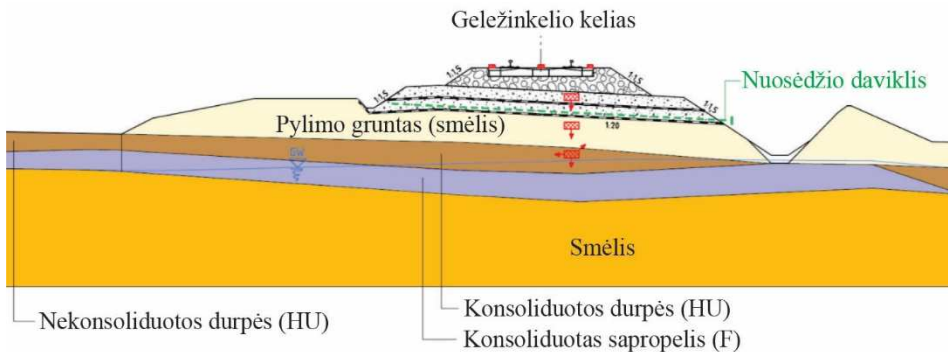
1.11 pav. Hamburg–Berlin atkarpoje atlikto bandomojo ruožo skersinis pjūvis (Lieberenz *et al.* 2009)

Fig. 1.11. Hamburg–Berlin test cross section (Lieberenz *et al.* 2009)



1.12 pav. Tampriosios deformacijos grunte keleivinio traukinio vagonui važiuojant 190 km/h greičiu (Lieberenz *et al.* 2009)

Fig. 1.12. Elastic deformations in the soil when passenger train speed is 190 km/h (Lieberenz *et al.* 2009)

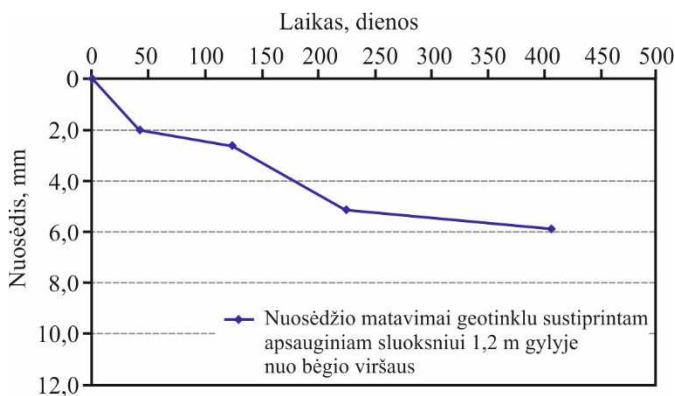


1.13 pav. Casekow–Tantow atkarpoje atliktų bandomųjų ruožų tipinis skersinis pjūvis (Lieberenz *et al.* 2009)

Fig. 1.13. Casekow–Tantow typical cross section of all tested sections (Lieberenz *et al.* 2009)

Nuosėdžių daviklis fiksavo pagrindo nuosėdžius. Iš viso buvo numatytos 5 matavimų vietos, o matavimai vyko 2007–2009 metais. Geotinklais sutvirtinto apsauginio sluoksnio, kai gilesniuose žemės sankasos sluoksniuose yra organinio grunto, deformacijos laikui bėgant didėjo. Kiekvieno matavimo etapu išmatuotos vidutiniškai 2 mm didesnės deformacijos. Laiko tarpas tarp atskirų matavimo etapų buvo maždaug dvigubai didesnis, todėl deformacijų skirtumas didėjo tiesiškai. Esant 6,0 mm nuosėdžiui per metus nuo geležinkelio eksploatacijos pradžios, pagrindų ir žemės sankasos deformacijos geotinklais sutvirtintame ruože yra pakankamai maža (1.14 pav.). Didžiausias užfiksuotas nuosėdžių skirtumas išilgine kelio kryptimi buvo 4,3 mm. Tokie rezultatai neviršijo RIL 821.2001 reikalavimų, kai 120 km/h

greičio geležinkeliui, nuosėdžiai turi būti mažesni nei 13,0 mm (išilgine kryptimi) arba mažesni nei 11,0 mm (skersine kryptimi).



1.14 pav. Tiriomojo Casekow–Tantow ruožo su geotinklais nuosėdis kai traukinių greitis yra 120 km/h (Lieberenz *et al.* 2009)

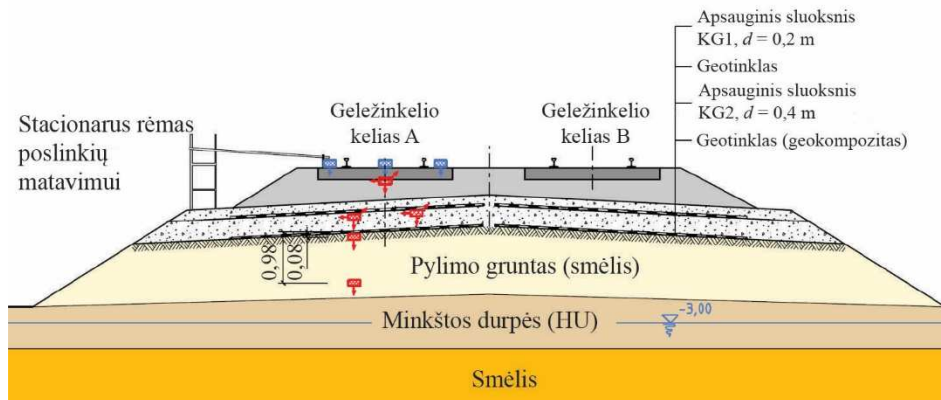
Fig. 1.14. Casekow–Tantow section vertical deformations in geogrid reinforced subbase when train speed is 120 km/h (Lieberenz *et al.* 2009)

Lieberenz 2008 metais įrengė tiriamąjį ruožą geležinkelio linijoje Ausbaustrecke Saarbrücken–Ludwigshafen kuriame geotinklais sutvirtintas apsauginis sluoksnis skirtas ne tik konstrukcijos vientisumui virš žemiau esančių organinių gruntų sluoksnių, bet ir apsauginio sluoksnio laikomosios gebos padidinimui pagal Vokietijos geležinkelio kelių reikalavimus (*RIL 836.0501*). 0,6 m storio apsauginio sluoksnio sutvirtinimui buvo panaudoti du 40 kN/m stiprio tempiant geotinklų sluoksniai (1.15 pav.). Iš viso buvo numatytos 3 matavimų vietos. Matavimai buvo atlikti keleiviniams traukiniams važiuojant 160 km/h greičiu ir kroviniams traukiniams važiuojant 100 km/h greičiu.

Vibracijų sklaidimo greičio matavimai parodė, kad vibracijų greitis po pabėgiu ir apsauginiame sluoksnyje yra toks pat didelis tiek geotinklais sutvirtintuose ruožuose, tiek etaloniniuose ruožuose. Tačiau vibracijų greitis 1,0 m gylyje žemiau apsauginio sluoksnio yra kur kas mažesnis geotinklais sutvirtintuose ruožuose. Tai parodo, kad geotinklai labai gerai perima dinamines apkrovas padidindami sluoksnio tamprumo modulį.

Lieberenz *et al.* (2009) tyrimas parodė, kad tipinėje geležinkelio kelio konstrukcijoje įrengus geotinklais sutvirtintą apsauginį sluoksnį, sumažėja įtempiai esamuose organiniuose sluoksniuose ir padidėja laikančios konstrukcijos stiprumas. Gerokai sumažinamas vibracijų greitis žemiau geotinklais sutvirtinto apsauginio sluoksnio. Lieberenz *et al.* (2009) tyrimas parodė, kad vibracijos buvo sumažintos

daugiau nei tikėtasi. Nors nuosėdžių matavimai parodė konstrukcijų vertikalias deformacijas, jos buvo tolygios ir neturėjo neigiamos įtakos bėgių posvyriui.



1.15 pav. Ausbaustrecke Saarbrücken–Ludwigshafen atkarpoje atliktų bandomųjų ruožų tipinis skersinis pjūvis (Lieberenz *et al.* 2009)

Fig. 1.15. Ausbaustrecke Saarbrücken–Ludwigshafen typical cross section of all tested sections (Lieberenz *et al.* 2009)

Wegener *et al.* (2013) vykdė tolimesnius tyrimus, kai žemės sankasoje buvo didesnio storio organinių gruntų sluoksniai ir sudarė geotinklais sutvirtinto geležinkelio kelio apsauginio sluoksnio naudojimo ribas įvardinant organinio sluoksnio gylį žemės sankasoje ir jo sluoksnio storio priklausomybę, kai geležinkelio kelio konstrukcijai nedaromas neigiamas poveikis. Lieberenz *et al.* (2009) ir Wegener *et al.* (2013) tyrimų dėka, Vokietijoje buvo išleistas normatyvinis techninis dokumentas, geotinklais sutvirtintų geležinkelio kelio konstrukcijų parinkimui kai gilesniuose žemės sankasos sluoksniuose yra sutinkami organiniai gruntai „Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten Untersuchungen zur Dynamischen Stabilität. Vereinfachte Bewertung der Dynamischen Stabilität von Bestehenden Strecken“.

Nors geležinkelio apsauginio sluoksnio sutvirtinimas geotinklais yra apibrėžtas normatyviniais techniniais dokumentais ir naudojamas Vokietijos geležinkeluose nuo 2018 metų, automobilių keliuose šis geotinklų pritaikymas iki šiol yra neapibrėžtas ir neiširtas.

1.4. Geotinklų parinkimo ir naudojimo žemės darbams keliuose analizė

Automobilių kelių su asfalto danga tvarų funkcionavimą nusako šie kokybiniai rodikliai: pažaidos ir jų mastas, konstrukcijos stiprumas, dangos nelygumas ir paviršiaus atsparumas slydimui. Pažaidos, susidaranti asfalto dangoje, dažniausiai yra asfalto sluoksnių ir jos įrengimui naudotų medžiagų savybių kaitos pasekmė. Tačiau tokios pažaidos, kaip įdubos, dangos skersinio profilio pokrypis ir tinkliniai plyšiai, susidaro dėl pagrindų ir žemės sankasos nepakankamo stiprio. Dangos nelygumas priklauso nuo kelio konstrukcijos stiprio bei asfalto dangos bei jos įrengimui naudotų asfalto mišinių savybių. Taigi, pagal kelio dangos nelygumą ir kelio konstrukcijos (ir jos sluoksnių) stiprumą galima spręsti apie jų priežastis, kurių viena yra žemės sankasos ir jos gruntų būklė. Todėl projektuojant kelią, jo konstrukciją, svarbu tinkamai įvertinti žemės sankasą, jos gruntu ir esant poreikiui parinkti tinkamas priemones ir technologijas sustiprinimui ir (arba) sutvirtinimui.

1.4.1. Silpnos žemės sankasos sustiprinimo ir sutvirtinimo metodų analizė

Silpna žemės sankasa yra tokia, kai žemės sankasos laikomoji geba ir (arba) sustankinimas yra nepakankami. Vadovaujantis automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklėmis *IT ŽS 17*, silpna žemės sankasa yra tokia, kai deformacijų modulis E_{v2} ant šalčiui jautrios žemės sankasos viršaus yra mažesnis už 45 MPa. Silpnos žemės sankasos sustiprinimui yra taikomas silpno grunto iškasimas ir pakeitimas stipriu gruntu, grunto stabilizavimas hidrauliniiais rišikliais, sutvirtinimas geotinklais arba polių įrengimas su geotinklais armuoto grunto platforma.

Silpnos žemės sankasos sustiprinimui naudojamą silpno grunto pakeitimą nauju, gerai drenuojančiu (pralaidumo vandeniui koeficientas $k_{10} \geq 10^{-5}$ m/s) ir besitankinančiu grunto sluoksniu (vienodumo koeficientas $C_u \geq 15$; dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 0,063 mm, masė ne didesnė kaip 5 %) galima susieti kartu su daliniu grunto pakeitimu naudojant geotinklus. Bendruoju atveju atliekant grunto pakeitimą, geotinklas mechaniškai sutvirtina naujai supilamą gruntą ir leidžia naudoti plonesnį jo sluoksnį. Bet koku kitu atveju, t. y. pakeičiant gruntą, ar sutvirtinant geotinklais, ar stabilizuojant hidrauliniiais rišikliais, žemės sankasos laikomosios gebos padidinimas vyksta sumažinant šlyties įtempius grunte. Saugiausias sprendimas yra visiškas grunto pakeitimas, nes užtikrinant reikalingą laikomąją gebą, konstrukcija kartu yra apsaugoma ir nuo neigiamo šalčio poveikio. Tačiau tai daugiausiai resursų reikalaujantis sprendimas. Dėl šios priežasties dažniausiai naudojami silpnos žemės sankasos sustiprinimo būdai yra:

stabilizavimas hidrauliniiais rišikliais ir sutvirtinimas geotinklais. Abu žemės sankasos sustiprinimo būdai turi savo privalumus ir trūkumus, todėl jų panaudojimas priklauso nuo esamos geologinės sandaros ir numatomos statybos technologijos. Eksperimentinio tyrimo ruožuose šie žemės sankasos sustiprinimo būdai buvo panaudoti dažniausiai.

Žemės sankasos stabilizavimo hidrauliniiais rišikliais privalumai ir trūkumai laikomosios gebos padidinimui:

- nereikalingas grunto keitimas;
- stabilizuoto F3 klasės jautrumo šalčiui klasės gruntai (labai jautrūs) gali įgyti F2 jautrumo šalčiui klasės gruntų (mažai ir vidutiniškai jautrūs) savybių;
- apdorojami gruntai turi būti homogeniški;
- ribotas panaudojimas su vidutinio plastiškumo dulkiiais ir moliais, nuo minkštos iki kietos konsistencijos didelio plastiškumo moliais, organinių priemaišų turinčiais gruntais ir organiniais gruntais;
- nenaudojamas su besikeičiančio stiprumo gruntais, organiniais gruntais, nuo minkštos iki kietos konsistencijos didelio plastiškumo moliais;
- sudėtingas įrengimas reikalaujantis specialių mechanizmų;
- įrengimas labai priklauso nuo esamų oro sąlygų. Jeigu yra kintama temperatūra ar drėgmė, kas kart turi būti daromas kontrolinis bandymas, kad būtų parenkamas reikiamos konsistencijos mišinys, kitu atveju reakcija gali vykti ne taip kaip numatyta projekte;
- ilgai trunkantys iki 25 cm storio sluoksnių bandymai, nes stabilizuoto sluoksnio bandymas turi būti atliekamas imant bandinius ir juos gniuždant, laikomosios gebos Kalifornijos rodiklį (CBR) nustatant laboratorijoje, bei tiriant sluoksnio takumo ir plastiškumo ribų pakitimą;
- gruntų sustiprinimo ir kvalifikuoto gruntų pagerinimo tinkamumo bandymai paprastai užtrunka apie 5–6 savaites;
- nedeklaruojamas stabilizuoto grunto ilgaamžiškumas.

Žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais privalumai ir trūkumai laikomosios gebos padidinimui:

- reikalingas dalinis grunto pakeitimas;
- leidžia sutaupyti iki 30 % užpilamo grunto lyginant su įprastiniu grunto pakeitimu;
- dirba tampoje stadijoje, todėl gruntas gali atlaikyti didesnę apkrovų ciklą skaičių;
- ribotas panaudojimas su daug smulkios frakcijos (vienodumo koeficientas $C_u \geq 15$; dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 0,063 mm, masė ne didesnė kaip 5 %) turinčiais užpildais;
- nenaudojamas su sankabiais užpildais;

- lengvas įrengimas nereikalaujantis specialių mechanizmų;
- geotinklų rengimas nepriklauso nuo oro sąlygų;
- naudojamas greitas sutvirtinto sluoksnio laikomosios gebos bandymas statiniu štampu;
- geotinklas neatskiria gruntų sluoksnių ir nėra drenuojantis sluoksnis, todėl norint kartu sukurti atskyrimo ir drenavimo funkcijas turi būti papildomai naudojamos neaustinės geotekstilės ar drėnažiniai geokompozitai;
- geotinklų ilgaamžiškumas yra lengvai deklaruojamas gamintojo, ne mažiau kaip 100-ui metų;
- geotinklų projektinis tarnavimo laikas gali būti apskaičiuojamas iki 120 metų;
- geotinklai turi būti užpilti gruntu po jų įrengimo praėjus ne daugiau kaip 1 mėnesiui.

Pagrindinis skirtumas kuris matomas tarp silpnos žemės sankasos stabilizavimo hidrauliniais rišikliais ir sutvirtinimo geotinklais atsižvelgiant į normatyvinių techninių dokumentų bazę yra ilgaamžiškumas. Ilgaamžiškumas yra skirstomas į du tipus: pačios medžiagos ilgaamžiškumą ir projektinį konstrukcijos tarnavimo laiką. Geotinklai ir hidrauliniai kelių rišikliai yra įtraukti į Europoje naudojamų reglamentuojamų statybos produktų sąrašą (<https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/c2389b117a1d11e89188e16a6495e98c?jfwid=9fbgs8jqb>). Tačiau jiems taikomi skirtingi reikalavimai eksploatacinių savybių deklaravimui. Geotinklų gamintojai privalo nurodyti gaminio ilgaamžiškumą, o hidraulinio rišiklio gamintojams tai neprivaloma. Projektinis žemės sankasos tarnavimo laikas pagal automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės *KPT SDK 19* numatomas ne mažesnis kaip 100 metų. Šiuo aspektu geotinklų veikimas yra apibrėžiamas ilgalaikiu projektiniu stipriu tempiant, kai hidrauliniais rišikliais stabilizuotas sluoksnis nėra kaip nors apibrėžiamas ar nagrinėjamas.

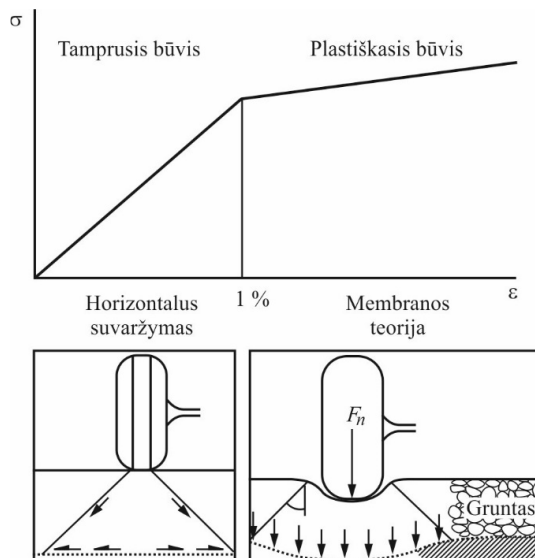
Kai žemės sankasa yra įrengiama pelkėtose vietovėse yra naudojamas grunto pakeitimas, konsolidavimas arba poliais sustiprinama žemės sankasa su geotinklais armuoto grunto platforma. Šie metodai taip pat yra taikomi, kai žemės sankasoje yra sutinkami organiniai gruntai. Visų šių metodų trūkumas yra labai didelė įrengimo kaina ir (arba) ilgas įrengimo laikas. Dėl šių priežasčių kyla diskusijos, kokiais atvejais galima nenaudoti žemės sankasos sustiprinimo grunto pakeitimu, konsolidavimu arba poliais su geotinklais armuoto grunto platforma. Kelių normatyviniai techniniai dokumentai aiškiai neapibrėžia žemės sankasos sustiprinimo metodų panaudojimo ribų. Kai projektuojant automobilių kelius, žemės sankasoje yra sutinkami organiniai gruntai yra konsoliduoti (durpės ir (arba) sapropelis su išankstine apkrova) arba dalinai konsoliduoti (durpės ir (arba) sapropelis su daline išankstine apkrova) reiškia, kad staigieji nuosėdžiai ir nuosėdžiai dėl konsolidacijos, žemės sankasoje jau yra įvykę. Dėl to kyla diskusijos, kokią žemės sankasos sustiprinimo ar sutvirtinimo metodą naudoti ir kokią įtaką tai gali

turėti kelio dangos konstrukcijos funkcionalumui eksploatacijos metu. Tai aktualu tokiais atvejais, kai organinių gruntų sluoksniai yra sutinkami gilesniuose žemės sankasos sluoksniuose, o organinių gruntų sluoksniai yra nedidelio storio. Ypačingai kai durpės yra gerai susiskaidžiusios, o sapropelis yra standžiai plastiškas, kadangi organinių grunto sluoksnių irimo procesas yra pasibaigęs arba yra paskutiniėje irimo stadijoje. Dėl šių priežasčių, po kelio rekonstrukcijos veikiančios transporto apkrovos dėl padidėjusio transporto srauto ar pakeistos žemės sankasos geometrijos gali turėti įtaką tik lokalioms ir ilgalaikėms dangų konstrukcijos deformacijoms. Lietuvoje galiojantys normatyviniai techniniai dokumentai neapibrėžia didžiausio leistino automobilių kelių žemės sankasos nuosėdžio ar nuosėdžių skirtumo, kai kelio dangos konstrukcijos vienas iš pagrindinių rodiklių kuriuo remiantis vykdomi kelio dangos rekonstravimo projektai yra dangos nelygumas (IRI).

1.4.2. Geotinklų parinkimas silpnos žemės sankasos sutvirtinimui

Geotinklų parinkimas žemės sankasos laikomosios gebos užtikrinimui yra suskaidomas į dvi darbinės stadijas. Pirmoji stadija yra tada, kai geotinklas dirba tampriajame būvyje – geotinklo pailgėjimas yra ne didesnis kaip 1 %. Ši geotinklo darbinė stadija kitaip dar yra vadinama horizontaliuoju grunto dalelių suvaržymu. Antroji stadija yra tada, kai geotinklas dirba plastiškajame būvyje – geotinklo pailgėjimas yra didesnis už 1 %. Ši geotinklo darbinė stadija kitaip dar vadinama membranos teorija (1.16 pav.). Geotinklai dirbantys plastiškajame būvyje yra modeliuojami įvertinant konkrečią geotinklo pailgėjimo reikšmę. Tokios konstrukcijos modeliuojamos, kai geotinklai yra naudojami virš polių arba yra skaičiuojamas kelias be dangos, kuriam yra leidžiamos deformacijos t. y. tam tikras provėžos gylis. Visais kitais atvejais projektuojant geotinklą kelio ar geležinkelio konstrukcijai, žemės sankasos laikomosios gebos padidinimui yra vertinamas geotinklo tamprusis būvis – horizontalus grunto dalelių suvaržymas.

Horizontalaus grunto dalelių suvaržymo efektas yra tiesiogiai susijęs su įtempių perėmimu ir turi įtakos geotinklo stipriui tempiant (1.17 pav.). Geotinklai yra tamprūs gaminiai, tai reiškia, kad gaminyje pailgėja jį tempiant. Geotinklo didžiausio stiprio tempiant ir standumo esant mažiems pailgėjimams tarpusavio ryšys yra pirminis tinkamos naudoti medžiagos rodiklis. Galiausiai kiekvienos atskiros medžiagos įtempių-pailgėjimo elgsena lemia jos efektyvumą ir funkcionavimą kartu su gruntu. Tai yra esminis veiksnys, kodėl įvairios mokslinės institucijos nustatė geotinklų mažiausius leistinus didžiausio stiprio tempiant reikalavimus, juos kartu derinant su standumu esant mažiems pailgėjimams. Tokiu būdu iš vienos pusės yra užtikrinamas pakankamas stipris tempiant, o iš kitos pusės tinkama įtempių-pailgėjimo elgsena (Al-Qadi *et al.* 2011).



1.16 pav. Geotinklų darbinės stadijos

Fig. 1.16. Geogrid working phase



a)



b)

1.17 pav. Realus tamprios geotinklo darbinės stadijos pavyzdys (NAUE GmbH & Co. KG): a) grunto horizontalus suvaržymas; b) rodyklėmis pažymėti geotinklų sluoksniai

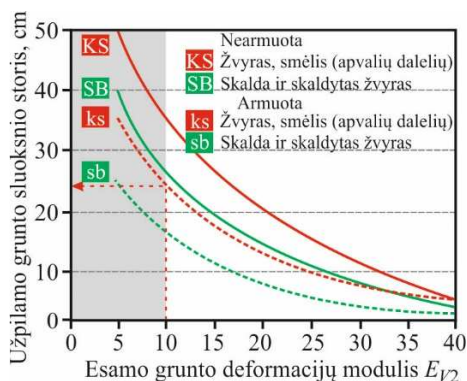
Fig. 1.17. Real example of elastic geogrid working stage (NAUE GmbH & Co. KG):

a) Soil lateral restraint; b) Geogrid layers are marked by arrows

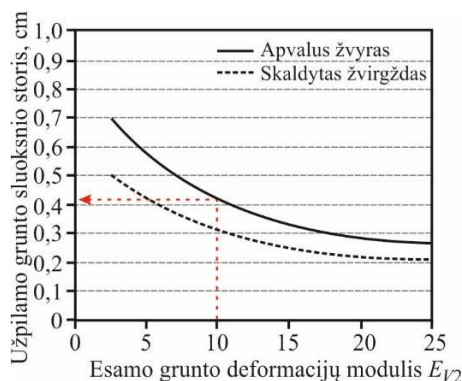
Automobilių ir geležinkelių kelių projektavimo ir (arba) statybos normatyviniuose techniniuose dokumentuose nurodyti mažiausi leidžiami reikalavimai geotinklų savybėms. Šie reikalavimai turi būti tenkinami naudojant geotinklus, kurie yra įrengiami po apsauginiu šalčiui atspariu sluoksniu. Vertinant šią panaudojimo sritį yra leidžiamos tik labai mažos deformacijos, kad nebūtų neigiamos įtakos automobilių kelio dangos nelygumui ar geležinkelio kelio konstrukcijos lygumui.

Grunto sutvirtinimas geotinklais turi būti naudojamas esant mažiems geotinklo pailgėjimams, kad jis užtikrintų horizontalų užpildo grunto dalelių suvaržymą taip padidindamas laikančiojo grunto sluoksnio laikomąją gebą (Lenart *et al.* 2018).

Horizontalaus suvaržymo efektu grindžiamo geotinklo parinkimas dažnu atveju yra apibrėžiamas nomogramomis, kurios yra gaunamos empiriniais metodais, skirtingiems grunto tipams. Nomogramos yra dviejų tipų. Bendrinės nomogramos, kurios yra taikomos bendrai visiems geotinklams. Geotinklų gamintojų nomogramos, kurios yra taikomos konkrečioms to gamintojo gaminims. Pastarosios yra gerokai mažiau konservatyvios, o tai dažnu atveju leidžia mažinti naudojamo grunto sluoksnio storį, ypač naudojant standžius geotinklus (žr. 1.18 ir 1.19 pav.).



1.18 pav. Gamintojo nomograma norint pasiekti $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$ su Secugrid geotinklais (NAUE GmbH & Co. KG)
Fig. 1.18. Design chart of the manufacturer to reach $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$ with Secugrid geogrids (NAUE GmbH & Co. KG)



1.19 pav. Bendrinė nomograma norint pasiekti $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$ su 400 kN/m standumo geotinklu (MN GEOSINT ŽD 13)
Fig. 1.19. General design chart to reach $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$ with geogrid stiffness of 400 kN/m (MN GEOSINT ŽD 13)

Bet kokių atveju didelę įtaką sluoksnio storio parinkimui turi naudojamo grunto tipas ir savybės. Dažniausiai naudojamas žvyras ar smėlio ir žvyro mišiniai (dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 0,063 mm, yra ne daugiau kaip 5 % masės, o dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 2 mm, yra ne daugiau kaip 60 % masės) (Vogt *et al.* 2010). Tačiau geotinklai veikia ir su smukios frakcijos smėliais (dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 0,063 mm, yra ne daugiau kaip 5 % masės, o dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 2 mm, yra ne mažiau kaip 60 % masės), tik ne taip efektyviai (Carlos *et al.* 2016). Vadovaujantis šia metodika, geotinklais sutvirtinto grunto sluoksnio storio parinkimui, būtina nurodyti geotinklų parametrus, kurie turi daugiausiai įtakos gautam rezultatui. Laikomosios gebos rezultatui labai svarbus yra užpylimo aukštis virš geotinklo, nes geotinklo

efektyvus poveikis grunto dalelių suvaržymui yra iki 0,5 m storio grunto sluoksniui (Minažek *et al.* 2014).

SINTEF (Stiftelsen for industriell og teknisk forskning) atliktais tyrimais Skandinavijos šalyse yra įrodyta, kad nepaisant šaltojo klimato geotinklai naudojami su užpildo gruntai atlieka savo funkciją (Watn *et al.* 2016).

1.4.3. Geotinklų panaudojimą žemės darbams keliuose reglamentuojančių dokumentų analizė

Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės *IT ASFALTAS 08*, po 2018 metų liepos 5 dienos pakeitimų nurodo, kad naujai paklotos dangos nelygumai, išmatuoti pagal IRI reikalavimus, darbų priėmimo metu neturintys viršyti nustatytų ribinių verčių:

- automagistralių ir greitkelių – sumažėjo nuo 1,5 m/km iki 1,0 m/km;
- kitų magistralinių kelių – sumažėjo nuo 2,0 m/km iki 1,5 m/km;
- krašto kelių – sumažėjo nuo 2,5 m/km iki 2,0 m/km;
- rajoninių kelių – sumažėjo nuo 3,5 m/km iki 3,0 m/km.

Kelio funkcionalumo, pagal sugriežtintus kelio dangos lygumo reikalavimus, pokyčiui įtaką turi kelio konstrukcijos ir atskirų jos sluoksnių stiprumas, o tam įtakos turi žemės sankasos stiprumas. Tinkamai įrengta žemės sankasa turi didelę įtaką automobilių kelio funkcionalumui. 2019 metais patvirtintose Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse *KPT SDK 19* nurodyta, kad naujų dangų konstrukcijų projektavimo atveju priimti sprendiniai turi užtikrinti kuriamos infrastruktūros ilgaamžiškumą bei tvarumą. Todėl žemės sankasai siektina ne mažesnė kaip 100 metų ekonomiškai pagrįsta naudojimo trukmė, kurios laikotarpiu žemės sankasa naudojama be jokios intervencijos (poreikio remontui) įskaitant ir geotinklais sutvirtintą žemės sankasą.

Lietuvoje yra naudojami keturi pagrindiniai normatyviniai techniniai dokumentai apibrėžiantys reikalavimus geosintetikai naudojami žemės darbams keliuose:

- *STR 2.05.21:2016 „Geotechninis projektavimas. Bendrieji reikalavimai“*;
- *LST EN 13249:2017 „Geotekstilė ir su geotekstile susiję gaminiai. Būtiniosios charakteristikos naudojant keliams tiesti ir kitoms eismo zonoms įrengti (išskyrus geležinkelius ir asfalto sluoksni)“*;
- *„Geosintetikos naudojimo žemės darbams keliuose metodiniai nurodymai MN GEOSINT ŽD 13“*;
- *„Geosintetikos, naudojamos žemės darbams keliuose, techninių reikalavimų aprašas TRA GEOSINT ŽD 13“*.

Nors visi šie norminiai techniniai dokumentai yra susiję, nes yra įtraukti į statybos techninio reglamento *STR 2.05.21:2016* nuorodas, tačiau išsamiausias

dokumentas apibrėžiantis geotinklų panaudojimą žemės sankasos sutvirtinimui yra *MN GEOSINT ŽD 13*.

MN GEOSINT ŽD 13 pateikta pilna geosintetinių medžiagų klasifikacija pagal funkcinę paskirtį su pritaikymo ir parinkimo galimybėmis. Geotinklas yra pateikti tipiniai panaudojimo atvejai, kai geotinklas naudojamas kaip žemės statinių armavimo priemonė, pateikti nurodymai medžiagoms parinkti ir darbams numatyti.

Esminis šio dokumento reikalavimas taikomas visais armavimo funkcijos panaudojimo atvejais yra geosintetikos gaminio (geotinklo) stiprio tempiant skaičiuotinės vertės nustatymas projektiniam tarnavimo laikotarpiui. Geosintetinio gaminio (geotinklo) stiprio tempiant skaičiuotinė vertė (F_d) apskaičiuojama atsižvelgiant į geosintetinio gaminio (geotinklo) stiprio tempiant charakteristinę vertę, kuri nustatoma trumpalaikio bandymo metu (F_k) pagal standartą *LST EN 10319 „Geosintetika. Tempimo, naudojant plačią juostą, bandymas“*, į geosintetikos gamintojo nurodomus dalinius saugos koeficientus (A_i) bei į grunto armavimo elementų laikomosios gebos dalinį saugos koeficientą (γ):

$$F_d = \frac{F_k}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma}, \quad (1.8)$$

čia A_1 – geosintetinio gaminio saugos koeficientas gaminio valkšnumui; A_2 – geosintetinio gaminio saugos koeficientas gaminio pažaidoms įrengiant; A_3 – geosintetinio gaminio saugos koeficientas gaminio sujungimams; A_4 – geosintetinio gaminio saugos koeficientas gaminio atsparumui atmosferos, cheminiam ir mikrobiologiniam poveikiui; A_5 – geosintetinio gaminio atsparumui dinaminiam apkrovų poveikiui; γ – dalinis grunto armavimo elementų laikomosios gebos saugos koeficientas.

Šio dokumento pirmame priede yra pateiktas ir geotinklo parinkimo pavyzdys, kai geotinklas naudojamas silpnos žemės sankasos laikomosios gebos padidinimui. Jame nurodytos mažiausios leistinos geotinklo savybių vertės, tarp kurių esminė savybė yra geotinklo standumas, kitaip išreiškiamas stiprio tempiant skaičiuotine verte esant 2 % pailgėjimui (1.2 lentelė).

Reikalavimuose nurodoma, kad mažiausias geotinklo standumas turi būti 400 kN/m arba kitaip tariant geotinklo stipris tempiant esant 2 % pailgėjimui turi būti ne mažiau kaip 8 kN/m, tačiau šis nurodymas yra grindžiamas provėžos susidarymu ir nurodoma, kad grunto armavimo priemonė yra tvirtai ištempta iš abiejų susidariusios provėžos pusių, o tai reiškia, kad šis geotinklo parinkimas grindžiamas konstrukcijos be dangos koncepcija. Nors vėliau yra nurodomas geotinklo užpylimo aukščio parinkimas naudojantis nomogramomis, norint pasiekti $E_{v2} = 45$ MPa, kur realūs geotinklo pailgėjimai yra itin maži (iki 1 %), tačiau reikalavimai geotinklui yra užduodami su kur kas didesnių deformacijų riba.

1.2 lentelė. Mažiausi geotinklui keliami reikalavimai pagal *MN GEOSINT ŽD 13*, kai gaminys naudojamas žemės sankasos laikomosios gebos padidinimui

Table 1.2. Minimum geogrid properties according to *MN GEOSINT ŽD 13* when product is used to increase the bearing capacity of the subgrade

Savybės	Armavimo funkcijai
Pagrindinė apkrova	abiejų ašių arba izotropinė (abiem kryptimis vienoda)
Trumpalaikis stipris tempiant išilgai/skersai	$F_{k,5\%} \geq 20 \text{ kN/m}$
Minimalus užtikrintas projektinis ilgalaikis stipris tempiant išilgai/skersai 100-tui metų ($F_d = F_{k,5\%} / A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times \gamma$, kur $\gamma = 1,3$)	$F_d \geq 8 \text{ kN/m}$
Minimalaus stiprio tempiant skaičiuotinė vertė, esant 2 % pailgėjimui išilgai/skersai	$F_{d2,0} \geq 8 \text{ kN/m}$
Būdingasis kiaurymės matmuo kai užpilo grunto frakcija ne didesnė kaip 0/32	$7,47 \text{ mm} \leq \text{akutės dydis} \leq 44,8 \text{ mm}$
Ilgamžiškumas	Eksplotacijos laikas yra ne trumpesnis nei 100 metų, natūraliuose gruntuose, kurių aplinkinė terpė $4 \leq \text{pH} \leq 9$ bei grunto temperatūra $<25 \text{ }^\circ\text{C}$

Kaip Lietuvoje, taip ir kitose šalyse naudojama normatyvinių techninių dokumentų bazė geosintetinėms medžiagoms parinkti, susiduria su tomis pačiomis problemomis. Europos šalyse plačiausiai naudojami techniniai normatyviniai dokumentai – *BS8006*, *EBGEO* ir *NF P 94270* (Horgan *et al.* 2014), turi tokį patį geologinės sandaros ir organinių gruntų sluoksnių esančių žemės sankasoje neapibrėžtumą.

Jungtinėse Amerikos Valstijose naudojami patvirtinti dangų konstrukcijų projektavimo nurodymai *AASHTO 1993* (angl. *American Association of State Highway and Transportation Officials*) kurie tiesiogiai įvertina geotinklo poveikį projektuojamai dangų konstrukcijai numatant projektinį apkrovų ciklą skaičių, reikiamą dangos lygumą ir esamos žemės sankasos tamprumo modulį. *AASHTO 1993* normatyvinis techninis dokumentas naudoja empirines formules kurios gautos pagal *AASHTO 1993* bandymus, atliktus keliuose iki 1960 metų. Šis metodas vertina konstrukciją kaip elastingą daugiasluoksnę sistemą turinčią suminį struktūrinį skaičių (angl. *Structural Number SN*), kuris atspindi bendrą dangų konstrukcijos storį ir jos atsparumą transporto apkrovų ciklams. Koeficientas *SN* labai stipriai priklauso nuo naudojamos geosintetinės medžiagos tipo ir struktūros bei sąlygų kuriomis atliekami bandymai. Dėl to kartais yra interpretuojamas neteisingai, nes šio metodo naudojimas turi tam tikrus apribojimus (Zornberg *et al.* 2010).

Tačiau atlikti moksliniai tyrimai rodo, kad ir šiuo metodu nustatomas geosintetinių medžiagų panaudojimas leidžia atlaikyti daugiau kaip du kartus didesnę apkrovų ciklų skaičių lyginant su nesutvirtinta konstrukcija esant tokioms pačioms sąlygoms (Kiptoo *et al.* 2016).

Daugelyje pasaulio šalių vienokia ar kitokia forma dažniausiai yra naudojamos empirinės metodikos atmainos, išreikštos geotinklais sutvirtinto grunto sluoksnio storio parinkimo nomogramų pavidalu arba formulėmis su atitinkamais koeficientais, kurios yra paremtos laboratoriniais ir lauko bandymais ir yra labai artimos realioms situacijoms (Chow 2014).

Pagrindinis dokumentų *MN GEOSINT ŽD 13* ir *AASHTO 1993* apribojimas yra tas, kad juose nėra apibrėžta geologinė sandara (gruntų sudėtis, organinių gruntų poveikis, neigiama gruntinio vandens įtaka) kuriai esant yra taikomas žemės sankasos sutvirtinimas. Ypač tokiais atvejais, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai. *MN GEOSINT ŽD 13* taip pat neįvardina kaip keistusi užpilamo sluoksnio storio reikalavimas ar geotinklo pakilojimo vieta naudojant didesnio standumo geotinklus.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Geotinklų įtaka grunto laikomosios gebos padidinimui gana gerai ištyrinėta, tačiau tai atlikta vertinant vieną silpno grunto sluoksnį. Mokslininkų darbuose naudojant automobilių transporto apkrovas netyrinėjamas iš kelių gruntų sluoksnių sudarytas silpnas pagrindas, kuriame būtų organinio grunto sluoksnis.
2. Daugelio mokslininkų darbuose akcentuojama didelė geotinklų įtaka grunto sluoksnio laikomosios gebos padidinimui ir dangos atsparumui provėžų susidarymui, tačiau nėra tiriama dangos nelygumas (IRI), kuris turi reikšmingos įtakos važiavimo kokybei.
3. Mokslininkų atlikti geotinklų savybių įtakos kelio konstrukcijos funkcionalumui eksperimentiniai tyrimai yra trumpalaikiai arba nėra tiriama visa automobilių kelio dangos konstrukcija. Neįvertintas geotinklų poveikis dangų konstrukcijos lygumui užtikrinti jos eksploatacijos metu.
4. Automobilių kelių tiesybos normatyviniuose techniniuose dokumentuose nurodyta, kad pagrindinė geotinklo funkcija yra žemės sankasos laikomosios gebos padidinimas viršutiniame žemės sankasos sluoksnyje, tačiau nėra apibrėžiama geotinklo įtaka dangos lygumui, įskaitant atvejus, kai žemės sankasoje yra organinių gruntų sluoksnis(-iai).
5. Geotinklo parinkimas automobilių kelių konstrukcijoms yra pagrįstas empiriniais skaičiavimo metodais, dažnai naudojant geotinklus, kurių

stipris tempiant yra ne didesnis nei 40 kN/m, tačiau nėra tyrinėjamas kur kas stipresnių geotinklų poveikis kelio funkcionavimui.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas ir siekiant įvertinti dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais poveikį automobilių kelio konstrukcijos degradacijai, būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti automobilių kelių dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos gruntų sutvirtinimui geotinklais panaudotus sprendinius, kelio konstrukcijos funkcionalumui užtikrinti, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai.
2. Nustatyti tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos paviršiaus nelygumą bei dangos konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulį atsižvelgiant į išmatuotą ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendrą sumą (ESA) per kelio naudojimo laikotarpį.
3. Nustatyti geotinklų įtaką automobilių kelių dangos nelygumui ir dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliams, esant skirtingiems dangos konstrukcijų ir žemės sankasos tipams.
4. Nustatyti geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai, tinkamumą naudoti kelio dangos degradacijos spartos atžvilgiu, palyginant su sprendimais apibrėžtais teisės aktuose.
5. Pateikti geotinklų poreikio nustatymo ir parinkimo schemą, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai.

Automobilių kelių dangų konstrukcijų eksperimentinių tyrimų metodika ir rezultatai

Šiame skyriuje analizuojamas eksperimentiniams tyrimams atrinktų automobilių kelių ruožų asfalto dangos nelygumo ir dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių kitimas esant skirtingiems žemės sankasos sustiprinimo būdams. Nustatyta geotinklų, kuriais sutvirtinta žemės sankasa, savybių įtaka kelio konstrukcijos funkcionalumui. Pateikta tyrimo metodika, objektas, naudotos medžiagos ir įranga. Pateikti tiriamųjų kelių ruožų projektinių ir išmatuotų apkrovų rezultatai, automobilių kelių ruožų asfalto dangos nelygumo ir dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai: Šiukščius *et al.* (2018) ir Šiukščius *et al.* (2019).

2.1. Teorinis geotinklų taikymas kelio dangų konstrukcijos ant silpnos žemės sankasos funkcionalumui užtikrinti

Projektuojamos standartinės automobilių kelių dangų konstrukcijos yra numatytos projektiniam jų eksploatacijos laikui. Jų sluoksnių storiai ir standumai yra numatyti taip, kad dangų konstrukcija išlaikytų savo eksploatacines savybes, kai žemės sankasos deformacijos modulis E_{v2} yra ne mažesnis kaip 45 MPa, o hidrauliniais rišikliais apdorotos žemės sankasos deformacijos modulis E_{v2} ne mažesnis kaip 70 MPa. Kai žemės sankasoje sutinkami silpni gruntai su organinių medžiagų priemaiša iki 20 % yra naudojami įprastai taikomi žemės sankasos sutvirtinimo metodai nurodyti dokumente *MN GEOSINT ŽD 13*. Kai žemės sankasoje sutinkami organinių gruntų sluoksniai, esantys giliau, nei numatoma kelio dangos konstrukcijos apačia, turi būti taikomos papildomos priemonės žemės sankasos stiprumui padidinti. Kelio dangos nelygumo didėjimas yra apribojamas didinant kelio dangos konstrukcijos stiprumą, sumažinant šlyties įtempius gruntų sluoksniuose.

Atliekant automobilių kelio rekonstravimo projektus, kelio konstrukcijos funkcionalumui virš organinių gruntų, esančių gilesniuose žemės sankasos sluoksniuose, užtikrinti turi būti taikomas vienas iš silpnos žemės sankasos sustiprinimui naudojamų metodų: silpno grunto iškasimas ir pakeitimas stipriu gruntu, grunto stabilizavimas hidrauliniais rišikliais, sutvirtinimas geotinklais, konsolidavimas arba polių įrengimas su geotinklais armuoto grunto platforma. Nagrinėjamas atvejis nėra priskiriamas prie žemės sankasos įrengimo pelkėse, kai turi būti taikomas silpno grunto iškasimas ir pakeitimas stipriu gruntu, konsolidavimas arba polių įrengimas su geotinklais armuoto grunto platforma. Tiriamųjų automobilių kelių ruožų žemės sankasoje $\geq 1,0$ m gylyje nuo žemės sankasos viršaus sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai. Sutiktos durpės pagal automobilių kelių inžinerinių geologinių ir geotechninių bei statinio tyrimų rekomendacijas *R IGGT 15* priskiriamos organinių gruntų kategorijai, kurios pagal susiskaidymo laipsnį *R* priklauso nuo vidutiniškai iki labai susiskaidžiusių, o sapropelio rūšis priskiriama mineraliniam sapropeliui. Šie organinių gruntų sluoksniai jau yra konsoliduoti arba dalinai konsoliduoti ir dėl to staigieji ir konsolidacijos žemės sankasos nuosėdžiai jau yra įvykę. Tokiu atveju turi būti naudojamas žemės sankasos viršutinio sluoksnio stabilizavimas hidrauliniais rišikliais arba sutvirtinimas geotinklais. Dėl žemės sankasoje esančių organinių gruntų sluoksnių, žemės sankasos stabilizavimas hidrauliniais rišikliais yra ribotas arba negalimas. Tokiu atveju vienintelis tinkamas žemės sankasos viršutinio sluoksnio sutvirtinimo metodas yra panaudojant geotinklus.

Remiantis šiuo principu, tokio tipo problemoms spręsti Lietuvos ir pasaulinėje praktikoje geotinklai jau yra naudojami daugiau nei 10 metų.

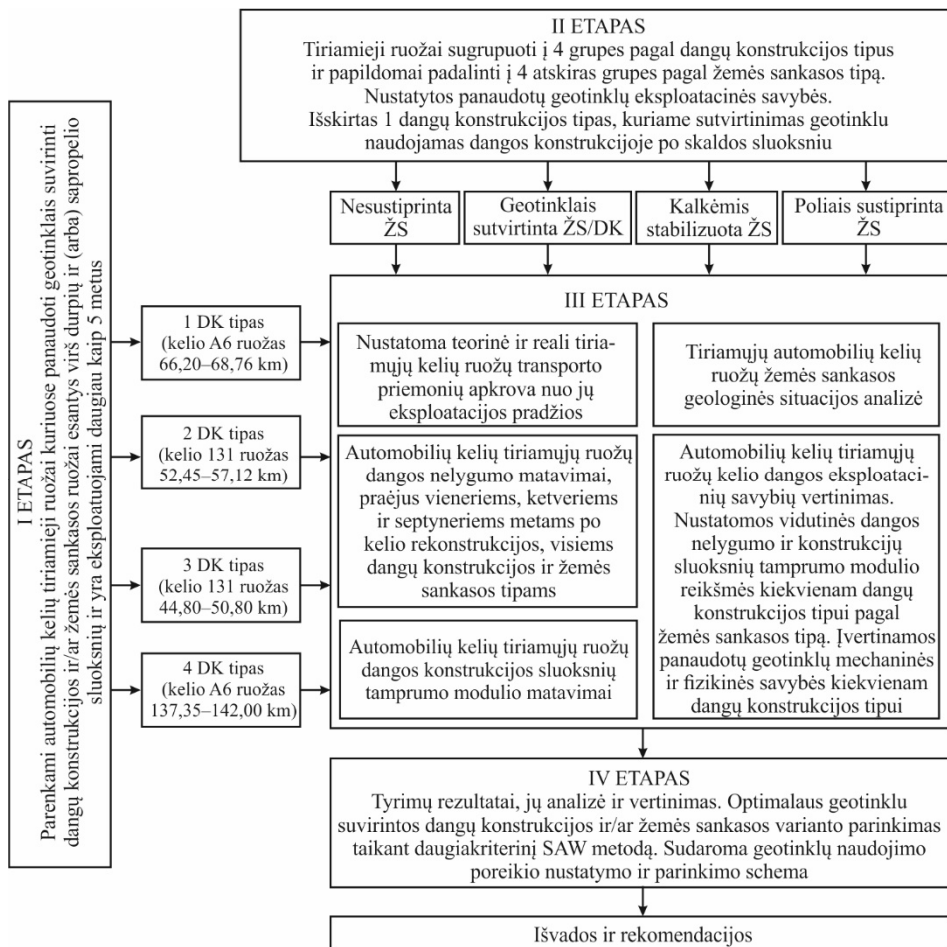
Atsižvelgiant į pirmame skyriuje atliktą literatūros analizę ir šiame skyriuje išdėstytas nuostatas, būtina nustatyti geotinklais sutvirtinto grunto įtaką automobilių kelio konstrukcijos degradacijos spartai, kai 1,0 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai.

2.2. Eksperimentinio tyrimo planas

Siekiant nustatyti geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos įtaką automobilių kelio konstrukcijos funkcionalumui, kurioje 1,0 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai, yra atlikti eksperimentiniai tyrimai nustatant įrengtos kelio dangos nelygumą bei dangų konstrukcijų sluoksnių tamprumo modulį. Nustatant geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožų, kurioje 1,0 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai, panaudojimo tinkamumą, atliktas kelio dangos nelygumo ir dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio palyginimas. Lyginama su nesustiprintos (etaloniniai bandymai) bei hidrauliniais rišikliais stabilizuotos žemės sankasos ruožais, kuriuose nėra organinių gruntų ar gruntų su organikos priemaiša bei grunto poliais sustiprintos žemės sankasos ruožais, kuriuose organinių gruntų sluoksnių storis yra didesnis už 3,0 m.

Eksperimentinio tyrimo tikslas – sudaryti geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą nustačius dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais poveikį automobilių kelio konstrukcijos degradacijai. Eksperimento atlikimui išskiriami keturi tyrimo etapai, kurio atlikimo schema pateikta 2.1 paveiksle. Eksperimentinio tyrimo metu buvo vykdomi šie tyrimai ir matavimai:

- tiriamųjų automobilių kelių ruožų transporto eismo intensyvumo matavimai ir ESA skaičiavimai.
- tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos nelygumo matavimai naudojant mobilią kelių tyrimo laboratoriją RST-28.
- tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulį matavimai naudojant krintančio svorio deflektometrą „Dynatest 8000 FWD“.



2.1 pav. Eksperimentinio tyrimo vykdymo schema

Fig. 2.1. Scheme of the experimental research

Automobilių kelių dangų konstrukciją jos projektiniu laikotarpiu veikia daug neigiamų veiksnių, todėl atliekant eksperimentinius tyrimus yra priimtos šios prielaidos:

- tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos lygumui, pagal dangų konstrukcijos tipus, neigiamą įtaką turintys veiksniai (tokie kaip: klimatinės oro sąlygos, dangų konstrukcijos sluoksnių ir jų medžiagų savybės, veikiančių apkrovų dinamika, kelio įrengimo darbų kokybė ir kelio drenažo funkcionavimas) yra vienodi;

- kelio dangų konstrukcijos viršutinės dalies deformatyvumo reikalavimams užtikrinti žemės sankasos deformatyvumas yra natūraliai pakankamas arba yra panaudotos žemės sankasos sutvirtinimo ir (arba) sustiprinimo priemonės;
- dėl organinių gruntų dūlėjimo ir (arba) smulkiųjų gruntų valkšnumo, gruntinio vandens lygio svyravimų organinių gruntų sluoksniuose bei transporto apkrovų parametrų pokyčių ir dinaminio poveikio įtakos smulkiųjų gruntų savybių kitimui atsiradęs žemės sankasos ilgalaikis nuosėdis, neturi reikšmingos įtakos kelio dangos konstrukcijos ilgalaikėms deformacijoms;
- atlikus transporto apkrovų (pagal *KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“*) poveikio į žemės sankasą skaičiavimus, naudojant programinį paketą *GEO5 Settlement*, yra vertinama, kad visais tiriamaisiais atvejais apkrovų įtakos zona nuo dangos paviršiaus yra bent iki 6,0 m gylio.

Geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema yra grindžiama automobilių kelio dangos degradacijos sparta lyginat ją su etaloniniais bandymais. Schema užtikrina kelio konstrukcijos funkcionalumą, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai.

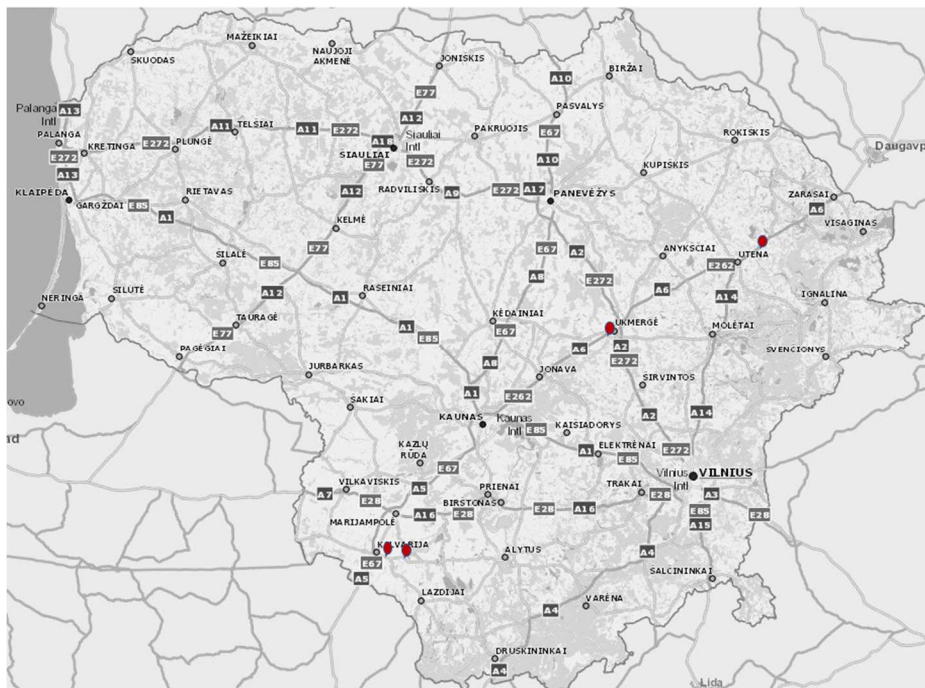
2.3. Eksperimentinio tyrimo metodika

2.3.1. Kelių dangų konstrukcijos tiriamųjų ruožų nustatymas

Automobilių kelių dangų konstrukcijų funkcionalumui vertinti buvo pasirinkti du skirtingos reikšmės ir kategorijos keliai (Šiuokščius *et al.* 2018). Atlikus Vilniaus, Utenos, Alytaus ir Marijampolės regiono kelių priežiūros tarnybų archyvinės medžiagos analizę, tyrimams buvo atrinkti du keliai. Pirmasis tiriamas kelias yra valstybinės reikšmės magistralinis kelias Nr. A6 Kaunas–Zarasai–Daugpilis (toliau – kelias A6), kuriame buvo nustatyti šie tiriamieji kelio ruožai: 66,20–68,76 km ir 137,35–142,00 km. Antrasis tiriamas kelias yra valstybinės reikšmės krašto kelias Nr. 131 Alytus–Simnas–Kalvarija (toliau – kelias 131), kuriame buvo nustatyti šie tiriamieji kelio ruožai: 44,80–50,80 km ir 52,45–57,12 km (2.2 pav.). Šių kelių ruožų pasirinkimas grindžiamas archyvine medžiaga. Joje pateiktos suprojektuotos ir pastatytos kelio dangų konstrukcijos turinčios geotinklais sutvirtintą dangų konstrukciją ir (arba) žemės sankasą skirtingų kategorijų keliuose, kai šis sprendinys yra panaudotas virš organinių gruntų. Projektuose geotinklai panaudoti siekiant užtikrinti kelio dangų konstrukcijos eksploatacines savybes, o laikomosios gebos padidinimas yra antrinės svarbos. Organinių gruntų sluoksniai sutinkami žemės sankasoje yra iki 3,0 m storio.

Šių ruožų rekonstravimo projektai yra įrengti daugiau nei prieš 8 metus.

Iš viso tiriamuosiuose kelio ruožuose yra nustatyta 11 vietų kuriose yra naudojamas tiriamasis sprendinys.



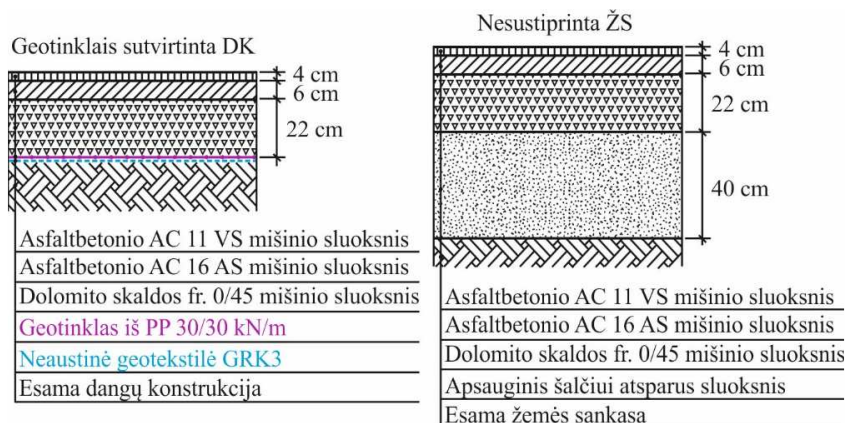
2.2 pav. Eksperimentiniam tyrimui pasirinkti tiriamųjų kelių ruožai

Fig. 2.2. Road sections selected for experimental research

2.3.2. Tiriamųjų kelių dangų konstrukcijų ir geotinklų tipai

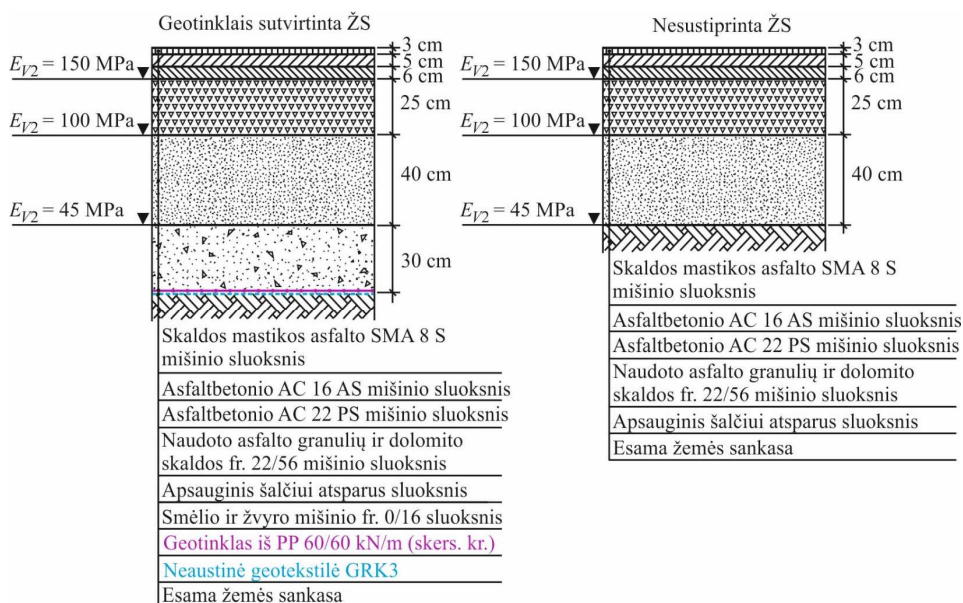
Išanalizavus tiriamųjų automobilių kelių ruožų statybos dokumentaciją, dangų konstrukcijos sugrupuotos į 4 grupes pagal dangų konstrukcijos tipą ir jų žemės sankasos sutvirtinimui naudojamų geotinklų didžiausią stiprį tempiant:

1. Pirmasis ir silpniausias dangų konstrukcijos tipas yra kelio A6 ruožo 67,26–67,45 km, kuriame tiesiai po dolomito skaldos mišinio fr. 0/45 sluoksniu yra įrengtas 30/30 kN/m stiprio tempiant geotinklas iš polipropileno (PP) ir GRK3 stiprumo klasės neaustinė geotekstilė (2.3 pav.).
2. Antrasis tipas yra kelio 131 ruožuose 53,91–54,09 km, 55,00–55,09 km ir 56,74–56,94 km, kuriuose skersine keliui kryptimi yra įrengtas 60/60 kN/m stiprio tempiant geotinklas iš polipropileno (PP) ir GRK3 stiprumo klasės neaustinė geotekstilė (nukasus 30 cm storio esamą gruntą ir ant geotinklo įrengiant smėlio ir žvyro mišinio fr. 0/16 sluoksnį (2.4 pav.)).



2.3 pav. Pirmasis tiriamasis dangų konstrukcijos tipas

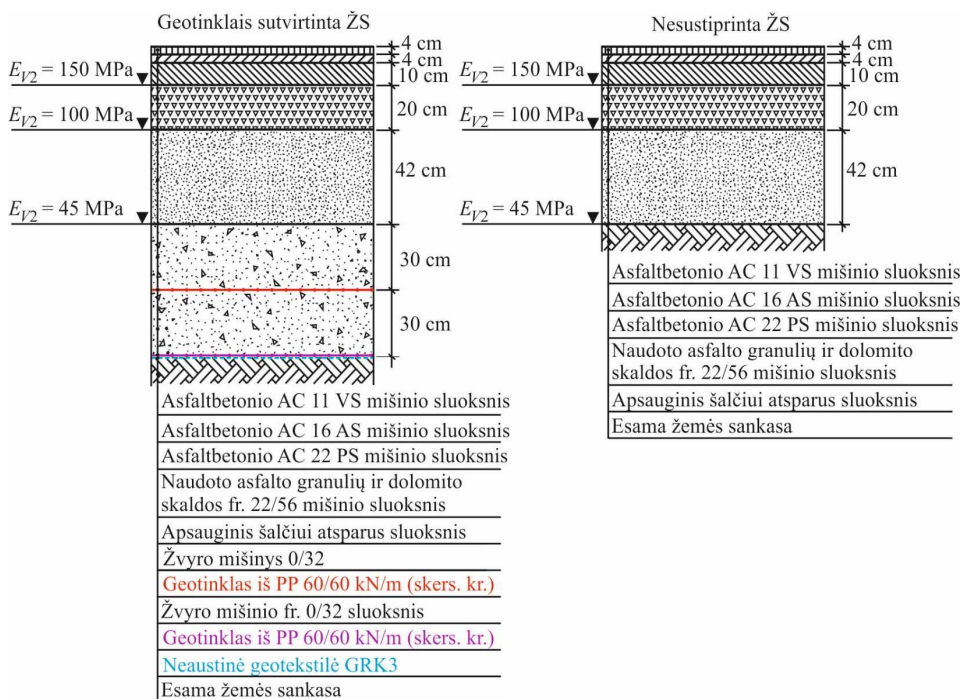
Fig. 2.3. The first type of tested road structure



2.4 pav. Antrasis tiriamasis dangų konstrukcijos tipas

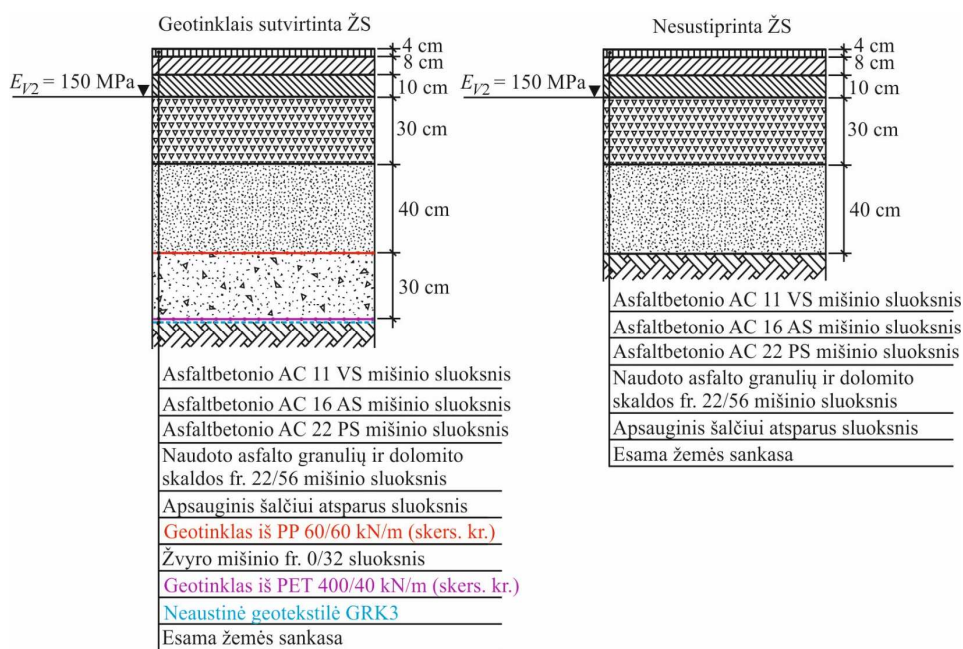
Fig. 2.4. The second type of tested road structure

3. Trečiasis tipas yra kelio 131 ruožuose 45,300–45,380 km, 45,965–46,140 km, 46,45–46,72 km, 46,865–46,950 km, 47,320–47,425 km ir 49,220–49,295 km, kuriuose skersine keliui kryptimi yra įrengti du sluoksniai 60/60 kN/m stiprio tempiant geotinklo iš polipropileno (PP) ir GRK3 stiprumo klasės neaustinė geotekstilė (nukasus 60 cm storio esamą gruntą ir ant geotinklų įrengiant po 30 cm smėlio ir žvyro mišinio fr. 0/32 sluoksnį (2.5 pav.)).
4. Ketvirtasis ir stipriausias dangų konstrukcijos tipas yra kelio A6 ruože 141,047–141,123 km, kuriame skersine keliui kryptimi yra įrengtas 400/40 kN/m stiprio tempiant geotinklas iš poliesterio (PET) ir GRK3 stiprumo klasės neaustinė geotekstilė (nukasus 30 cm storio esamą gruntą ir ant geotinklo įrengiant smėlio ir žvyro mišinio fr. 0/32 sluoksnį) ir po projektine dangų konstrukcija, išilgine keliui kryptimi yra įrengtas 200/40 kN/m stiprio tempiant geotinklas iš poliesterio (PET) (2.6 pav.).



2.5 pav. Trečiasis tiriamasis dangų konstrukcijos tipas

Fig. 2.5. The third type of tested road structure



2.6 pav. Ketvirtasis tiriamasis dangų konstrukcijos tipas

Fig. 2.6. The fourth type of tested road structure

Geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ir ne-sutvirtintos žemės sankasos ruožuose esančios dangų konstrukcijų detalės pagal dangų konstrukcijos tipus kiekviename tiriamajame ruože pateiktos 2.3–2.6 paveiksluose. Kiekvienoje dangos konstrukcijoje, tarp žemės sankasos viršaus ir silpno (organinio grunto) sluoksnio, yra grunto sluoksnis, kuris priskiriamas nuo labai jautraus šalčiui iki nejautraus šalčiui, arba nuo naudotino iki labai gerai tinkamo žemės sankasos įrengimui (pagal standarto *LST 1331:2015 „Gruntai, skirti keliams ir jų statiniams. Klasifikacija“* reikalavimus). Tokia pačia tvarka dangų detalės kalkėmis stabilizuotai (2, 3 ir 4 tiriamųjų dangų konstrukcijų tipų) ir poliais sustiprinai (3 ir 4 tiriamųjų dangų konstrukcijų tipų) žemės sankasai pateiktos B priede.

Visose žemės sankasos konstrukcijose su geotinklais yra panaudotos neaustinės geotekstilės, kurios atitinka geotekstilei keliamus stiprumo reikalavimus pagal GRK klasifikaciją. Geotekstilės atitinka GRK3 atsparumo klasę, kuri nurodo, kad neaustinės geotekstilės savasis svoris turi būti $\geq 150 \text{ g/m}^2$ ir atsparumas statiniam pradūrimui turi būti $\geq 1,5 \text{ kN}$. Geotekstilės panaudojimo funkcinė paskirtis yra atskirti žemiau geotinklo esančius silpnus žemės sankasos gruntų sluoksnius nuo ant geotinklų supilamo grunto mišinio. Šis gruntų atskyrimo sluoksnis leidžia

užtikrinti tinkamas drenavimo sąlygas išlaikant pastovias ant geotinklo supilto grunto mišinio fizikines ir mechanines savybes.

Tiriamosiose kelio konstrukcijose panaudotų geotinklų fizikinės ir mechaninės savybės pateikiamos 2.1 lentelėje. Eksperimentiniam tyrimui atrinktuose kelių ruožuose panaudoti standūs virintiniai geotinklai, kadangi tiriamosios žemės sankasos ruožų įrengimo metu, kito tipo geotinklai Lietuvoje nebuvo naudojami.

2.1 lentelė. Gamintojų deklaruojamos savybės geotinklams tiriamuosiuose ruožuose
Table 2.1. Declared geogrid performances of the geogrid manufacturer for tested sections

Deklaruojamos savybės	Bandymo metodas	Mato vnt.	Vertės			
			Geotinklas 30/30 kN/m	Geotinklas 60/60 kN/m	Geotinklas 200/40 kN/m	Geotinklas 400/40 kN/m
1	2	3	4	5	6	7
Gaminio žaliava	–	–	Polipropilenas (PP), baltas	Polipropilenas (PP), baltas	Poliesteris (PET), skaidrus	Poliesteris (PET), skaidrus
Svoris ploto vienetui	<i>LST EN ISO 9864</i>	g/m ²	200	360	810	1420
Didžiausias stipris tempiant md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	≥30 / ≥30	≥60 / ≥60	≥200 / ≥40	≥400 / ≥40
Pailgėjimas esant nominaliai apkrovai md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	%	≤8 / ≤8	≤8 / ≤8	≤8 / ≤8	≤8 / ≤8
Stipris tempiant esant 1 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	6 / 6	12 / 12	40 / –	80 / –
Stipris tempiant esant 2 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	12 / 12	22 / 22	70 / –	140 / –

2.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7
Stipris tempiant esant 5 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	24 / 24	48 / 48	140 / –	280 / –
Akutės dydis, md × cmd ¹⁾	–	mm×mm	32×32	31×31	71×25	70×14
Atsparumas UV spinduliams	<i>LST EN 12224</i>	%	95,0	95,0	96,3	96,3
Atsparumas atmosferos poveikiui	FGSV	klasė	aukšta	aukšta	aukšta	aukšta
Produkto specifikinis pailgėjimas	–	%	0	0	0	0

Pastabos: ¹⁾ md – išilgine kryptimi, cmd – skersine kryptimi.

Eksperimentinio tyrimo metu panaudoti geotinklai yra labai skirtingo stiprio tempiant (nuo 30 kN/m iki 400 kN/m) ir yra pagaminti iš skirtingo tipo polimerų (polipropileno ir poliesterio). Atsižvelgiant į dokumento *MN GEO-SINT ŽD 13* reikalavimus, pirmojoje tiriamojoje dangų konstrukcijoje naudojamas geotinklas neatitinka mažiausių jam keliamų reikalavimų pagal ilgalaikio projekcinio stiprio tempiant 100-ui metų ir skaičiuotinę stiprio tempiant esant 2 % pailgėjimui reikšmes, nes projekto vykdymo metu šie reikalavimai dar nebuvo įsigalioję.

2.3.3. Tiriamųjų kelių dangų konstrukcijų parametrų nustatymas

Kelio dangos nelygumui išmatuoti tiriamuosiuose ruožuose naudota mobili daugiakomponentė kelio dangos paviršiaus kokybinių rodiklių matavimo įranga „RST-28“. Matavimo rangą sudaro 18 lazerinių jutiklių, 2 akselerometrai, 2 girokopai ir 2 inklinometrai, kurie sumontuoti priekinėje matavimų sijoje (lazerių rėmas). Matavimo tikslumas yra 0,2 %, o skiriama gėba – 0,1 mm. Automobilio kabinoje esančioje spintoje įmontuota sistemos jutiklių signalų apdorojimo ir pagrindinis kompiuteriai bei kiti įrenginiai. Visa sistema valdoma iš operatoriaus darbo vietoje esančių sistemos paleidimo jungiklių, klaviatūros ir monitoriaus. Kabinos galinėje dalyje (kuria nuo priekinės skiria įrenginių spinta) talpinamas oro kompresorius ir generatorius, kuris įmontuotas specialioje dėžėje. Duomenys užfiksuoti matavimo sija yra perkelti į kietąjį diską, kurį prijungus prie

defektų analizavimo kompiuterio gauti tyrimui reikalingi išeities duomenys. Kelio dangos išilginis nelygumas nustatomas vadovaujantis rekomendacijomis nurodytomis Pasaulinio banko techniniuose dokumentuose pateikiant nelygumo indeksą IRI (m/km).

Kelio dangos paviršiaus nelygumas (IRI) buvo išmatuotas po kairiu ir po dešiniu automobilio ratais. Nelygumo matavimai buvo nustatyti kas 20 m abiem kryptimis, kiekvienoje kelio juostoje. Iš viso kiekvienais matavimo metais buvo išmatuota po 3446 taškų ir duomenų analizei buvo surinkta 10338 vienetų matavimo duomenų. Šie duomenys buvo suskirstyti pagal tiriamuosius dangų konstrukcijos tipus ir kiekvienas jų suskirstytas pagal žemės sankasos tipą.

Tiriamųjų kelio ruožų dangos nelygumo matavimai buvo atliekami etapais. Pirmasis matavimų etapas yra atliktas praėjus metams po rekonstruojamo ruožo statybų pabaigos. Antrasis matavimų etapas – praėjus keturiems metams. Trečiasis etapas – praėjus septyneriems metams. Kelio dangų nelygumo reikšmių rezultatai gauti apskaičiuojant vidutinės IRI reikšmės tiriamajam ruožui. Papildomai nustatomos didžiausios ir mažiausios reikšmės, standartinė nuokrypa ir imties plotis.

Tiesiogiai nustatyti geotinklų deformacijas tiriamuosiuose ruožuose buvo neįmanoma, nes tiriamųjų ruožų rangos metu nebuvo įrengti poslinkių davikliai. Atsižvelgiant į tai, buvo pasirinktas dangų paviršiaus įlinkių matavimo metodas, kaip kontrolinis tyrimas šalia dangos nelygumo nustatymo.

Dangų konstrukcijų matavimai krentančio svorio deflektometru naudojami santykiniam dangų sluoksnių būklės palyginimui pagal išmatuotus įlinkius ir (arba) pagal nuosėdžių dubens formą dangos paviršiuje. Šį palyginimą galima naudoti tyrimo tikslams, tačiau kelių inžinerijoje pagrindinis tikslas yra įtempių dangos sluoksniuose nustatymas, o tai yra esminis dangų būklės vertinimo kriterijus. Krentančio svorio deflektometras daugiausiai yra naudojimas kelių dangų konstrukcijos sluoksnių struktūrinio atsparumo nustatymui. Išmatuoti įlinkiai ir (arba) nuosėdžių dubens forma yra apdorojami programiniu paketu ELMOD, kuris pagal šiuos duomenis apskaičiuoja iki penkių dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulius E . ELMOD programa negali nustatyti ekvivalentinių tamprumo modulių kiekvieno dangų konstrukcijos sluoksnio viršuje, kuriuos reglamentuoja kelių techninis reglamentas *KTR 1.01:2008* (Šiaudinis 2006). Kelio dangų konstrukcijos būklei nustatyti ir įvertinti vien tik įlinkių matavimo duomenų nepakanka, todėl šių matavimų duomenys turi būti vertinami kartu su dangos nelygumo matavimais. Dėl prastų koreliacijos rezultatų tarp krentančio svorio deflektometro ir statinės sijos (Bertulienė *et al.* 2010), nėra atliekamas tamprumo modulių perskaičiavimas į deformacijų modulių reikšmes E_{V2} .

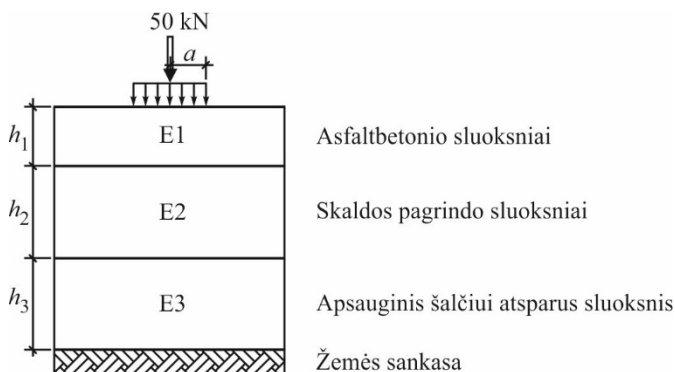
Kelio dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio matavimui naudotas krentančio svorio deflektometras Dynatest 8000 FWD (toliau – FWD). Matuojant kelio dangų konstrukcijos įlinkius dinaminio prietaisu, apkrova sukelia masyvaus cilindro smūgiu, kuris per labai trumpą laiko dalį, iššaukia konstrukcijos sluoksnio poslinkį. Prietaisas veikia kelio dangą 50 kN apkrova, kurios trukmė 25–30 ms. Sukeliama vieno smūgio apkrova sukuria pusės sinusoidės formos apkrovą dangoje, kuri suformuoja judančios transporto priemonės apkrovą. Apkrovą fiksuoja centre įmontuotas dinamometro daviklis, prijungtas prie šarnyriškai pritvirtintos apkrovos plokštės. Sukuriamos apkrovos deformacijoms dangoje matuoti naudojami devyni įlinkių davikliai (geofonai). Matavimo prietaiso duomenų fiksavimo sistema (procesorius) sudaryta iš mikroprocesoriaus kontrolės ir signalų apdorojimo įrenginio. Jis turi sistemos būklės stebėsenos sistemą, kuri leidžia užtikrinti matavimų tikslumą. Įlinkiai matuojami absoliučiu 2 % ($\pm 2 \mu\text{m}$) ir standartiniu santykiniu 1 % $\pm 1 \mu\text{m}$ tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba įlinkių matavimams yra 1 μm . Apkrova matuojama ne mažesniu nei 2 % ($\pm 0,3 \text{ kN}$) tikslumu. Įrenginio skiriamoji geba apkrovai yra 0,03–0,2 kN. Pagal tyrimų metu išmatuotus kelio dangos įlinkius ir žinomus dangų konstrukcijų sluoksnių storius ELMOD programiniu paketu yra apskaičiuojami kelio dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliai.

Atliekant FWD tyrimus yra išmatuojami dangos įlinkiai, kurių reikšmės redukuojamos standartinei apkrovai (50 kN) ir standartinei (+20 °C) temperatūrai. Tyrimų metu asfalto dangos paviršiaus temperatūra svyravo nuo +13 °C iki +22 °C. Gauti įlinkių matavimo rezultatai plokštės centre, įvertinus temperatūros pataisas koeficientus gaunant redukuotą įlinkio reikšmę yra naudojami kelio dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo moduliui E_0 apskaičiuoti.

Kelio dangos paviršiaus tamprumo modulis E_0 apkrovos plokštės centre parodo visos dangos tamprumo modulį, kuris vertinamas kaip vienas sluoksnis (ekvivalentinis gylis = 0 mm) ir yra apskaičiuojamas pagal formulę (taikant 2.7 pav. parodytą schemą):

$$E_0 = \left[\frac{f(1-v^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_r} \right], \quad (2.1)$$

čia E_0 – dangos tamprumo modulis apkrovos plokštės centre; f – įtempimų pasiskirstymo koeficientas ($f = 2$ – tolygus (skelta apkrovos plokštė), $f = \pi/2$ – standi plokštė, $f = 8/3$ – birūs gruntai, standi plokštė, $f = 4/3$ – rišlūs gruntai, standi plokštė); v – Puasono koeficientas; σ_0 – kontaktinis slėgis po apkrovos plokštės; a – apkrovos plokštės spindulys; r – atstumas nuo jutiklio iki apkrovos centro; d_r – įlinkis atstumu r .



2.7 pav. Dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių schema

Fig. 2.7. Elasticity modulus scheme of road structure layers

Matavimai atlikti 2018 metų balandžio mėnesio pradžioje, kai tik buvo gauta informacija iš meteorologinių stočių, kad įšalas iš grunto jau yra pasitraukęs. Matavimai buvo atliekami, kai sausas oras vyrauja ne daugiau kaip 1 savaitę. Matavimai buvo daromi atsitiktinai parinktuose trijuose taškuose geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožuose. Papildomi matavimai buvo atliekami gretimų ruožų trijuose atsitiktiniuose taškuose, ne arčiau kaip 15 m iki ruožo pradžios ar pabaigos. Matavimo taškai yra eismo juostos rato pėdsake prie dešiniojo kelkraščio. Asfaltbetonio sluoksnio temperatūra buvo fiksuojama matavimo pradžioje. Iš viso buvo išmatuoti 189 taškai. Šie duomenys buvo suskirstyti pagal tiriamuosius dangų konstrukcijos tipus ir kiekvienas jų suskirstytas pagal žemės sankasos tipą. Kelio dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio reikšmių rezultatai gauti apskaičiuojant vidutinės tamprumo modulio reikšmes tiriamajam ruožui. Papildomai nustatomos didžiausios ir mažiausios reikšmės, standartinė nuokrypa ir imties plotis.

Vienas pagrindinių kriterijų, leidžiančių apibūdinti transporto priemonių poveikį kelio dangai yra ekvivalentinis standartinių ašių apkrovų skaičius (ESA), kuris priklauso nuo keliu važiuojančių transporto priemonių svorio. Eksperimentinio tyrimo metu, naudojantis Transporto Kompetencijų Agentūros (TKA), keliuose A6 ir Nr. 131, įrengtų transporto srauto matavimo ir transporto priemonių svėrimo postų duomenimis, nustatytas metinis ESA, išmatuotas realus ESA kelio dangų konstrukcijų eksploatavimo metu ir apskaičiuotas projektinis ESA 20 metų laikotarpiui nuo tiriamojo ruožo eksploatacijos pradžios. Projektinės apkrovos nustatymui naudotas tuo metu kelio dangų konstrukcijų projektavimui taikytas normatyvinis techninis dokumentas „Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 07“ (toliau – KPT SDK 07). Pagal KPT SDK 07 pirmojo privalomo priedo reikalavimus apskaičiuota projektinė apkrova A taikant vidutinio sunkiojo transporto eismo intensyvumo per parą rodiklį

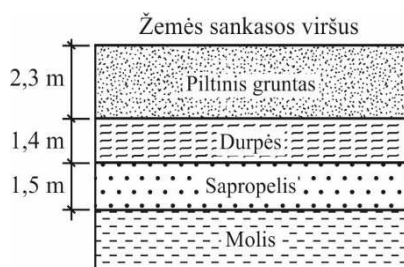
VPI^(SV), nustatytą arčiausiai tiriamųjų ruožų esančio transporto srauto matavimo posto. Tiriamųjų kelių ruožų projektinės apkrovos nustatymo skaičiavimai pateikti C priede.

2.4. Tiriamųjų kelių ruožų žemės sankasos geologinės sandaros analizė

Tiriamųjų kelių ruožų žemės sankasos geologinė sandara buvo vertinama pagal archyvinę informaciją pateiktą kiekvieno tiriamojo ruožo techniniame projekte, nes buvo neįmanoma atlikti kontrolinių inžinerinių geologinių tyrinėjimų dėl jų ardomojo poveikio kelio dangų konstrukcijai ir geotinklams. Kiekvieno tiriamojo ruožo geologinės sandaros aprašymas priklauso nuo archyvinės medžiagos detalumo ir joje pateiktos informacijos. Šiame skyriuje pateikti geologinės sandaros aprašymai geotinklais sutvirtintiems ruožams kurių žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinių gruntų sluoksniai. Taip pat pagrindinė gretimų ruožų informacija.

2.4.1. Kelio A6 ruožas pirmajam dangų konstrukcijos tipui

Analizuojant kelio A6 ruožo 66,20–68,76 km rekonstravimo projekto statybos dokumentaciją nustatyta, kad ruože nuo 67,26 km iki 67,45 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,9–1,4 m storio durpių, sutankėjusių iki 30 %. Durpės slūgso 2,3–3,4 m gylyje. Po durpių sluoksniu 2,3–4,8 m gylyje sutiktas sapropelis, kurio sluoksnio storis yra 0,7–1,5 m (2.8 pav). Apie gruntinio vandens lygį informacijos nėra. Detali inžinerinių geologinių tyrinėjimų ataskaita projekte nepateikta, todėl nėra tikslios informacijos apie durpių ir sapropelio savybes ir nėra galimybės įvertinti šių sluoksnių laikomosios gebos lygį. Tiriamajame ruože piltinis gruntas naudotas kaip apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis be rišiklių, todėl vertinama, kad jis yra nejautraus šalčiui.



2.8 pav. Tiriamojo ruožo 67,26–67,45 km geologinės sandaros schema

Fig. 2.8. Geological structure scheme of tested road structure section 67.26–67.45 km

2006 metų lapkričio 16 dienos kontrolinių matavimų statinio šampo bandymu, ant žemės sankasos viršaus ties 67,26 km buvo išmatuotas $E_{V2} = 33,39$ MPa, ties 67,32 km – $E_{V2} = 107,29$ MPa ir ties 67,45 km – $E_{V2} = 116,22$ MPa.

Apie gretimų ruožų žemės sankasos geologinę sandarą informacijos taip pat nėra. Gretimų ruožų žemės sankasa nebuvo papildomai sustiprinta, todėl daroma prielaida, kad ji tenkina žemės sankasai keliamus reikalavimus. Ruože kur yra naudojamas 40 cm apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis (A priedas, A.2 pav.) ir žemės sankasos laikomosios gebos reikalavimas yra $E_{V2} = 45$ MPa, 2006 metų gruodžio 7 dienos kontrolinių matavimų statinio šampo bandymu, ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas E_{V2} kuris kito nuo 49,83 iki 74,23 MPa.

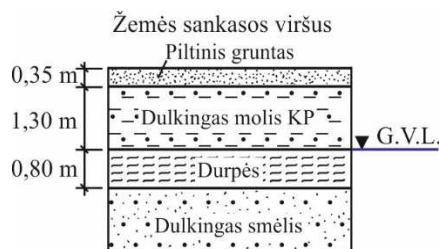
2.4.2. Kelio 131 ruožas antrajam dangų konstrukcijos tipui

Analizuojant kelio 131 ruožo 52,45–57,12 km rekonstravimo projekto statybos dokumentaciją nustatyta, kad ruože 53,91–54,09 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,8 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniui prisotintų durpių sluoksnio, durpės slūgso 1,65 m gylyje. Virš durpių yra supiltas dulkingas molis. Po durpių sluoksniu yra vandeniui prisotintas natūralus dulkingas smėlis. Gruntinio vandens lygis yra 1,65 m gylyje (2.9 pav). Projekto geologinių tyrinėjimų ataskaitoje nepateiktos gruntų fizikinės ir mechaninės savybės, todėl nėra tikslios informacijos apie durpių ir sapropelio savybes ir nėra galimybės įvertinti šių sluoksnių laikomosios gebos lygį. Tiriamajame ruože piltinis gruntas yra jautraus šalčiui. 2008 metų liepos 2 dienos ir rugpjūčio 8 dienos kontrolinių matavimų dinaminio šampo bandymu, ant žemės sankasos viršaus ties 53,92 km buvo išmatuotas $E_{V2}=10,00$ MPa, ties 53,96 km – $E_{V2} = 10,00$ MPa, ties 53,98 km – $E_{V2} = 36,00$ MPa, ties 54,00 km – $E_{V2} = 12,00$ MPa, ties 54,04 km – $E_{V2} = 12,00$ MPa, ties 54,07 km – $E_{V2} = 10,00$ MPa ir ties 54,08 km – $E_{V2} = 6,00$ MPa.

Ruože 55,00–55,09 km rangos darbų metu pastebėta, kad žemės sankasoje atsivėrė plyšiai per visą esamą kelio dangų konstrukciją. Dėl didelio atstumo tarp geologinių gręžinių, inžinerinių geologinių tyrinėjimų ataskaitoje nenurodytas organinių gruntų paplitimas šioje vietoje. Rangos metu nustatyta, kad plyšiai atsivėrė dėl žemiau esančių silpnų organinių gruntų, tačiau detali informacija apie sluoksnių storius projekte nepateikta. 2008 metų birželio 30 dienos kontrolinių matavimų dinaminio šampo bandymu, ant žemės sankasos viršaus ties 55,06 km buvo išmatuotas $E_{V2} = 22,00$ MPa, ties 55,07 km – $E_{V2} = 33,00$ MPa.

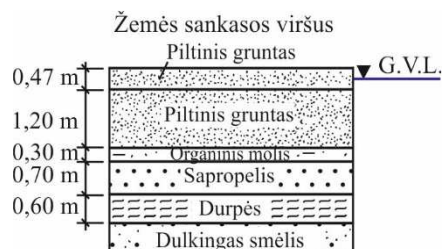
Ruože 56,74–56,94 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,7 m storio sapropelio sluoksnio, kuris slūgso 1,97 m gylyje. Virš sapropelio yra 0,3 m storio organinio molio sluoksnis ir supiltas dulkingas smėlis. Po sapropelio sluoksniu, 2,67 m gylyje yra 0,6 m storio durpių sluoksnis. Po durpėmis sutinkamas natūralus dulkingas smėlis. Gruntinio vandens lygis yra 0,32–0,77 m gylyje, todėl vandeniui prisotintos ne tik durpės, bet ir didžioji supiltų gruntų dalis esanti virš jų. Gruntinis vanduo prasideda 0,25 m žemiau geotinklo sluoksnio (2.10 pav). Tiriamajame

ruože piltinis gruntas yra jautraus šalčiui. 2008 metų liepos 16 dienos ir rugpjūčio 19 dienos kontrolinių matavimų dinaminio štampos bandymu, ant žemės sankasos viršaus ties 56,78 km buvo išmatuotas $E_{V2} = 37,00$ MPa, ties 56,80 km – $E_{V2} = 29,00$ MPa, ties 56,84 km – $E_{V2} = 18,00$ MPa, ties 56,88 km – $E_{V2} = 21,00$ MPa ir ties 56,92 km – $E_{V2} = 9,00$ MPa.



2.9 pav. Tiriamojo ruožo 53,91–54,09 km geologinės sandaros schema

Fig. 2.9. Geological structure scheme of tested road structure section 53.91–54.09 km



2.10 pav. Tiriamojo ruožo nuo 56,74–56,94 km geologinės sandaros schema

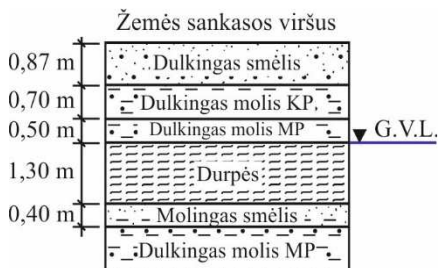
Fig. 2.10. Geological structure scheme of tested road structure section 56.74–56.94 km

Visuose gretimuose ruožuose viršutinėje žemės sankasos dalyje vyrauja supilti, vietomis natūralūs dulkingi smėliai ir moliai, gilesniuose sluoksniuose sutinkami natūralūs dulkingi moliai. Gruntinio vandens daugelyje gręžinių nesutikta, tik ruožo pabaigoje sutiktas gruntinis vanduo kurio gylis nuo kelio viršaus yra 1,3 m. Rangos darbų pakeitimo aktai rodo, kad rangos darbų metu didžiojoje ruožų dalyje, kurioje nebuvo numatytas žemės sankasos sustiprinimas geotinklais, žemės sankasa netenkino projekcinio $E_{V2} = 45$ MPa reikalavimo. Dėl nepakankamos žemės sankasos laikomosios gebos buvo panaudotas 0,3 m storio žemės sankasos stabilizavimas šalto regeneravimo mašina pridedant 3,0 % negesintų kalkių. Ruožuose, kuriuose buvo vykdomas žemės sankasos stabilizavimas kalkėmis, nuo 2008 metų gegužės 21 dienos iki 2008 metų rugsėjo 26 dienos atliktų kontrolinių matavimų statinio ir dinaminio štampos bandymais, ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas E_{V2} kuris kito nuo 9,00 iki 41,00 MPa.

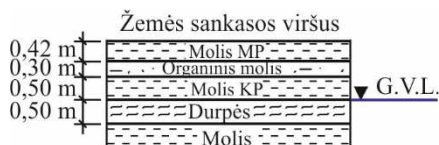
2.4.3. Kelio 131 ruožas trečiajam dangų konstrukcijos tipui

Analizuojant kelio 131 ruožo 44,80–50,80 km rekonstravimo projekto statybos dokumentaciją nustatyta, kad ruože 45,300–45,380 km kelio konstrukcija įrengta virš 1,3 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio. Durpės slūgso 2,07 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių yra supiltas dulkingas molis ir dulkingas smėlis. Po durpių sluoksniu yra vandeniu prisotintas natūralus molingas smėlis. Gruntinio vandens lygis yra 2,07 m gylyje (2.11 pav).

Ruože 45,965–46,140 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,5 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio. Durpės slūgso 1,22 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių slūgso kietai platingas molis, vietomis su organikos priemaišomis. Po durpių sluoksniu yra natūralus mažo plastiškumo molis. Gruntinio vandens lygis yra 1,22 m gylyje (2.12 pav).

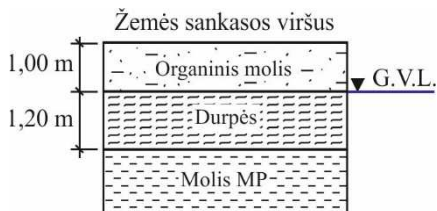


2.11 pav. Tiriamojo ruožo 45,300–45,380 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.11. Geological structure scheme of tested road structure section 45.300–45.380 km

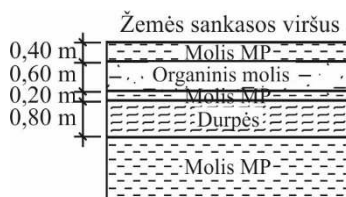


2.12 pav. Tiriamojo ruožo nuo 45,965–46,140 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.12. Geological structure scheme of tested road structure section 45.965–46.140 km

Ruože 46,450–46,720 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,5–1,2 m storio vidutiniškai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio. Durpės slūgso 1,0–1,5 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių yra supiltas mažo plastiškumo molis, vietomis su organikos priemaišomis. Po durpių sluoksniu yra natūralus mažo plastiškumo molis. Gruntinio vandens lygis yra 1,0–1,5 m gylyje (2.13 pav).



2.13 pav. Tiriamojo ruožo 46,450–46,720 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.13. Geological structure scheme of tested road structure section 46.450–46.720 km

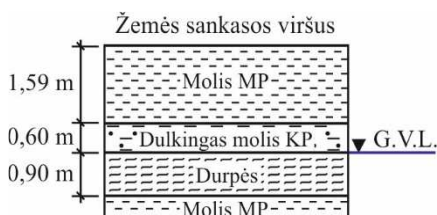


2.14 pav. Tiriamojo ruožo nuo 46,865–46,950 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.14. Geological structure scheme of tested road structure section 46.865–46.950 km

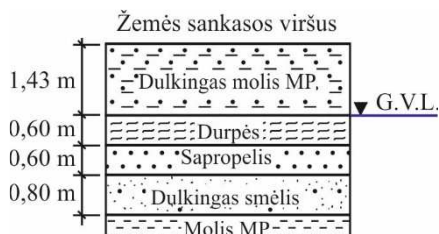
Ruože 46,865–46,950 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,8 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu neprisotintų durpių sluoksnio. Durpės slūgso 1,2 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių yra supiltas mažo plastiškumo molis, vietomis su organikos priemaišomis. Po durpių sluoksniu yra natūralus mažo plastiškumo molis. Gruntinis vanduo nesutiktas (2.14 pav).

Ruože 47,320–47,425 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,7–0,9 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio. Durpės slūgso 2,19–2,29 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių yra supiltas dulkingas molis. Po durpių sluoksniu yra natūralus mažai plastiškas molis. Gruntinio vandens lygis yra 2,19–2,29 m gylyje (2.15 pav).

Ruože 49,220–49,295 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,6 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio, kuris slūgso 1,43 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus. Virš durpių yra supiltas dulkingas molis. Po durpių sluoksniu, 2,03 m gylyje yra 0,6 m storio sapropelio sluoksnis. Po sapropeliu sutinkamas natūralus dulkingas smėlis ir molis. Gruntinio vandens lygis yra 1,43 m (2.16 pav).



2.15 pav. Tiriamojo ruožo 47,320–47,425 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.15. Geological structure scheme of tested road structure section 47.320–47.425 km



2.16 pav. Tiriamojo ruožo nuo 49,220–49,295 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.16. Geological structure scheme of tested road structure section 49.220–49.295 km

Projekto geologinių tyrinėjimų ataskaitoje pateiktos gruntų fizikinės ir mechaninės savybės nurodo, kad durpių deformacijų modulis $E_V = 1,5$ MPa ir sapropelio deformacijų modulis $E_V = 2,0$ MPa. Durpės yra gerai susiskaidžiusios, sapropelis yra minkštai plastingos konsistencijos. Supilto mažai plastiško molio ir dulkingo molio, kurie vyrauja žemės sankasos viršuje, deformacijų modulis $E_V = 4,0$ MPa. Supilto dulkingo smėlio, kuris sutinkamas tik ties 45,300–45,380 km, deformacijų modulis $E_V = 14,0$ MPa. Tiriamuosiuose ruožuose piltinis gruntas yra mažai jautrus ir jautraus šalčiui (F2 ir F3 klasės). Geotinklais sutvirtintame ruože ties 46,140 km kontrolinių matavimų statinio štampos bandymu ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas $E_{V2} = 17,60$ MPa.

Visuose gretimuose ruožuose viršutinėje žemės sankasos dalyje vyrauja supilti arba natūralūs dulkingi smėliai ir mažo plastiškumo moliai. Gruntinio vandens daugelyje gręžinių nesutikta, tik ruožo pradžioje sutiktas gruntinis vanduo kurio gylis 1,5 m ir ties 46,435 km gruntinis vanduo sutiktas 2,2 m gylyje. Rangos darbų pakeitimo aktai rodo, kad rangos darbų metu didžiojoje ruožų dalyje kurioje nebuvo numatytas žemės sankasos sutvirtinimas geotinklais, žemės sankasa netenkino projekcinio $E_{v2} = 45$ MPa reikalavimo. Dėl nepakankamos žemės sankasos laikomosios gebos buvo panaudotas 0,3 m storio žemės sankasos stabilizavimas šalto regeneravimo mašina pridodant 3,0 % negesintų kalkių. Ruožuose, kuriuose buvo vykdomas žemės sankasos stabilizavimas kalkėmis, nuo 2010 metų birželio 17 dienos iki 2010 metų birželio 30 dienos atliktų kontrolinių matavimų statinio štampos bandymais, ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas E_{v2} kuris kito nuo 13,50 iki 33,60 MPa.

Šiame ruože (44,80–50,80 km) taip pat yra 6 atkarpos kuriose ties didelio storio durpynais numatyta grunto polių sistema žemės sankasos laikomajai gebai užtikrinti ir nuosėdžiams eliminuoti. Geologinė sandara čia neišskiriama, nes kelio dangų konstrukcijai žemės sankasą atstoja grunto polių sistema kartu su virš jų įrengta geotinklais armuota išskirstomąja platforma.

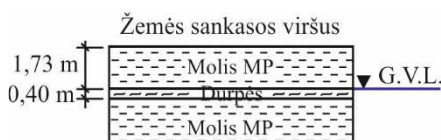
Visuose gretimuose ruožuose viršutinėje žemės sankasos dalyje vyrauja supilti, vietomis natūralūs dulkingi smėliai ir moliai, gilesniuose sluoksniuose sutinkami natūralūs dulkingi moliai. Daugelyje gręžinių gruntinio vandens nesutikta, tik ruožo pabaigoje sutiktas gruntinis vanduo kurio gylis 1,3 m. Inžinerinės geologijos ataskaitos išvadose nurodyta, kad keliuose ruožuose paviršinio tipo vanduo sutinkamas 1,3–3,4 m gylyje, jis laikosi supilto į sankasą, mažai plastiško ar dulkingo molio lėšiuose, o lietingais laikotarpiais ir pavasarinį polaidžių metu paviršinio tipo vanduo gali pakilti ir turėti didesnę paplitimą.

2.4.4. Kelio A6 ruožas ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui

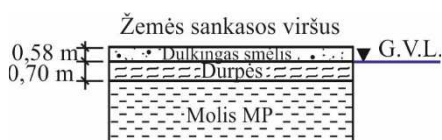
Analizuojant kelio A6 ruožo 137,35–142,00 km rekonstravimo projekto statybos dokumentaciją nustatyta, kad ruože 141,047–141,123 km kelio konstrukcija įrengta virš 0,4 m storio gerai susiskaidžiusių, vandeniu prisotintų durpių sluoksnio, kuris slūgso 1,73 m gylyje. Virš durpių yra supiltas mažai plastiškas, minkštai plastingas molis. Po durpėmis sutinkamas natūralus mažai plastiškas, minkštai plastingas molis. Gruntinio vandens lygis yra 1,53 m gylyje todėl vandeniu prisotintos ne tik durpės, bet ir nedidelė supilto grunto dalis esanti virš jų (2.17 pav). Detali inžinerinių geologinių tyrinėjimų ataskaita projekte nepateikta, todėl nėra tikslios informacijos apie durpių savybes ir nėra galimybės įvertinti šių sluoksnių laikomosios gebos lygį. Tiriamajame ruože piltinis molis yra jautraus šalčiui. 2010 metų rugpjūčio 10 dienos kontrolinių matavimų statinio štampos bandymu, ant žemės sankasos viršaus, prieš klojant geotinklus, ties 140,540 km buvo išmatuotas

$E_{V2} = 22,20$ MPa, ties 140,600 km – $E_{V2} = 27,70$ MPa, ties 140,640 km – $E_{V2} = 24,50$ MPa ir ties 140,680 km – $E_{V2} = 24,10$ MPa.

Projekte buvo numatyta, kad ruože 139,440–139,925 km kelio konstrukcija įrengta iškasant 1,9–2,2 m gylyje nuo esamo kelio paviršiaus esančių gerai susiskaidžiusių konsoliduotų durpių sluoksnį, kurio storis iki 0,8 m, jį pakeičiant drenuojančio grunto sluoksniu. Rangos darbų metu atlikti darbų pakeitimo aktai parodė, kad šiame ruože durpių iškasimas ir jų pakeitimas drenuojančiu gruntu vykdomas nebuvo. Vietoje to, buvo numatytas šio ruožo sutvirtinimas vienu geotinklo sluoksniu. Virš durpių yra supiltas dulkingas smėlis. Po durpių sluoksniu yra natūralus dulkingas smėlis ir mažai plastiškas molis. Gruntinio vandens lygis yra 0,58–0,88 m gylyje nuo žemės sankasos viršaus (2.18 pav). Tiriamajame ruože piltinis dulkingas smėlis yra vidutiniškai jautraus šalčiui. Nuo 2010 metų rugpjūčio 13 dienos iki 2010 metų rugsėjo 27 dienos atliktų kontrolinių matavimų statinio štampos bandymu, ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas E_{V2} , kuris kito nuo 14,40 iki 33,04 MPa.



2.17 pav. Tiriamojo ruožo 141,047–141,123 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.17. Geological structure scheme of tested road structure section 141.047–141.123 km



2.18 pav. Tiriamojo ruožo nuo 139,440–139,925 km geologinės sandaros schema
Fig. 2.18. Geological structure scheme of tested road structure section 139.440–139.925 km

Šiame kelio ruože (137,35–142,00 km) taip pat yra 5 atkarpos kuriose ties didelio storio durpynais numatyta grunto polių sistema žemės sankasos laikomajai gebai užtikrinti ir nuosėdžiams eliminuoti. Geologinė sandara čia neišskiriama nes kelio dangų konstrukcijai žemės sankasą atstoja grunto polių sistema kartu su virš jų įrengta geotinklais armuota išskirstomąja platforma.

Visuose ruožuose, išskyrus geotinklais armuotą žemės sankasą ir poliais sustiprintą žemės sankasą, viršutinėje žemės sankasos dalyje vyrauja supilti dulkingi smėliai ir moliai, gilesniuose sluoksniuose sutinkami dulkingi smėliai ir moliai. Gruntinio vandens didesnėje dalyje gręžinių nesutikta, vietose kur sutiktas gruntinis vanduo, jo gylis kinta nuo 1,1 m iki 2,5 m. Inžinerinės geologijos ataskaitos išvadose nurodyta, kad paviršinio tipo vanduo sutinkamas 0,8–2,7 m gylyje, lietingais laikotarpiais paviršinio tipo vanduo laikinai gali susidaryti ir 0,7–1,0 m gylyje.

Rangos darbų pakeitimo aktai rodo, kad rangos darbų metu didžiojoje ruožų dalyje kurioje nebuvo numatytas žemės sankasos sutvirtinimas geotinklais, žemės

sankasa netenkino projektinio $E_{V2} = 45$ MPa reikalavimo. Dėl nepakankamos žemės sankasos laikomosios gebos buvo panaudotas 0,3 m storio žemės sankasos stabilizavimas šalto regeneravimo mašina pridedant 3,0 % negesintų kalkių. Ruožuose, kuriuose buvo vykdomas žemės sankasos stabilizavimas kalkėmis, nuo 2010 metų gegužės 12 dienos iki 2010 metų spalio 1 dienos atliktų kontrolinių matavimų statinio štampos bandymais, ant žemės sankasos viršaus buvo išmatuotas E_{V2} kuris kito nuo 12,40 iki 37,34 MPa.

2.5. Tiriamųjų kelių ruožų projektinių ir išmatuotų apkrovų rezultatai

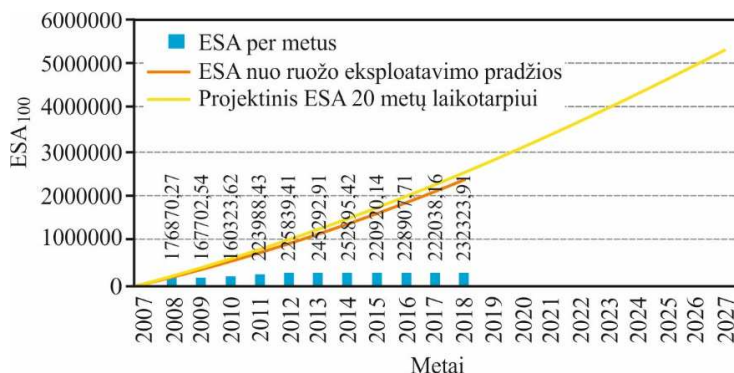
Tiriamųjų kelio ruožų apkrovimui įvertinti nustatyta projektinė apkrova. Nustatant projektinę kelio apkrovą, pirmiausia yra apskaičiuota projektinė kelio apkrova A per 20 metų laikotarpį, nuo tiriamojo ruožo eksploatacijos pradžios. Ši apkrova yra apskaičiuojama remiantis TKA, keliuose A6 ir Nr. 131, įrengtų transporto srauto matavimo ir transporto priemonių svėrimo postų duomenimis, naudojant projektavimo metais išmatuotą metinį ESA. Pagal transporto srauto matavimo ir transporto priemonių svėrimo postų duomenimis kiekvienais metais, apskaičiuota reali apkrova kelio dangų konstrukcijų eksploataavimo metu.

Tiriamasis kelio A6 ruožas 66,20–68,76 km, po rekonstrukcijos pradėtas eksploatuoti 2008 metais. Pagal dangų konstrukcijos tipus (*KPT SDK 07*) šis ruožas yra skaidomas į dvi dalis. Pirmoji dalis, kur dangų konstrukcija priklauso III dangų konstrukcijos klasei ir buvo įrengta atkarpoje 66,20–67,26 km. Antroji dalis, kur dangų konstrukcija priklauso IV dangų konstrukcijos klasei ir buvo įrengta Ukmergės mieste, atkarpoje 67,26–68,76 km. Toliau eksperimentiniame tyrime vertinamas tik IV dangų konstrukcijų klasei priklausantis tiriamasis ruožas 67,26–68,76 km.

Kadangi Ukmergės miestui priklausanti atkarpa 67,26–68,76 km nėra pastoviai stebima matuojant transporto srautą, pirmiausia yra patikrinamas 66,20–67,26 km atkarpos apskaičiuotos projektinės kelio apkrovos A atitikimas realiai išmatuotam transporto priemonių srautui.

Projektinė 66,20–67,26 km ruožo kelio dangos konstrukcija priklauso III dangų konstrukcijos klasei, kurios projektinė apkrova A per 20 metų laikotarpį turėtų neviršyti 3,00 mln. Pagal atliktus projektinės apkrovos A skaičiavimus, remiantis 2006–2018 metų transporto srauto matavimo postų duomenimis, šio tiriamojo ruožo dangų konstrukcijai realiai tenkanti apkrova $A_i = 2,33$ mln., yra labai panaši į apskaičiuotą $A_i = 2,54$ mln. (2.19 pav.). Šiuo metu kelio dangos konstrukcija funkcionuoja neviršijant projektinės transporto apkrovos. 2018 metais išmatuota reali apkrova yra pasiekusi 77,90 % didžiausios leistinos projektinės apkrovos ($A_i = 3,00$ mln.) 20 metų laikotarpiui. Projektiniai skaičiavimai rodo, kad

naudojantis 2006 metų išeities duomenimis gaunamas $A_i = 5,32$ mln. per 20 metų laikotarpį yra kur kas didesnis nei III dangų konstrukcijos ribinė reikšmė ($A_i = 3,00$ mln.). Tai grindžiama tuo, jog projektas buvo atliktas 2004–2005 metais ir projekte naudota $VPI^{(SV)}$ reikšmė naudota projektinių sprendinių parengimui buvo mažesnė. Kadangi TKA duomenų bazė apima transporto srauto matavimus tik nuo 2006 metų, nėra galimybės patikrinti projektavimo metu nustatyto $VPI^{(SV)}$.

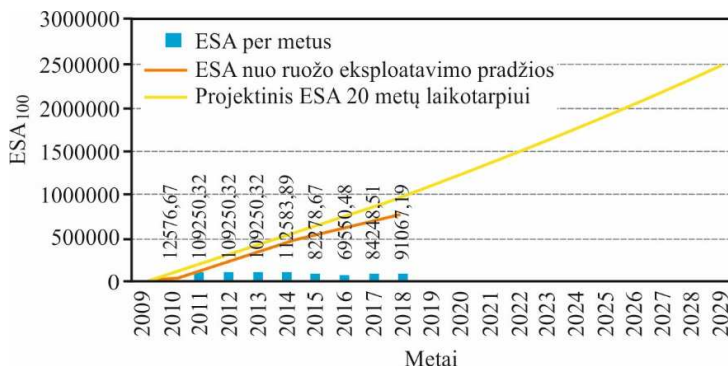


2.19 pav. Pirmojo tiriamojo dangų konstrukcijos tipo apkrovų kitimo rezultatai ruože 66,20–67,26 km

Fig. 2.19. Pavement load variation results for the first tested type of road structure in section 66.20–67.26 km

Atsižvelgiant į 66,20–67,26 km ruožo projektinės apkrovos tendencijas, darome prielaidą, kad Ukmergės miesto ribose esančiam tiriamajam ruožui 67,26–68,76 km galioja tokia pati tendencija. Pagal IV dangų konstrukcijos klasės reikalavimus, didžiausia galima projektinė apkrova 20 metų laikotarpiui $A_i = 0,8$ mln. Išskaičiuojant ESA_{100} atitinkama tvarka gauname, kad Ukmergės miesto ribose esančiam ruožui tenka 0,62 mln.

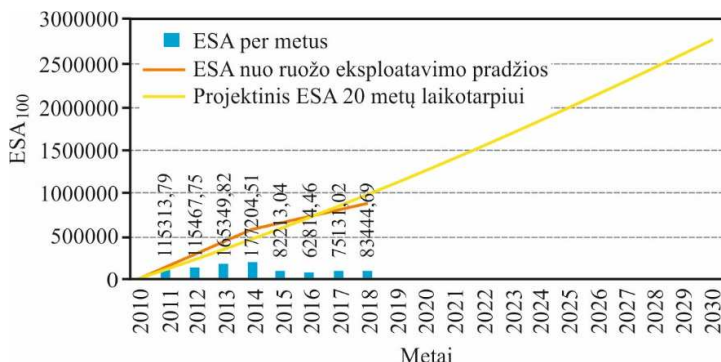
Tiriamasis kelio 131 ruožas 52,45–57,12 km, po rekonstrukcijos pradėtas eksploatuoti 2010 metais. Projektinė kelio dangos konstrukcija priskirta III dangų konstrukcijos klasei, kurios projektinė apkrova A per 20 metų laikotarpį turi neviršyti 3,00 mln. Atlikti projektinės apkrovos skaičiavimai patvirtina, kad projektinė apkrova A per 20 metų pasieks 2,49 mln. ir neviršys III dangų konstrukcijų klasės didžiausios leidžiamos apkrovos. Per 9 eksploatacijos metus projektinė apkrova A pasiekia 1,00 mln., o realiai išmatuota apkrova A 2018 metais yra 0,78 mln. Apskaičiuotos projektinės apkrovos ir išmatuotos apkrovos kreivės augimo tendencija skiriasi, nes išmatuota apkrova linkusi mažėti. Išmatuota sunkiojo transporto apkrova po 9 eksploatacijos metų yra 22,0 % mažesnė už projektinę apskaičiuotą apkrovą (2.20 pav.).



2.20 pav. Antrojo tiriamojo dangų konstrukcijos tipo apkrovų kitimo rezultatai
Fig. 2.20. Pavement load variation results for the second tested type of road structure

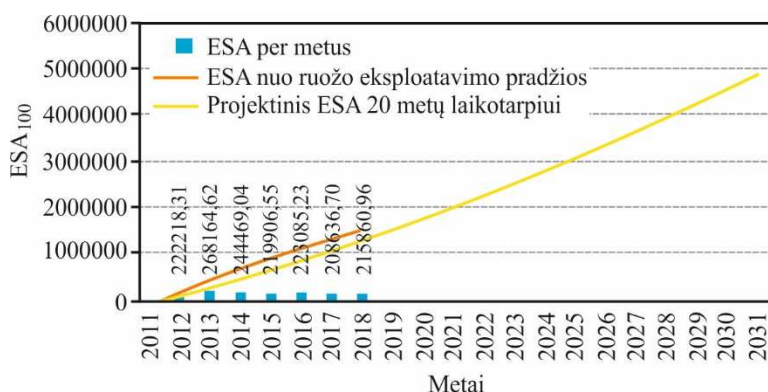
Tiriamasis kelio 131 ruožas 44,80–50,80 km, po rekonstrukcijos pradėtas eksploatuoti 2011 metais. Projektinė kelio dangos konstrukcija yra priskirta III dangų konstrukcijos klasei, kurios projektinė apkrova A per 20 metų laikotarpį turi neviršyti 3,00 mln. Atlikti projektinės apkrovos skaičiavimai patvirtina, kad projektinė apkrova A per 20 metų pasieks 2,79 mln. ir neviršys III dangų konstrukcijų klasės didžiausios leidžiamos apkrovos (2.21 pav.).

Per 8 eksploatacijos metus projektinė apkrova A pasiekia 0,98 mln., o realiai išmatuota apkrova A yra 0,88 mln. Apskaičiuotos projektinės apkrovos ir išmatuotos apkrovos kreivės augimo tendencija skiriasi, nes išmatuota apkrova per pirmus 4 metus smarkiai didėjo, o nuo to laiko yra linkusi mažėti. Išmatuota sunkiojo transporto apkrova po 8 eksploatacijos metų yra 10,2 % mažesnė už projektinę apskaičiuotą apkrovą.



2.21 pav. Trečiojo tiriamojo dangų konstrukcijos tipo apkrovų kitimo rezultatai
Fig. 2.21. Pavement load variation results for the third tested type of road structure

Tiriamasis kelio A6 ruožas 137,35–142,00 km, po rekonstrukcijos pradėtas eksploatuoti 2012 metais. Projektinė kelio dangos konstrukcija yra priskirta II dangų konstrukcijos klasei, kurios projektinė apkrova A per 20 metų laikotarpį turi neviršyti 10 mln. Atlikti projektinės apkrovos skaičiavimai patvirtina, kad projektinė apkrova A per 20 metų pasieks 4,91 mln. ir neviršys II dangų konstrukcijų klasės didžiausios leidžiamos apkrovos. Per 7 eksploatacijos metus projektinė apkrova A pasiekia 1,40 mln., o realiai išmatuota apkrova A yra 1,60 mln. Apskaičiuotos projektinės apkrovos ir išmatuotos apkrovos kreivės augimo tendencija skiriasi tuo, kad išmatuota sunkiojo transporto apkrova po 7 eksploatacijos metų yra 14,3 % didesnė už projektinę apskaičiuotą apkrovą (2.22 pav.).



2.22 pav. Ketvirtojo tiriamojo dangų konstrukcijos tipo apkrovų kitimo rezultatai

Fig. 2.22. Pavement load variation results for the fourth tested type of road structure

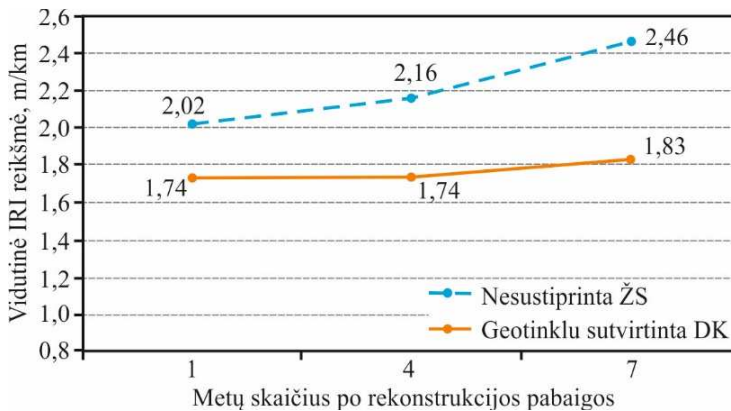
Didžiausias apkrovų augimas nustatytas tiriamojo kelio A6 ruožui 137,35–142,00 km, tačiau didžiausias skirtumas tarp projekte naudojamos dangų konstrukcijos klasės ir realių apkrovų yra tiriamojo kelio A6 ruožui 66,20–67,26 km.

2.6. Tiriamųjų kelių ruožų dangos nelygumo rezultatai

Tiriamasis kelio A6 ruožas 66,20–68,76 km, kuriame geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos ruožas 67,26–67,45 km yra sudėtingose geologinėse sąlygose (pagal Statybos techninio reglamento STR 1.04.02:2011 „Inžineriniai geologiniai ir geotechniniai tyrimai“ 2 priedo nurodymus). Šio ruožo dangų konstrukcija yra pati ploniausia (0,32 m), o naudojamas geotinklas yra pats silpniausias (30 kN/m). Dangų konstrukcija esanti ant nesustiprintos žemės sankasos turi 0,4 m storio apsauginio šalčiui atsparaus grunto sluoksnį, kai geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos žemės sankasa tarnauja kaip apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis,

todėl vertinama, kad geotinklais sutvirtinta yra ne žemės sankasa, dangų konstrukcija. Geotinklas buvo naudojamas po skaldos sluoksniu, nes ant žemės sankasos viršaus buvo užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{v2} \geq 100$ MPa, o nesustiprintos žemės sankasos ruožuose ant žemės sankasos buvo užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{v2} \geq 45$ MPa.

Šiame ruože praėjus 7 metams po kelio rekonstrukcijos nustatyta vidutinė dangos nelygumo reikšmė (1,83 m/km) ant geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos (imant reikšmę kaip atskaitos tašką) yra 34,44 % mažesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę dangų konstrukcijai ant nesustiprintos žemės sankasos (kuo mažesnė IRI reikšmė, tuo lygesnė yra danga). Priimant pirmų metų matavimų rezultatą kaip atskaitos tašką galima daryti išvadą, kad po 7 eksploatacijos metų vidutinė dangos nelygumo reikšmė ant geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos padidėjo tik 5,17 %, kai dangų konstrukcijos ant nesustiprintos žemės sankasos padidėjo 21,78 % (2.23 pav.).



2.23 pav. Pirmojo dangų konstrukcijos tipo kelių dangos nelygumo tarptautinio rodiklio (IRI) kitimo rezultatai

Fig. 2.23. Pavement International Roughness Index variation results for the first type of road structure

Kaita tarp mažiausių, didžiausių IRI reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.2 lentelėje.

Tiriamasis kelio 131 ruožas 52,45–57,12 km, kuriame geotinklu sutvirtinti žemės sankasos ruožai 53,91–54,09 km, 55,00–55,09 km ir 56,74–56,94 km, yra vidutinio sudėtingumo geologinėse sąlygose (pagal STR 1.04.02:2011, 2 priedo nurodymus). Šių ruožų dangų konstrukcija pagal bendrą storį (1,09 m) yra trečia ir naudojamo geotinklo konstrukcija (60 kN/m) taip pat yra trečia pagal stiprumą. Geotinklu sutvirtintos žemės sankasos ruožai yra su papildomu 0,3 m storio

fr. 0/16 grunto pakeitimu, kai daugumoje kitų ruožų esama dangų konstrukcija tarnauja kaip apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis. Kalkėmis stabilizuotuose žemės sankasos ruožuose, stabilizuojamas sluoksnis buvo 0,3 m storio esama dangų konstrukcija, pridedant 3 % negesintų kalkių. Lyginant panaudotas dangų konstrukcijas šiame ruože, tik geotinklais sutvirtintuose žemės sankasos ruožuose buvo naudojamas apsauginis šalčiui atspraus sluoksnis, kurio storis yra 0,4 m.

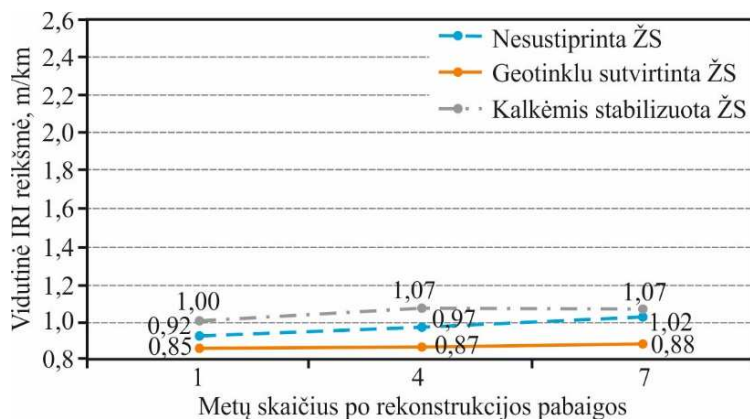
2.2 lentelė. Mažiausių, didžiausių tarptautinio nelygumo indekso (IRI) reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės pirmajam dangų konstrukcijos tipui
Table 2.2. Min, max values of International Roughness Index and standard deviation and measurement count values or the first type of road structure

Žemės sankasos tipas		IRI reikšmės (m/km) po kelio rekonstrukcijos praėjus		
		1 metams	4 metams	7 metams
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0	0,76	0,95
	Didžiausia reikšmė	4,84	5,01	6,75
	Standartinė nuokrypa	0,83	0,80	1,00
	Imties plotis	4,84	4,25	5,80
Geotinklu sutvirtinta DK	Mažiausia reikšmė	0,96	1,02	0,93
	Didžiausia reikšmė	4,64	4,34	5,87
	Standartinė nuokrypa	0,73	0,61	1,04
	Imties plotis	3,68	3,32	4,94

Geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožuose buvo daromas papildomas grunto pakeitimas (0,3 m), nes mažiausias nustatytas deformacijų modulis ant esamos žemės sankasos viršaus buvo $E_{v2} = 6,00$ MPa, todėl šis papildomas grunto pakeitimas su geotinklu leido ant žemės sankasos viršaus užtikrinti reikiamą deformacijų modulį $E_{v2} \geq 45$ MPa. Nesustiprintos žemės sankasos ruožuose ant žemės sankasos buvo užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{v2} \geq 45$ MPa, o tuose ruožuose, kuriuose E_{v2} buvo kintantis nuo 9,00 iki 41,00 MPa, buvo numatytas stabilizavimas kalkėmis, laikomosios gebos reikavimui $E_{v2} = 45$ MPa pasiekti.

Šiame ruože praėjus 7 metams po kelio rekonstrukcijos nustatyta vidutinė dangos nelygumo reikšmė (0,88 m/km) ant geotinklu sutvirtintos žemės sankasos (imant reikšmę kaip atskaitos tašką) yra 15,9 % mažesnė už vidutinę dangos ne-

lygumo reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos ir 21,59 % mažesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos. Priimant pirmų metų matavimų rezultatą kaip atskaitos tašką galima daryti išvadą, kad po 7 eksploatacijos metų vidutinė dangos nelygumo reikšmė ant geotinklu sutvirtintos žemės sankasos padidėjo tik 3,53 %, kai ant nesustiprintos žemės sankasos padidėjo 10,87 % ir ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos padidėjo 7,00 % (2.24 pav.).



2.24 pav. Antrojo dangų konstrukcijos tipo kelių dangos nelygumo tarptautinio rodiklio (IRI) kitimo rezultatai

Fig. 2.24. Pavement International Roughness Index variation results for the second type of road structure

Kaita tarp mažiausių, didžiausių IRI reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.3 lentelėje.

Tiriamasis kelio 131 ruožas 44,80–50,80 km, kuriame geotinklu sutvirtinti žemės sankasos ruožai 45,300–45,380 km, 45,965–46,140 km; 46,450–46,720 km; 46,865–46,950 km; 47,320–47,425 km ir 49,220–49,295 km, yra sudėtingose geologinėse sąlygose (pagal STR 1.04.02:2011, 2 priedo nurodymus), nes pavojingiausioje vietoje nuo apatinio geotinklo iki 1,2 m storio durpių sluoksnio yra tik 1,0 m storio piltinio grunto sluoksnis. Dangų konstrukcija pagal bendrą storį (1,40 m) yra pirma t. y. pati storiausia, o naudojamo geotinklo konstrukcija yra antra pagal stiprumą (120 kN/m). Visi keturi skirtingi žemės sankasos tipai gali būti suskirstomi į dvi grupes pagal geologinę situaciją: a) Nesustiprinta ir kalkėmis stabilizuota žemės sankasa; b) Geotinklais sutvirtinta ir poliais sustiprinta žemės sankasa. Grupei „a“ priklauso žemės sankasos gruntai kuriuose nėra organinės kilmės gruntų, kai „b“ grupei priklausančios žemės sankasos gruntai yra tu-

rinys organinių medžiagų sluoksnius ir yra kur kas mažesnio standumo, kitaip tariant „b“ grupės žemės sankasa yra daug prastesnė. Dangų konstrukcijos sluoksniai (asfaltbetonis, skalda ir apsauginis šalčiui atsparus gruntas) yra visiškai vienodi visoms dangų konstrukcijoms naudojamoms virš skirtingų žemės sankasos tipų. Geotinklais sutvirtinti žemės sankasos ruožai yra su papildomu 0,6 m storio fr. 0/32 grunto pakeitimu. Kalkėmis stabilizuotuose žemės sankasos ruožuose buvo stabilizuojamas 0,3 m storio molinių gruntų sluoksnis, pridedant 3 % negešintų kalkių. Poliais sustiprinta žemės sankasa turi papildomą 0,3 m storio fr. 0/32 grunto sluoksnį iki polių galvenų. Lyginant panaudotas dangų konstrukcijas šiame ruože, tik geotinklais armuotuose žemės sankasos ruožuose buvo panaudotas 0,3 m didesnis grunto keitimas.

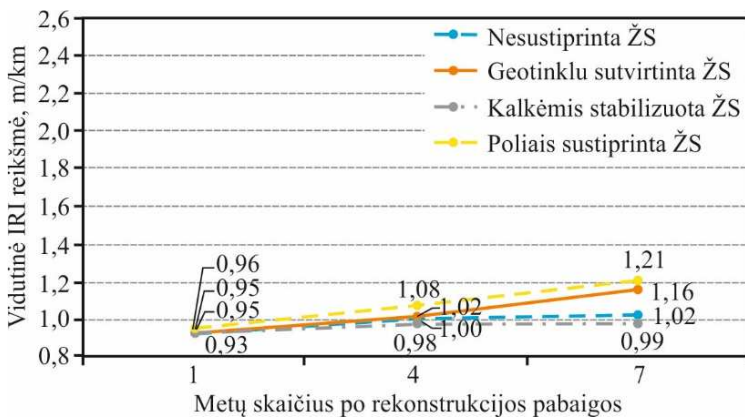
2.3 lentelė. Mažiausių, didžiausių tarptautinio nelygumo indekso (IRI) reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės antrajam dangų konstrukcijos tipui
Table 2.3. Min, max International Roughness Index values, standard deviation and measurement count values for the second type of road structure

Žemės sankasos tipas		IRI reikšmės (m/km) po kelio rekonstrukcijos praėjus		
		1 metams	4 metams	7 metams
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,48	0,58	0,56
	Didžiausia reikšmė	1,72	2,31	2,64
	Standartinė nuokrypa	0,27	0,32	0,37
	Imties plotis	1,24	1,73	2,08
Geotinklu sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,40	0,46	0,49
	Didžiausia reikšmė	1,59	1,59	1,35
	Standartinė nuokrypa	0,22	0,20	0,20
	Imties plotis	1,19	1,13	0,86
Kalkėmis stabilizuota ŽS	Mažiausia reikšmė	0,37	0,41	0,35
	Didžiausia reikšmė	7,50	6,79	8,23
	Standartinė nuokrypa	0,66	0,69	0,69
	Imties plotis	7,13	6,38	7,88

Geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožuose buvo daromas papildomas grunto pakeitimas (0,6 m), nes mažiausias nustatytas deformacijų modulis ant esamos žemės sankasos viršaus buvo $E_{v2} = 17,60$ MPa, todėl šis papildomas grunto

pakeitimas su geotinklu leido ant žemės sankasos viršaus užtikrinti reikiamą deformacijų modulį $E_{V2} \geq 45$ MPa. Nesustiprintos žemės sankasos ruožuose ant žemės sankasos buvo užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{V2} \geq 45$ MPa, o tuose ruožuose, kuriuose E_{V2} buvo kintantis nuo 13,50 iki 33,60 MPa, buvo numatytas stabilizavimas kalkėmis, laikomosios gebos reikalavimui $E_{V2} = 45$ MPa pasiekti.

Šiame ruože praėjus 7 metams po kelio rekonstrukcijos nustatyta vidutinė dangos nelygumo reikšmė (1,16 m/km) ant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos (imant reikšmę kaip atskaitos tašką) yra 4,31 % mažesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant poliais sustiprintos žemės sankasos, tačiau taip pat yra 12,07 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos ir 14,66 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos (2.25 pav.).



2.25 pav. Trečiojo dangų konstrukcijos tipo kelių dangos nelygumo tarptautinio rodiklio (IRI) kitimo rezultatai

Fig. 2.25. Pavement International Roughness Index variation results for the third type of road structure

Primant pirmų metų matavimų rezultatą kaip atskaitos tašką galima daryti išvadą, kad po 7 eksploatacijos metų vidutinė dangos nelygumo reikšmė ant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos padidėjo 22,11 %, ant poliais sustiprintos žemės sankasos padidėjo 26,04 %, kai ant nesustiprintos žemės sankasos padidėjo 7,37 % ir ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos padidėjo tik 6,45 %. Kaita tarp mažiausių, didžiausių IRI reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.4 lentelėje.

Tiriamasis kelio A6 ruožas 137,35–142,00 km, kuriame geotinklu sutvirtintas žemės sankasos ruožas yra 141,047–141,123 km, yra nesudėtingose geologinėse sąlygose (pagal STR 1.04.02:2011, 2 priedo nurodymus), nes nuo apatinio geotinklo

iki 0,4 m storio durpių sluoksnio yra net 1,73 m storio piltinio grunto sluoksnis. Dangų konstrukcija pagal bendrą storį (1,22 m) yra antra, o naudojamo geotinklo konstrukcija pati stipriausia (440 kN/m). Rangos darbų metu atlikti darbų pakeitimo aktai parodė, kad 139,440–139,925 km ruože 0,8 m storio durpių iškasimas ir jų pakeitimas drenuojančiu gruntų vykdomas nebuvo. Vietoje to, buvo numatytas šio ruožo sutvirtinimas panaudojant vieną sluoksnį geotinklo iš PP skersine san-kasai kryptimi, kurio stipris tempiant 40/40 kN/m (2.5 lentelė).

2.4 lentelė. Mažiausių, didžiausių tarptautinio nelygumo indekso (IRI) reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės trečiajam dangų konstrukcijos tipui
Table 2.4. Min, max International Roughness Index values, standard deviation and measurement count values for the third type of road structure

Žemės sankasos tipas		IRI reikšmės (m/km) po kelio rekonstrukcijos praėjus		
		1 metams	4 metams	7 metams
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,46	0,37	0,46
	Didžiausia reikšmė	1,97	3,00	1,78
	Standartinė nuokrypa	0,27	0,35	0,30
	Imties plotis	1,51	2,63	1,32
Geotinklais sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,41	0,43	0,48
	Didžiausia reikšmė	1,95	2,57	2,97
	Standartinė nuokrypa	0,31	0,40	0,53
	Imties plotis	1,54	2,14	2,49
Kalkėmis stabilizuota ŽS	Mažiausia reikšmė	0,32	0,40	0,35
	Didžiausia reikšmė	3,94	3,31	3,39
	Standartinė nuokrypa	0,35	0,38	0,37
	Imties plotis	3,62	2,91	3,04
Poliais sustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,52	0,52	0,52
	Didžiausia reikšmė	2,17	3,49	3,86
	Standartinė nuokrypa	0,28	0,41	0,58
	Imties plotis	1,65	2,97	3,34

2.5 lentelė. Gamintojo deklaruojamos savybės geotinklui, skirtam žemės sankasos stabilizavimui virš molingų gruntų

Table 2.5. Declared geogrid performances of the manufacturer for soil stabilization over clayey soils

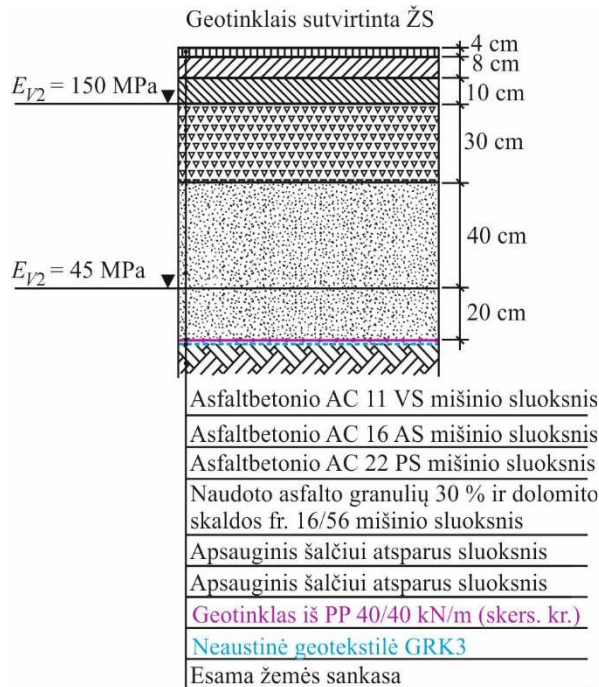
Deklaruojamos savybės	Bandymo metodas	Mato vnt.	Vertės
			Geotinklas 40/40 kN/m
Gaminio žaliava	–	–	PP, baltas
Svoris ploto vienetai	<i>LST EN ISO 9864</i>	g/m ²	240
Didžiausias stipris tempiant md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	≥40 / ≥40
Pailgėjimas esant nominaliai apkrovai md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	%	≤8 / ≤8
Stipris tempiant esant 1 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	8 / 8
Stipris tempiant esant 2 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	16 / 16
Stipris tempiant esant 5 % pailgėjimui, md/cmd ¹⁾	<i>LST EN ISO 10319</i>	kN/m	32 / 32
Akutės dydis, md × cmd ¹⁾	–	mm×mm	31×31
Atsparumas UV spinduliams	<i>LST EN 12224</i>	%	95,0
Atsparumas atmosferos poveikiui	FGSV	klasė	aukšta
Produkto specifinis pailgėjimas	–	%	0

Pastabos: ¹⁾ md – išilgine kryptimi, cmd – skersine kryptimi.

Archyvinėje dokumentacijoje nėra tikslios informacijos apie geotinklo paklojimo vietą ir reikalingą užpylimo aukštį. Rangos darbų metu, ruože 139,440–139,925 km išmatuoti žemės sankasos viršaus deformacijų moduliai E_{V2} parodė, kad mažiausias $E_{V2} = 14,40$ MPa. Pagal tai daroma prielaida, kad geotinklas buvo naudojamas kartu ir žemės sankasos laikomosios gebos padidinimui, numatant ne mažesnę kaip 0,20 m grunto pakeitimą, kad būtų užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{V2} \geq 45$ MPa (2.26 pav.).

Visi keturi skirtingi žemės sankasos tipai gali būti suskirstomi į dvi grupes pagal geologinę situaciją: a) Nesustiprinta ir kalkėmis stabilizuota žemės sankasa; b) Geotinklais sutvirtinta ir poliais sustiprinta žemės sankasa. Dangų konstrukcijos sluoksniai (asfaltbetonis, skalda ir apsauginis šalčiui atsparus gruntas) yra vienodi visiems žemės sankasos tipams išskyrus dangų konstrukciją ant nesustiprintos žemės sankasos, kur vietomis esama dangų konstrukcija tarnauja kaip

apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis ir skaldos sluoksnio storis yra 10 cm mažesnis. Geotinklais sutvirtintas ruožas 141,047–141,123 km ir poliais sustiprinti ruožai yra su papildomu 0,3 m storio fr. 0/32 grunto pakeitimu. Kalkėmis stabilizuotuose ruožuose buvo stabilizuojamas 0,3 m storio molinių gruntų sluoksnis, pridedant 3 % negesintų kalkių. Lyginant panaudotas dangų konstrukcijas šiame kelio ruože, tik nesustiprintos žemės sankasos ruožuose vietomis buvo panaudota 0,5 m plonesnė dangų konstrukcija.

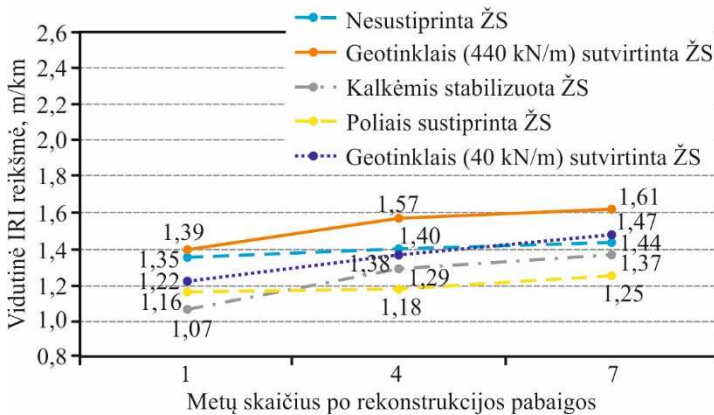


2.26 pav. Magistralinio kelio A6 ruožo 141,047–141,123 km projektinė dangų konstrukcija ant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos numatytos darbų pakeitimo akte
Fig. 2.26. Main road A6 section 141.047–141.123 km designed road structure on geogrid reinforced subgrade indicated in a project changing committee decision

Geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruože 141,047–141,123 km buvo daromas papildomas grunto pakeitimas (0,3 m), nes mažiausias nustatytas deformacijų modulis ant esamos žemės sankasos viršaus buvo $E_{V2} = 22,00 \text{ MPa}$, todėl šis papildomas grunto pakeitimas su geotinklu leido ant žemės sankasos viršaus užtikrinti reikiamą deformacijų modulį $E_{V2} \geq 45 \text{ MPa}$. Nesustiprintos žemės sankasos ruožuose ant žemės sankasos buvo užtikrintas reikiamas deformacijų modulis $E_{V2} \geq 45 \text{ MPa}$, o tuose ruožuose, kuriuose E_{V2} buvo kintantis nuo 12,40 iki

37,34 MPa, buvo numatytas stabilizavimas kalkėmis, laikomosios gebos reikalavimui $E_{v2} = 45$ MPa pasiekti.

Šiame ruože praėjus 7 metams po kelio rekonstrukcijos nustatyta vidutinė dangos nelygumo reikšmė ant geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos (imant reikšmę kaip atskaitos tašką) yra didžiausia t. y. 1,61 (2.27 pav.). Ji yra 8,70 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant geotinklais (40 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos, 10,56 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos, 14,91 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ir 22,36 % didesnė už vidutinę dangos nelygumo reikšmę ant poliais sustiprintos žemės sankasos.



2.27 pav. Ketvirtojo dangų konstrukcijos tipo kelių dangos nelygumo tarptautinio rodiklio (IRI) kitimo rezultatai

Fig. 2.27. Pavement International Roughness Index variation results for the fourth type of road structure

Priimant pirmų metų matavimų rezultatą kaip atskaitos tašką galima daryti išvadą, kad po 7 eksploatacijos metų vidutinė dangos nelygumo reikšmė ant geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos padidėjo 15,83 %, ant geotinklų (40 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos padidėjo 20,49 %, ant poliais sustiprintos žemės sankasos padidėjo 7,76 %, ant nesustiprintos žemės sankasos padidėjo 6,67 % ir ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos padidėjo net 28,04 %. Kaita tarp mažiausių, didžiausių IRI reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.6 lentelėje.

Dėl nežinomos tikslios geotinklais (40 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos konstrukcijos ruože 139,440–139,925 km ir jos nemažo skirtumo lyginant su 141,047–141,123 km įrengta dangų konstrukcija (440 kN/m), ji yra išskiriama ir vertinama atskirai.

2.6 lentelė. Mažiausių, didžiausių tarptautinio nelygumo indekso (IRI) reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui
Table 2.6. Min, max International Roughness Index values, standard deviation and measurement count values for the fourth type of road structure

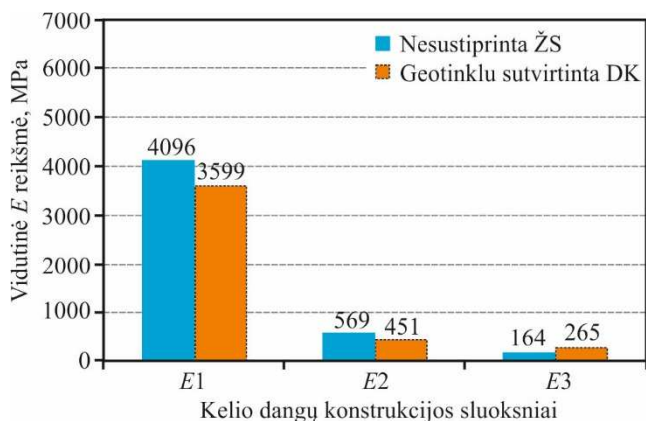
Žemės sankasos tipas		IRI reikšmės (m/km) po kelio rekonstrukcijos praėjus		
		1 metams	4 metams	7 metams
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,50	0,46	0,54
	Didžiausia reikšmė	5,75	3,83	7,08
	Standartinė nuokrypa	0,66	0,44	0,73
	Imties plotis	5,25	3,37	6,54
Geotinklais (440 kN/m) sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	1,03	0,98	0,95
	Didžiausia reikšmė	1,64	2,70	2,65
	Standartinė nuokrypa	0,18	0,43	0,45
	Imties plotis	0,61	1,72	1,70
Kalkėmis stabilizuota ŽS	Mažiausia reikšmė	0,52	0,73	0,67
	Didžiausia reikšmė	1,82	3,30	2,95
	Standartinė nuokrypa	0,26	0,52	0,49
	Imties plotis	1,30	2,57	2,28
Poliais sustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,56	0,44	0,59
	Didžiausia reikšmė	2,64	2,49	2,68
Poliais sustiprinta ŽS	Standartinė nuokrypa	0,35	0,33	0,37
	Imties plotis	2,08	2,05	2,09
Geotinklu (40 kN/m) sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	0,60	0,70	0,76
	Didžiausia reikšmė	2,35	2,54	2,96
	Standartinė nuokrypa	0,33	0,37	0,45
	Imties plotis	1,75	1,84	2,20

2.7. Tiriamųjų kelių ruožų dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių rezultatai

Dangų konstrukcijų tamprumo modulio rezultatai bei rezultatų skirtumų aprašymai tarp skirtingo tipo žemės sankasos ruožų pateikiami tokia pačia tvarka kaip ir 2.6 poskyryje pateikti duomenys.

Tiriamasis kelio A6 ruožas 66,20–68,76 km, kuriame praėjus 11 metų po kelio rekonstrukcijos nustatytos vidutinės tamprumo modulio reikšmės dangų konstrukcijos sluoksniams. *E1* – asfaltbetonio sluoksnių tamprumo modulis; *E2* – skaldos sluoksnio tamprumo modulis; *E3* – apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulis. Šiuo atveju geotinklas yra įrengtas dangų konstrukcijoje, po skaldos sluoksniu, todėl didžiausią įtaką jis turi *E2* tamprumo modulio rezultatams. Kuo didesnė tamprumo modulio reikšmė, tuo stipresnis yra dangų konstrukcijos sluoksnis.

Geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) asfaltbetonio sluoksnių vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 13,81 % ir skaldos sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 26,16 % mažesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos dangų konstrukcijos atitinkamais sluoksniais (2.28 pav.). Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulis geotinklais sutvirtintai dangų konstrukcijai yra 38,11 % didesnis lyginant su nesustiprintos žemės sankasos sluoksniu. Kaita tarp mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.7 lentelėje.



2.28 pav. Pirmojo dangų konstrukcijos tipo dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio *E* rezultatai

Fig. 2.28. Pavement structure layer elasticity modulus *E* results for the first type of road structure

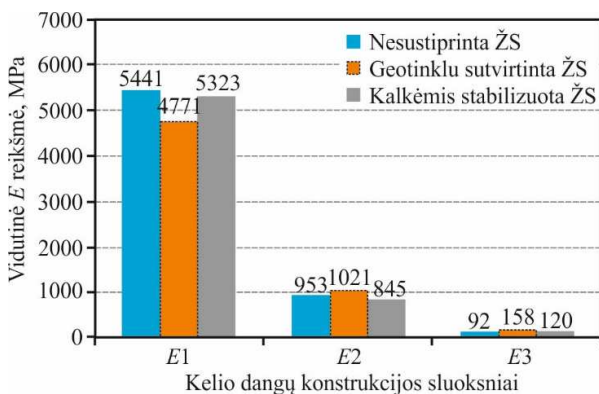
2.7 lentelė. Mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės pirmajam dangų konstrukcijos tipui

Table 2.7. Min, max elasticity modulus values, standard deviation and measurement count values for the first type of road structure

Žemės sankasos tipas		Tamprumo modulis (MPa) po kelio rekonstrukcijos praėjus 11 metų		
		<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	2709	388	117
	Didžiausia reikšmė	6293	820	218
	Standartinė nuokrypa	1319	164	45
	Imties plotis	3658	531	101
Geotinklu sutvirtinta DK	Mažiausia reikšmė	3038	324	66
	Didžiausia reikšmė	3969	757	530
	Standartinė nuokrypa	386	164	210
	Imties plotis	931	433	464

Tiriamasis kelio 131 ruožas 52,45–57,12 km, kuriame praėjus 9 metams po kelio rekonstrukcijos nustatytos vidutinės tamprumo modulio reikšmės dangų konstrukcijos sluoksniams. Šiuo atveju geotinklas turi įtakos daugiausia *E3* tamprumo modulio rezultatams. Ruožuose su geotinklu sutvirtinta žemės sankasa (imant reikšmes kaip atskaitos taškus), asfaltbetonio sluoksnio tamprumo modulio reikšmė yra 14,04 % mažesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų ir 11,57 % mažesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų atitinkamais sluoksniais. Geotinklu sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) skaldos sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 6,66 % didesnė už skaldos sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos ir 17,24 % didesnė už skaldos sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos (2.29 pav.).

Geotinklu sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 41,77 % didesnė už apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos ir 24,05 % didesnė už apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos. Kaita tarp mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.8 lentelėje.



2.29 pav. Antrojo dangų konstrukcijos tipo dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio E rezultatai

Fig. 2.29. Pavement structure layer elasticity modulus E results for the second type of road structure

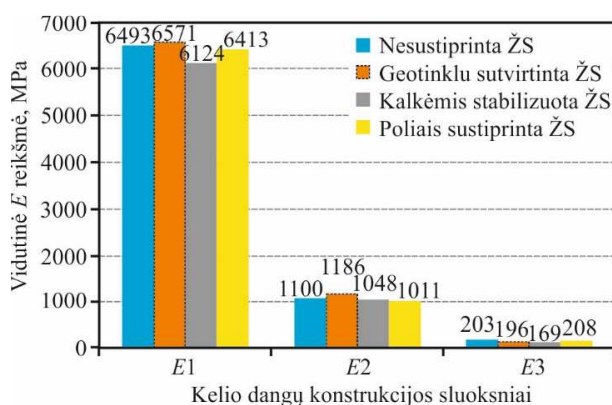
2.8 lentelė. Mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės antrajam dangų konstrukcijos tipui

Table 2.8. Min, max elasticity modulus values, standard deviation and measurement count values for the second type of road structure

Žemės sankasos tipas		Tamprumo modulis (MPa) po kelio rekonstrukcijos praėjus 9 metams		
		$E1$	$E2$	$E3$
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	4349	682	73
	Didžiausia reikšmė	6612	1228	124
	Standartinė nuokrypa	845	186	18
	Imties plotis	2263	546	51
Geotinklu sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	2653	292	65
	Didžiausia reikšmė	8410	1589	256
	Standartinė nuokrypa	1330	284	45
	Imties plotis	5757	1297	191
Kalkėmis stabilizuota ŽS	Mažiausia reikšmė	3250	687	98
	Didžiausia reikšmė	6822	1414	242
	Standartinė nuokrypa	910	212	45
	Imties plotis	3572	727	144

Tiriamasis kelio 131 ruožas 44,80–50,80 km, kuriame praėjus 8 metams po kelio rekonstrukcijos nustatytos vidutinės tamprumo modulio reikšmės dangų konstrukcijos sluoksniams. Šiuo atveju geotinklas taip pat turi įtakos daugiausia E3 tamprumo modulio rezultatams.

Ruožuose su geotinklais sutvirtinta žemės sankasa (imant reikšmes kaip atskaitos taškus), asfaltbetonio sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 1,19 % didesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų, 2,40 % didesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su poliais sustiprintos žemės sankasos ruožų ir 6,80 % didesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų atitinkamais sluoksniais. Geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) skaldos sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 7,25 % didesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų, 14,76 % didesnė už skaldos sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant poliais sustiprintos žemės sankasos ruožų ir 11,64 % didesnė už skaldos sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų atitinkamais sluoksniais. Geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 3,45 % mažesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų, 6,12 % mažesnė už apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant poliais sustiprintos žemės sankasos ruožų ir 13,78 % didesnė už apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų atitinkamais sluoksniais (2.30 pav.). Kaita tarp mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.9 lentelėje.



2.30 pav. Trečiojo dangų konstrukcijos tipo dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio E rezultatai

Fig. 2.30. Pavement structure layer elasticity modulus E results for the third type of road structure

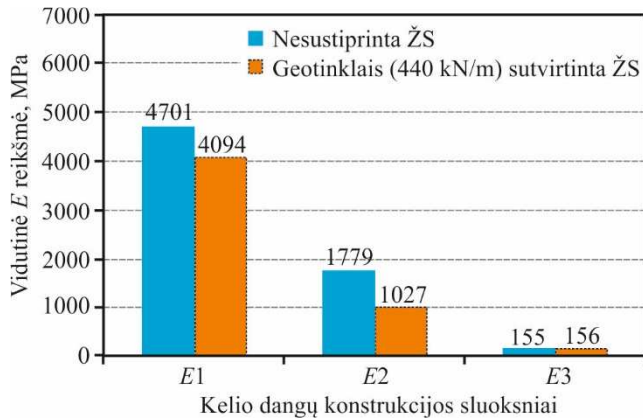
2.9 lentelė. Mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės trečiajam dangų konstrukcijos tipui

Table 2.9. Min, max bearing elasticity modulus, standard deviation and measurement count values for the third type of road structure

Žemės sankasos tipas		Tamprumo modulis (MPa) po kelio rekonstrukcijos praėjus 8 metams		
		<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	5391	782	139
	Didžiausia reikšmė	7694	1551	258
	Standartinė nuokrypa	836	299	47
	Imties plotis	2303	769	119
Geotinklais sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	2585	630	85
	Didžiausia reikšmė	10250	1740	370
	Standartinė nuokrypa	1636	270	70
	Imties plotis	7665	1110	285
Kalkėmis stabilizuota ŽS	Mažiausia reikšmė	2240	537	69
	Didžiausia reikšmė	9529	1882	306
	Standartinė nuokrypa	1529	335	48
	Imties plotis	7289	1345	237
Poliais sustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	4046	676	148
	Didžiausia reikšmė	8262	1525	277
	Standartinė nuokrypa	1154	280	36
	Imties plotis	4216	849	129

Ruožuose su geotinklais (440 kN/m) sutvirtinta žemės sankasa (imant reikšmes kaip atskaitos taškus), asfaltbetonio sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 14,83 % mažesnė už vidutinę tamprumo modulio reikšmę lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų atitinkamais sluoksniais. Geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) skaldos sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 73,22 % mažesnė už skaldos sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos. Geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožų (imant reikšmes kaip atskaitos taškus) apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinė tamprumo modulio reikšmė yra 0,64 % didesnė už apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio vidutinę tamprumo modulio reikšmę ant nesustiprintos žemės sankasos.

(2.31 pav.). Kaita tarp mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių ir standartinės nuokrypos reikšmės pateiktos 2.10 lentelėje.



2.31 pav. Ketvirtąjo dangų konstrukcijos tipo dangos konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio E rezultatai

Fig. 2.31. Pavement structure layer elasticity modulus E results for the fourth type of road structure

2.10 lentelė. Mažiausių, didžiausių tamprumo modulio reikšmių, standartinės nuokrypos ir imties pločio reikšmės ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui

Table 2.10. Min, max elasticity modulus values, standard deviation and measurement count values for the fourth type of road structure

Dangų konstrukcijos tipas		Tamprumo modulis (MPa) po kelio rekonstrukcijos praėjus 7 metams		
		$E1$	$E2$	$E3$
Nesustiprinta ŽS	Mažiausia reikšmė	3541	1190	110
	Didžiausia reikšmė	6701	2416	234
	Standartinė nuokrypa	1099	363	39
	Imties plotis	3160	1226	124
Geotinklais (440 kN/m) sutvirtinta ŽS	Mažiausia reikšmė	2706	780	75
	Didžiausia reikšmė	6287	1225	235
	Standartinė nuokrypa	1264	156	69
	Imties plotis	3581	445	160

Dėl nežinomos tikslios geotinklais (40 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos konstrukcijos ruože 139,440–139,925 km ir jos nemažo skirtumo lyginant su 141,047–141,123 km įrengta dangų konstrukcija (440 kN/m), ji yra išskiriama ir nevertinama dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių atžvilgiu.

2.8. Antrojo skyriaus išvados

1. Didžiausias kelio dangos nelygumo (IRI) intervalas nustatytas nesustiprintos (etaloninės) žemės sankasos ruožams be organinių gruntų, kuris yra 1,02–2,46 m/km. Nustatyta, kad jis yra didžiausias (1,44 m/km) lyginant su kitais sustiprintais ar sutvirtintais žemės sankasos tipais (geotinklais sutvirtintais 0,88–1,83 m/km (0,85 m/km), kalkėmis stabilizuotais 0,99–1,37 m/km (0,38 m/km), poliais sustiprintais 1,21–1,25 m/km (0,04 m/km)).
2. Kelio dangos nelygumo didėjimo procentas tarp pirmųjų ir paskutiniųjų metų matavimų parodė, kad visų žemės sankasos tipų IRI prieaugio intervalas yra 21,78–28,04 %. Iš visų ruožų, kuriuose buvo reikalingas žemės sankasos sutvirtinimas arba sustiprinimas, mažiausias IRI augimo procentas yra geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožuose (22,11 %). Skirtumas tarp mažiausio ir didžiausio visų žemės sankasos tipų kelio dangos nelygumo padidėjimo yra tik 6,26 %. Šis skirtumas parodo, kad visi žemės sankasos tipai dangos nelygumo padidėjimo atžvilgiu dirba labai panašiai.
3. Magistralinio kelio A6 geotinklais sutvirtintų žemės sankasos ruožų 139,440–139,925 km (geotinklo stipris tempiant 40 kN/m) ir 141,047–141,123 km (geotinklų stipris tempiant 440 kN/m) dangos nelygumo padidėjimo nuo pirmųjų iki septintųjų metų po eksploatacijos pradžios palyginimas parodė, kad naudojant skirtingo tipo sprendinį, du sluoksniai žymiai stipresnių geotinklų suteikia papildomą teigiamą efektą dangos lygumui. Naudojant du geotinklų sluoksnius (geotinklų stipris tempiant 440 kN/m) žemės sankasos sutvirtinimui nustatytas vidutinės dangos nelygumo reikšmės padidėjimas yra 15,83 %, o naudojant vieną geotinklo sluoksnį (geotinklo stipris tempiant 40 kN/m) dangos nelygumo padidėjimas yra 4,66 % didesnis (20,49 %).
4. Magistralinio kelio A6 ruožo 66,20–68,76 km dangos nelygumo (IRI) kitimo ir dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio E rezultatai geriausiai atspindi geotinklo įtaką dangos lygumui. Geotinklo darbas tamprioje būsenoje 1,35 karto sumažino dangų konstrukcijos nelygumus veikiant padidintai apkrovai (išmatuota apkrova A yra 0,62 mln. ir yra pasiekusi 77,90 % numatytos didžiausios projektinės apkrovos per 10 metų,

t. y. per pusę numatyto projekcinio tarnavimo laiko) net esant mažesnei vidutinei geotinklu sutvirtinto skaldos sluoksnio tamprumo modulio reikšmei (451 MPa) lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožų vidutine skaldos sluoksnio tamprumo modulio reikšme (569 MPa).

5. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio vidutinių reikšmių E_3 (išskyrus kelio A6 ruože 66,20–68,76km) intervalas nustatytas nesustiprintai (etaloninei) žemės sankasai (92–203 MPa) palyginus su intervalu nustatytu geotinklais sutvirtintai žemės sankasai (156–196 MPa) neparodė reikšmingo vidutinio tamprumo modulio reikšmių skirtumo.

Kelio konstrukcijos sutvirtinimo geotinklu vertinimas ir parinkimo schemos sudarymas

Šiame skyriuje atlikta keturių tipų automobilių kelių dangų konstrukcijų dangos nelygumo ir jų sluoksnių tamprumo modulių kitimo statistinė analizė ir rezultatų vertinimas. Nustatomas geotinklų naudojimo tikslingumas ir apibrėžiamos svarbiausios savybės. Atliktas optimalaus geotinklų sutvirtintos žemės sankasos varianto parinkimas taikant daugiakriterinį SAW metodą. Sudaryta geotinklų parinkimo schema ir pateiktos išvados.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta vienoje autoriaus mokslinėje publikacijoje (Šiukščius *et al.* 2019).

3.1. Tyrimo rezultatų statistinės duomenų charakteristikos ir analizė

Eksperimentiniais tyrimais nustatytų automobilių kelių dangos nelygumo bei dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių rezultatų vertinimui yra taikomi matematinės statistikos metodai: aprašomoji statistika, analizės ir interpretavimo metodai.

Aprašomoji statistika – tai duomenų sisteminimo ir grafinio vaizdavimo metodai. Šio metodo taikymas yra labai svarbus statistinės analizės etapas, nes išsamus turimos informacijos aprašymas leidžia suformuoti pagrindžiamas išvadas apie visų turimų duomenų požymius siekiant konkrečiai užrašyti visą duomenų bazėje turimą informaciją.

Esminiai tyrimo duomenis apibūdinantys statistiniai parametrai yra imties vidurkis ir mediana. Imties vidurkis – tai skaičius nurodantis vidutinę reikšmę, aplink kurią išsidėsčiusi visa duomenų aibė ir yra išreiškiamas formule:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

čia: $\bar{x}$ – imties vidurkis; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – duomenų reikšmės.

Mediana – skaičių aibės vidurinis (centrinis) skaičius, kuris aibę dalija į dvi dalis – mažesnių už medianą ir didesnių už medianą. Mediana išreiškiama formule:

$$M_d = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, \text{ kai } n \text{ yra nelyginis}; \quad (3.2)$$

$$M_d = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}, \text{ kai } n \text{ yra lyginis}. \quad (3.3)$$

Tyrimo duomenų sklaidą apibūdinantys statistiniai parametrai yra duomenų aibės plotis, standartinė nuokrypa ir imties kitimo (variacijos) koeficientas.

Duomenų aibės plotis parodo skirtumą tarp didžiausios ir mažiausios reikšmės. Aibės plotis daugeliu atvejų išreiškiamas kvartiliais, kurie apibūdina duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, išreiškiamas taip:

$$DP = x_{(n)} - x_{(1)} = x_{\max} - x_{\min}. \quad (3.4)$$

Kvartilių plotis nurodomas stačiakampe diagrama.

Dažniausiai pasitaikančios reikšmės yra išreiškiamos intervalu, kuris išskiria labiausiai nutolusias reikšmes nuo vidurkio ir jų nevertina dėl galimos neigiamos įtakos bendrajai duomenų sklaidos tendencijai. Viršutinė ir apatinė dažniausiai pasitaikančių reikšmių ribos (DPV) yra apibrėžiamos intervalu:

$$DVP > UB V + o.c. \cdot (UB V - LB V); \quad (3.5)$$

$$DVP < UB V - o.c. \cdot (UB V - LB V), \quad (3.6)$$

čia: $UB V$ – intervalo viršutinė reikšmė ($UB V = \bar{x} + s$ arba 75 % kvartilis); $LB V$ – intervalo apatinė reikšmė ($LB V = \bar{x} - s$ arba 75 % kvartilis); $o.c.$ – išskirtinių reikšmių koeficientas lygus 1,5.

Standartinė nuokrypa s gaunama ištraukus kvadratinę šaknį iš dispersijos s^2 :

$$s = \sqrt{s^2} . \quad (3.7)$$

Dispersija parodo duomenų sklaidą aplink imties vidurkį ir yra išreiškiama formule:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 , \quad (3.8)$$

čia: n – duomenų skaičius; x_i – duomenų reikšmės; $\bar{x}$ – duomenų imties vidurkis.

Kitimo (variacijos) koeficientas skaičiuojamas tik santykių skalės kintamiesiems, turintiems teigiamus vidurkius ($\bar{x} > 0$). Kitimo koeficientas yra bedimensinis (neturintis matavimo vienetų) dydis. Kuo koeficiento reikšmė mažesnė, tuo rezultatas yra stabilesnis. Naudojamas lyginant skirtingų duomenų aibių sklaidas ir išreiškiamas formule:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} . \quad (3.9)$$

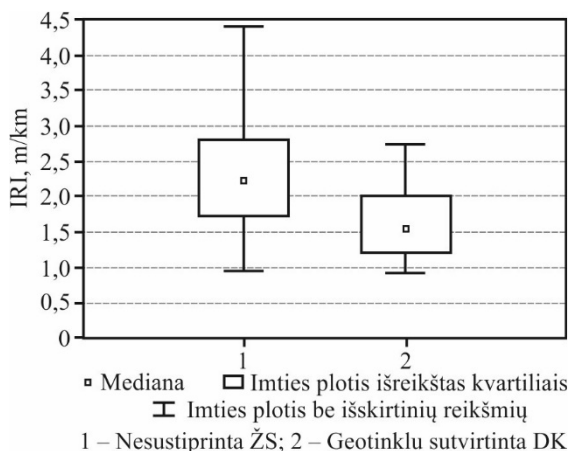
Nustačius kitimo (variacijos) koeficientus galima įvertinti tiriamųjų dangų rezultatų stabilumą ir palyginti ar geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožai virš organinių gruntų sluoksnių, kelio eksploatacijos metu išlaiko panašias kokybines charakteristikas lyginant su ruožais ant nesustiprintos žemės sankasos.

3.1.1. Kelio dangos nelygumo statistinių rezultatų analizė

Remiantis tyrimų duomenimis gautais praėjus ne mažiau kaip 7 eksploatacijos metams po tiriamųjų automobilių kelių ruožų rekonstrukcijos (2.6 poskyris) sudarytas geotinklais sutvirtintos dangos konstrukcijos ir žemės sankasos ruožų dangos nelygumo įvertinimas eksploataavimo laikotarpiui ir atlikta palyginamoji statistinė analizė. Rezultatų palyginimui naudotas vidurkis, mediana ir duomenų aibės plotis, kurie apibūdina kelio dangų konstrukcijos kokybinių parametrų variaciją. Kuo mažesnė yra kelio dangos paviršiaus nelygumo vidutinė reikšmė ir mediana bei siauresnis duomenų aibės plotis, tuo lygesnė yra kelio danga. Šis efektas yra ypatingai svarbus, kai žemės sankasoje sutinkami organiniai gruntai. Organinių gruntų slūgsojimas žemės sankasoje neleidžia užtikrinti reikiamo dangos lygumo, o tai parodo didelės dangos paviršiaus nelygumo vidutinės reikšmės ir didelis duomenų aibės plotis.

Kelio dangų paviršiaus nelygumo palyginimui, ruožuose esančiuose ant skirtingo tipo žemės sankasų, kiekvienam dangų konstrukcijos tipui yra taikoma prielaida, kad kelio dangų konstrukcijos viršutinės dalies deformatyvumo ribojimai užtikrinami panaudojant žemiau kelio dangų konstrukcijos esančios žemės sankasos sutvirtinimo arba sustiprinimo priemones.

Lyginant dangų paviršiaus nelygumą geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir žemės sankasos ruožuose esančiuose virš organinių gruntų pagal dangų konstrukcijos tipus, kurių sluoksniai yra identiški arba labai artimi esantiems ant kito tipo žemės sankasos, nustatyta, kad pirmajam dangų konstrukcijos tipui dangos nelygumo duomenų tolygumas geotinklais sutvirtintai dangų konstrukcijai yra geresnis (3.1 pav.). Dangos nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ruožui (geotinklu sutvirtintas skaldos sluoksnis) yra 1,82 m/km, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 3,45 m/km. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 0,78 m/km ir 1,07 m/km. Tai reiškia, kad geotinklais sutvirtinta dangų konstrukcija esanti virš organinių gruntų, pirmojo tipo dangų konstrukcijos atveju, turi mažesnę dangos nelygumą nei etaloninė žemės sankasa su pakankamo stiprumo gruntais kuriuose nėra organinių gruntų sluoksnių.

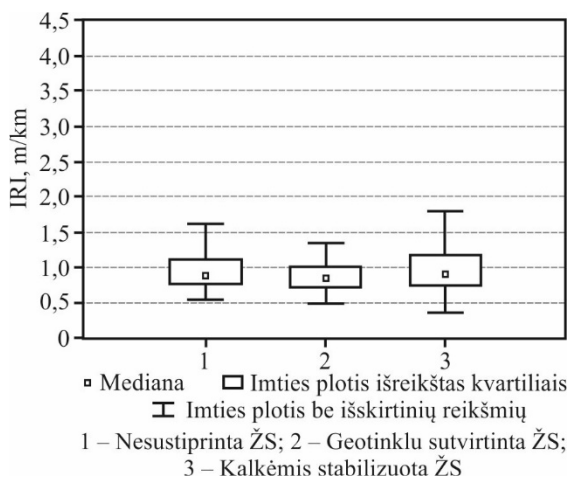


3.1 pav. Dangos nelygumo matavimų rezultatų sklaida pirmajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.1. Pavement roughness measurement value dispersion for the first type of tested road structure

Pabrėžtina tai, kad pirmojo dangų konstrukcijos tipo geologinė sandara geotinklais sutvirtintai konstrukcijai yra sudėtingiausia (2,9 m storio durpių sluoksnis), panaudotas geotinklas yra pats silpniausias (didžiausias trumpalaikis stipris tempiant išilgine ir skersine kryptimis 30 kN/m), o kelio ruožui teko didžiausia perkrova.

Antrojo dangų konstrukcijos tipo dangos nelygumo rezultatų kitimas yra toks pat kaip ir pirmajam dangų konstrukcijos tipui. Čia taip pat dangos nelygumo duomenų tolygumas yra geriausias geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožuose (3.2 pav.).



3.2 pav. Dangos nelygumo matavimų rezultatų sklaida antrajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

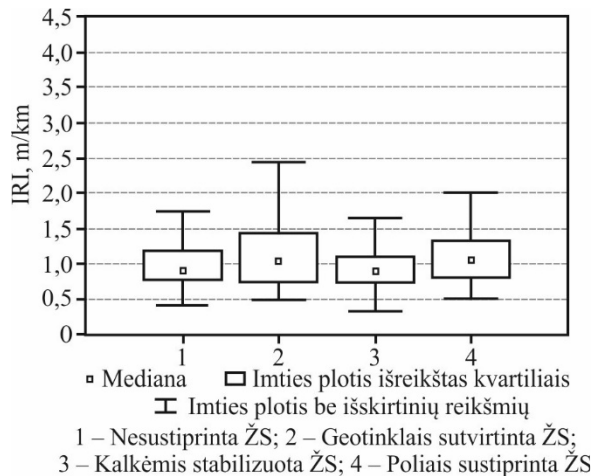
Fig. 3.2. Pavement roughness measurement value dispersion for the first type of tested road structure

Dangos nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 0,84 m/km, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 1,06 m/km. Imties plotis išreikštas kvartiliais atitinkamai yra 0,30 m/km ir 0,35 m/km. Šiuo atveju papildomai galima palyginti ir dangos nelygumo duomenų pasiskirstymą kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožuose virš silpnų molinių gruntų, kuris yra didžiausias šiam dangų konstrukcijos tipui. Dangos nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių yra 1,46 m/km, o imties plotis išreikštas kvartiliais yra 0,43 m/km. Kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų dangos paviršiaus nelygumas yra didžiausias antrajam dangų konstrukcijos tipui.

Vertinant dangos nelygumo duomenų tolygumą trečiojo tipo dangų konstrukcijai (3.3 pav.), pabrėžtina, kad geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožė 46,450–46,720 km apatinis geotinklas yra paklotas tiesiai ant organinio molio, atstumas iki durpių yra 1,0 m, o nusistovėjęs gruntinio vandens lygis tokiam pačiame gylyje t. y. ties durpių paviršiumi. Taip pat, iš visų trečiosios dangų konstrukcijos ruožų su organiniais gruntais, arčiausiai geotinklo esantis durpių sluoksnis yra vidutiniškai susiskaidęs. Tai turi įtakos nežymiai prastesniam dangos nelygumo rezultatui lyginant su kitų tipų žemės sankasomis.

Dangos nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 1,96 m/km, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 1,33 m/km. Imties plotis išreikštas kvartiliais atitinkamai

yra 0,68 m/km ir 0,42 m/km. Pagrindinis trečiosios dangų konstrukcijos geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožų dangos nelygumo rezultatų skirtumas nuo kitų tipų žemės sankasos ruožų yra imties plotis be išskirtinių reikmių. Duomenų aibės plotis išreikštas kvartiliais, apatinėje riboje yra labai artimame lygyje kaip kitų žemės sankasos ruožų, tačiau skiriasi viršutinė riba, kuri geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 0,26 m/km didesnė nei nesustiprintos žemės sankasos ruožams, kurie yra vertinami kaip atskaitos taškas. Imties pločio be išskirtinių reikšmių viršutinės ribos skirtumas yra 0,69 m/km. Dangos nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams yra 1,29 m/km, poliais sustiprintos žemės sankasos ruožams yra 1,52 m/km, o imties plotis išreikštas kvartiliais atitinkamai yra 0,36 m/km ir 0,52 m/km. Šiuo atveju, mažiausia duomenų sklaida išreikšta kvartiliais yra kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams, o tai yra nežymiai geriau už nesustiprintos žemės sankasos ruožus kurie yra atskaitos taškas.



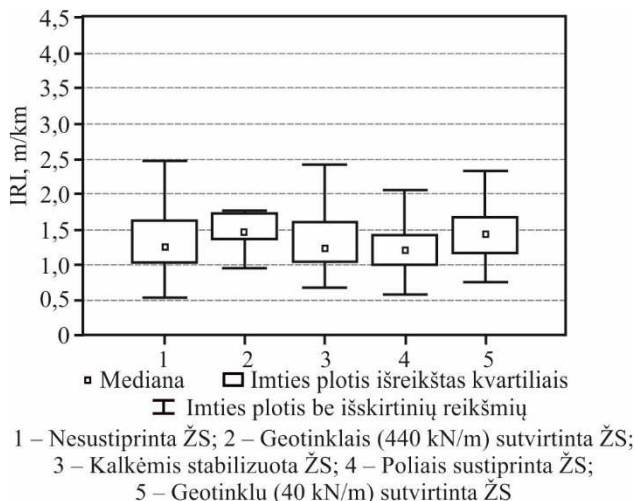
3.3 pav. Dangos nelygumo matavimų rezultatų sklaida trečiajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.3. Pavement roughness measurement value dispersion for the third type of tested road structure

Daugiausiai skirtingų žemės sankasos tipų dangos nelygumo duomenų sklaidai palyginti yra ketvirtojo tipo dangos konstrukcijos ruožuose (3.4 pav.).

Imties plotis be išskirtinių reikšmių yra didžiausias nesustiprintos žemės sankasos ruožams (1,97 m/km), kurie tyrime yra vertinami kaip atskaitos taškas, kai mažiausias imties plotis be išskirtinių reikšmių yra geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožams (0,82 m/km). Vertinant duomenų aibės plotį išreikštą kvartiliais, viršutinės ribos rezultatas geotinklais sutvirtintos žemės

sankasos ruožams yra 0,10–0,31 m/km prastesnis už kitų žemės sankasos tipų ruožus.



3.4 pav. Dangos nelygumo matavimų rezultatų sklaida ketvirtajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

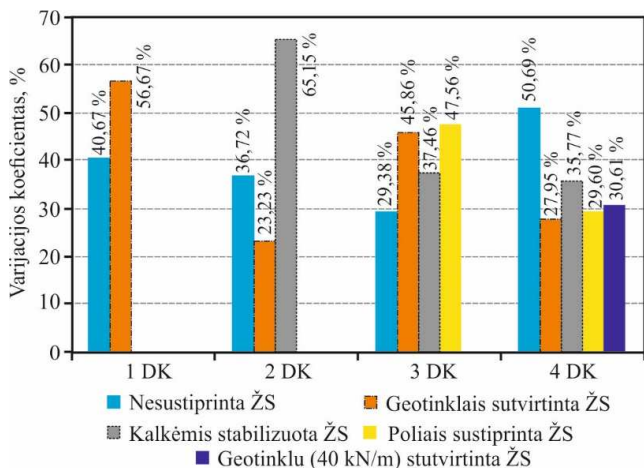
Fig. 3.4. Pavement roughness measurement value dispersion for the fourth type of tested road structure

Ketvirtojo tipo dangų konstrukcijoje tiesiogiai galima palyginti du skirtingus žemės sankasos sutvirtinimo geotinklais sprendinius. Žymiai stipresniais geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožas, lyginant su silpnėsiu geotinklu (40 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožais, turi 0,85 m/km mažesnę kelio dangos nelygumo duomenų sklaidą atsižvelgiant į imties plotį be išskirtinių reikšmių ir 0,13 m/km mažesnę kelio dangos nelygumo duomenų sklaidą atsižvelgiant į duomenų aibės plotį išreikštą kvartiliais. Kur kas stipresnių geotinklų panaudojimas leidžia užtikrinti geresnį dangos lygumą. Tačiau atsižvelgiant į geologinę sandarą, silpnėsiu geotinklu (40 kN/m) ruožas yra 1,15 m arčiau durpių sluoksnio kuris yra 0,3 m storesnis, o gruntinio vandens lygis yra 1,10 m arčiau geotinklo paklojimo vietos. Stipresniais geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožo viršutinė imties pločio be išskirtinių reikšmių riba yra 1,76 m/km, o silpnėsiu geotinklu (40 kN/m) ruožo atitinkamai yra 2,40 m/km. *IT ASFALTAS 08*, po 2018 metų liepos 5 dienos pakeitimų nurodyta, kad naujai paklotos dangos nelygumo, ribinė reikšmė pagal IRI reikalavimus, darbų priėmimo metu, turi būti ne didesnė kaip 1,5 m/km. Nustatyta, kad stipresniais geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožo nelygumo reikšmė viršija ribinę reikšmę tik 0,26 m/km, kai silpnėsiu geotinklu (40 kN/m) ruožas viršija

0,90 m/km. Tai parodo, kad žymiai stipresnių geotinklų panaudojimas suteikia papildomą teigiamą efektą dangos lygumo rezultatui.

Pagal geologinę sandarą, tiriamasis kelio A6 ruožas 139,440–139,925 km turintis vieną 40 kN/m stiprumo geotinklo sluoksnį žemės sankasos sutvirtinimui yra arčiausiai (0,58 m) gerai susiskaidžiusių durpių sluoksnio (0,70 m). Toliau seka kelio 131 ruožas 46,450–46,720 km, nuo geotinklo turintis 1,00 m atstumą iki 1,20 m storio vidutiniškai susiskaidžiusių durpių sluoksnio bei ruožų 45,965–46,140 km ir 46,865–46,950 km, kuriuose atstumas atitinkamai yra 1,22 m ir 1,20 m, o gerai susiskaidžiusių durpių sluoksnių storai atitinkamai yra 0,50 m ir 0,80 m. Dėl šios priežasties palyginus panašios geologinės sandaros tiriamojo kelio A6 ruožo 139,440–139,925 km dangos nelygumo reikšmės su trečiojo dangų konstrukcijos tipo, kuriam priklauso tiriamojo kelio ruožai 45,965–46,140 km, 46,450–46,720 km ir 46,865–46,950 km, pastebėta, kad nelygumo duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių yra labai panašus, atitinkamai 1,65 m/km ir 1,96 m/km.

Nustačius kitimo (variacijos) koeficientus galima įvertinti tiriamųjų ruožų dangos nelygumo duomenų stabilumą ir palyginti ar geotinklais sutvirtinti dangų konstrukcijos ir žemės sankasos ruožai virš organinių gruntų sluoksnių eksploatavimo metu išlaiko panašias kokybines kelio charakteristikas su nesustiprintos žemės sankasos ruožais, kurie yra atskaitos taškas. Mažesnis kitimo koeficientas nurodo, kad gautas rezultatas yra geresnis. Pagal diagramoje (3.5 pav.) pateiktus rezultatus, pirmojo ir trečiojo dangų konstrukcijos tipų dangos nelygumo variacijos koeficientas geotinklais sutvirtintai žemės sankasai yra prastesnis nei nesustiprintai žemės sankasai.



3.5 pav. Kitimo koeficientai visiems dangų konstrukcijos tipams pagal dangos nelygumą

Fig. 3.5. Variation coefficients for all types of pavement structure according to pavement roughness

Antrojo ir ketvirtojo dangų konstrukcijos tipų dangos nelygumo variacijos koeficientas geotinklais sutvirtintai žemės sankasai yra geresnis nei nesustiprintai žemės sankasai ar kitiems žemės sankasos tipams. Mažiausią dangos nelygumo variacijos koeficientą turi būtent antrojo dangų konstrukcijos tipo geotinklais sutvirtinta žemės sankasa, o didžiausią – to paties konstrukcijos tipo kalkėmis stabilizuota žemės sankasa.

Pastebėtas didžiausias dangos nelygumo variacijos koeficientas geotinklais sutvirtintai dangų konstrukcijai ir žemės sankasai, kuri turi pirmoji ir trečioji dangų konstrukcijos. Šis rezultatas pirmajam dangų konstrukcijos tipui yra grindžiamas tuo, kad išmatuota apkrova A praėjus pusei projektinio kelio eksploataavimo laikotarpio jau yra pasiekusi 77,90 % didžiausios leistinos projektinės apkrovos ($A_i = 0,80$ mln.) 20 metų laikotarpiui IV dangų konstrukcijos klasei, geotinklas yra silpniausias ir netenkinantis mažiausių geotinklui keliamų reikalavimų pagal *MN GEOSINT ŽD 13*. Trečiosios dangų konstrukcijos piltinio grunto sluoksnio storis tarp apatinio geotinklo ir durpių sluoksnio yra tik 1,0 m ir tai yra mažiausias piltinio grunto sluoksnio storis iš visų tiriamųjų ruožų, neskaitant A6 kelio 139,440–139,925 km, kuriame tiksli geotinklo paklojimo vieta nėra žinoma, o durpės tame ruože yra vidutiniškai susiskaidžiusios.

Lyginant visus dangų konstrukcijos tipus yra pastebima, kad kelio dangos nelygumo variacijos koeficiento procentinė išraiška didėja, didėjant organinio grunto sluoksnio storiui bei mažėjant piltinio grunto sluoksnio storiui tarp geotinklo ir durpių sluoksnio. Tai parodo, kad kuo žemės sankasoje yra didesnis organinio grunto sluoksnio storis ir kuo mažesnis piltinio grunto storis tarp geotinklo ir organinio grunto, tuo didesnis yra kelio dangos nelygumas.

3.1.2. Kelio dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių statistinių rezultatų analizė

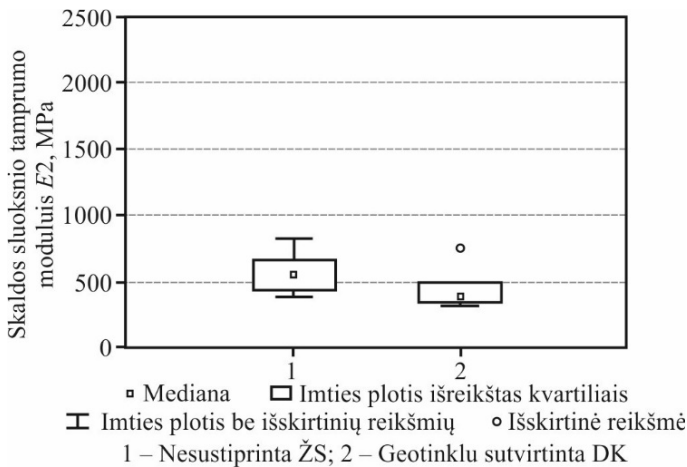
Nustatant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos įtaką kelio dangos funkcionalumo užtikrinimui jos eksploataavimo metu, įvertinama ir kelio dangų konstrukcijos skaldos bei apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio duomenų sklaida.

Dangų konstrukcijos skaldos bei apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulių palyginimui, skirtingo tipo žemės sankasų kiekvienam dangų konstrukcijos tipui yra taikoma prielaida, kad veikiant papildomai apkrovai kelio eksploatacijos laikotarpiu, žemiau automobilių kelio dangų konstrukcijos ir piltinio grunto esančių organinių sluoksnių laikomoji galia ir deformatyvumas neturi inžineriškai reikšmingos įtakos aukščiau esančių dangų konstrukcijos sluoksnių bendrajam nuosėdžiui.

Kelio dangų konstrukcijos skaldos bei apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnių tamprumo modulio statistinių rezultatų analizė pateikiama analogiška tvarka kelio

dangos nelygumo statistinių rezultatų analizei. Palyginami dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio rezultatai geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir žemės sankasos ruožuose esančiuose virš organinių gruntų pagal dangų konstrukcijos tipus, kurių sluoksniai yra identiški arba labai artimi esantiems ant kito tipo žemės sankasos.

Pirmasis dangų konstrukcijos tipas turintis mažesnes vidurkio ir medianos reikšmes bei turintis vieną išimtinę reikšmę, parodė kur kas mažesnę skaldos sluoksnių tamprumo modulio duomenų sklaidą geotinklais sutvirtintai dangų konstrukcijai (3.6 pav.).



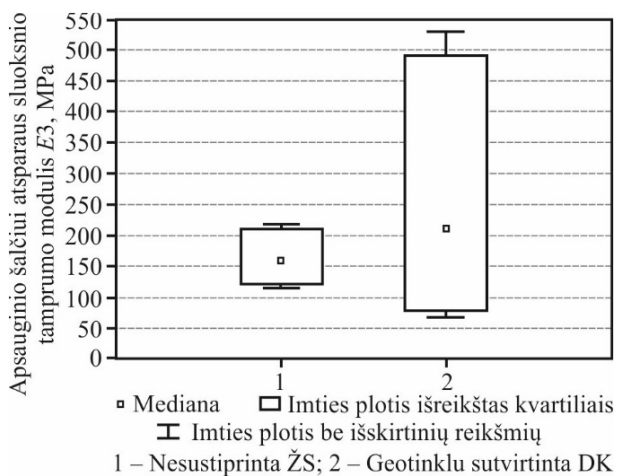
3.6 pav. Skaldos sluoksnių tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida pirmajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.6. Elasticity modulus measurement value dispersion of the crushed stone layer for the first type of tested road structure

Skaldos sluoksnių tamprumo modulių duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ruožui (geotinklu sutvirtintas sluoksnis) yra 173 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 432 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 99 MPa ir 208,5 MPa. Rezultatas atitinka ir dangos paviršiaus nelygumo duomenų sklaidą šiam tiriamajam ruožui ir patvirtina, kad geotinklais sutvirtinta žemės sankasa esanti virš organinio grunto pirmojo tipo dangų konstrukcijai suteikia daugiau laikomosios gebos tolygumo nei esama žemės sankasa kuriai nereikalingas papildomas sustiprinimas.

Palyginus apsauginių šalčių atsparių sluoksnių tamprumo modulių duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ruožui yra 464 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 101 MPa.

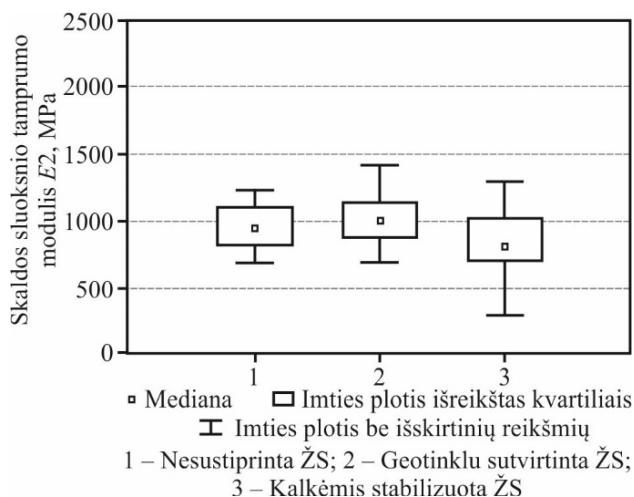
Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 357,75 MPa ir 78,25 MPa (3.7 pav.). Rezultatas patvirtina, kad geotinklais sutvirtintas skaldos sluoksnis kelio dangos lygumui įtaką turi dėl tolygaus tamprumo modulių rezultatų pasiskirstymo. Tačiau žemės sankasai, dirbančiai kaip apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis, geotinklo poveikis tamprumo modulių rezultatų pasiskirstymui yra nežymus arba jo nėra. Dėl šios priežasties taip yra neutralizuojamas ir žemiau esančių organinių gruntų neigiamas poveikis pirmojo tipo dangų konstrukcijai sutvirtintai geotinklu.



3.7 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida pirmajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

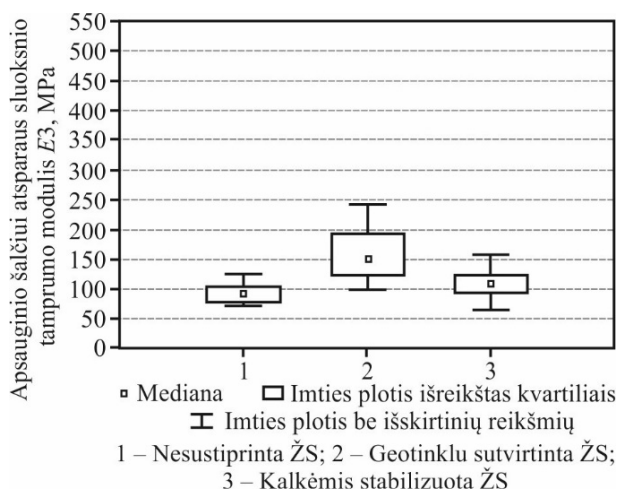
Fig. 3.7. Elasticity modulus measurement value dispersion of the frost blanket course for the first type of tested road structure

Vertinant antrosios dangų konstrukcijos tamprumo modulių duomenų sklaidą (3.8 pav.), nustatyta, kad imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 727 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 546 MPa, o kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams jis yra 999 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 254,25 MPa, 230,25 MPa ir 301,2 MPa. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (3.9 pav.) tamprumo modulio duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 144 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 51 MPa, o kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams jis yra 92,3 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 69 MPa, 20 MPa ir 23,75 MPa.



3.8 pav. Skaldos sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida antrajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.8. Elasticity modulus measurement value dispersion of the crushed stone layer for the second type of tested road structure



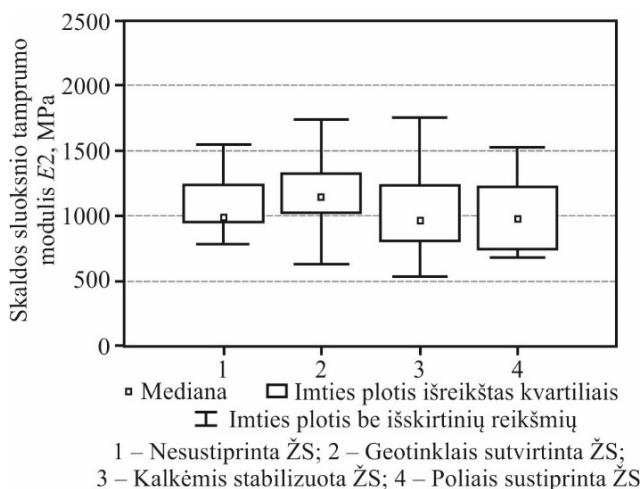
3.9 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida antrajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.9. Elasticity modulus measurement value dispersion of the frost blanket course for the second type of tested road structure

Antrojo tipo dangų konstrukcijos atveju geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožuose skaldos sluoksnio duomenų sklaida yra artima nesustiprintos žemės

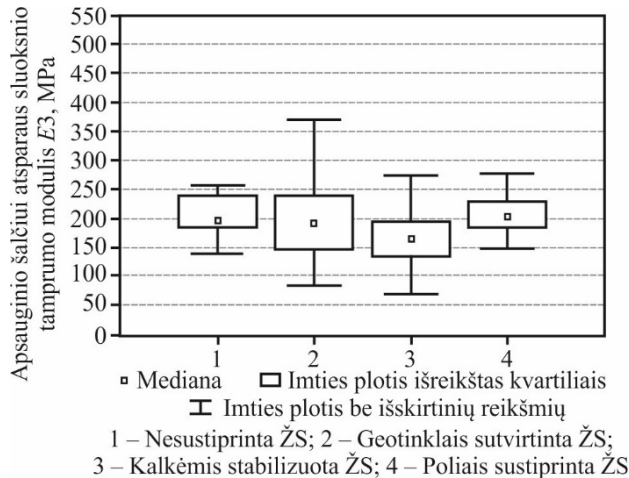
sankasos duomenų sklaidai, o kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožuose duomenų sklaida yra kur kas prastesnė. Tačiau apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio duomenų sklaida geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams nepatvirtina duomenų kitimo pobūdžio matomo skaldos sluoksniui, nors tamprumo modulio vidutinė reikšmė ir mediana yra gerokai didesnės už nesustiprintos ir kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų rezultatus, tamprumo modulio duomenų sklaida yra kur kas prastesnė.

Lyginant trečiosios dangų konstrukcijos tamprumo modulių duomenų sklaidą (3.10 pav.), nustatyta, kad imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 1110 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 769 MPa, kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams jis yra 1221,5 MPa ir poliais sustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 848,6 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 303 MPa, 280 MPa, 395,7 MPa ir 465 MPa. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (3.11 pav.) tamprumo modulio duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 285 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 119 MPa, kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams jis yra 204,8 MPa ir poliais sustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 129 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 91 MPa, 55 MPa, 60,5 MPa ir 38,25 MPa.



3.10 pav. Skaldos sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida trečiajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.10. Elasticity modulus measurement value dispersion of the crushed stone layer for the third type of tested road structure



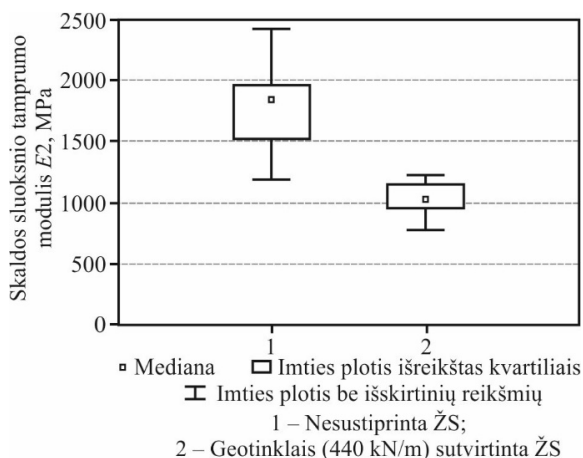
3.11 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida trečiajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.11. Elasticity modulus measurement value dispersion of the frost blanket course for the third type of tested road structure

Trečiojo tipo dangų konstrukcijos atveju geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožuose skaldos sluoksnio tamprumo modulio vidutinė reikšmė ir mediana yra didžiausios, tačiau tamprumo modulių duomenų sklaida yra geresnė tik už kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos duomenų sklaidą. Kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožuose duomenų sklaida yra pati didžiausia. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio duomenų sklaida geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra didžiausia ir lyginant imties pločio be išskirtinių reikšmių vertes ji yra 139,5 % didesnė už atskaitos tašką laikomą nesustiprintos žemės sankasos reikšmę, o tamprumo modulio mediana yra didesnė tik už kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų rezultatus. Šis duomenų sklaidos rezultatas parodo, kad dviejų geotinklų panaudojimas žemės sankasoje neprideda apčiuopiamos teigiamos įtakos laikomosios gebos tolygumui dangų konstrukcijos sluoksniuose.

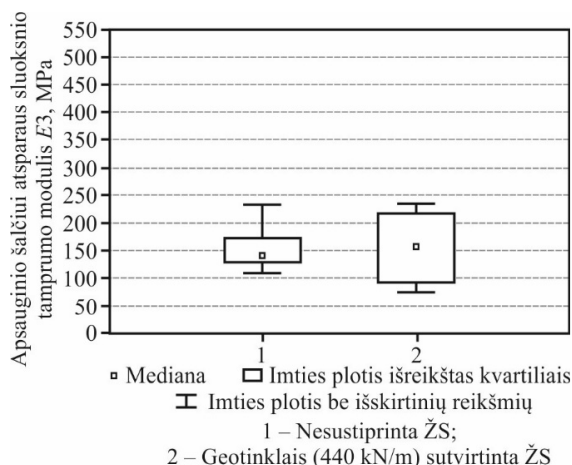
Vertinant ketvirtosios dangų konstrukcijos skaldos sluoksnio tamprumo modulio duomenų sklaidą (3.12 pav.), nustatyta, kad imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams yra 445 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 1226 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 153 MPa ir 364,75 MPa. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (3.13 pav.) tamprumo modulio duomenų imties plotis be išskirtinių reikšmių geotinklais sutvirtin-

tos žemės sankasos ruožams yra 160 MPa, kai nesustiprintos žemės sankasos ruožams jis yra 124 MPa. Imties plotis išreikštas kvartiliais, apibūdinančiais duomenų sklaidą nuo 25 % iki 75 %, atitinkamai yra 113 MPa ir 42,5 MPa.



3.12 pav. Skaldos sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida ketvirtajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

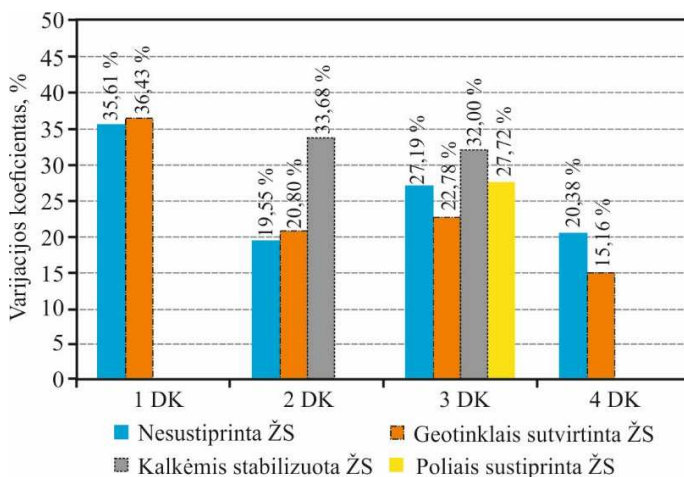
Fig. 3.12. Elasticity modulus measurement value dispersion of the crushed stone layer for the fourth type of tested road structure



3.13 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio matavimų rezultatų sklaida ketvirtajam tiriamajam dangų konstrukcijos tipui

Fig. 3.13. Elasticity modulus measurement value dispersion of the frost blanket course for the fourth type of tested road structure

Ketvirtojo tipo dangų konstrukcijos atveju geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruože skaldos sluoksnio duomenų sklaida yra kur kas mažesnė lyginant su nesustiprintos žemės sankasos duomenų sklaida. Lyginant imties pločio be išskirtinių reikšmių vertes ji yra 63,70 % mažesnė už atskaitos tašku laikomą nesustiprintos žemės sankasos reikšmę. Tačiau tamprumo modulių vidutinė reikšmė ir mediana yra gerokai mažesnės už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatus. Atsižvelgiant į dangos nelygumo duomenų imties plotį be išskirtinių reikšmių pastebėta, kad nors tamprumo modulių vidutinė ir medianos reikšmės yra mažesnės, nelygumo imties plotis be išskirtinių reikšmių yra mažiausias geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožui. Tai parodo, kad dangos nelygumui daugiau įtakos turi mažesnė tamprumo modulių duomenų sklaida, o ne vidutinių ar medianos reikšmių dydis. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio duomenų sklaida geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams priešingai nei skaldos sluoksniui, yra nežymiai didesnė už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatus, o tamprumo modulio vidutinė reikšmė ir mediana yra nežymiai didesnės už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatus.



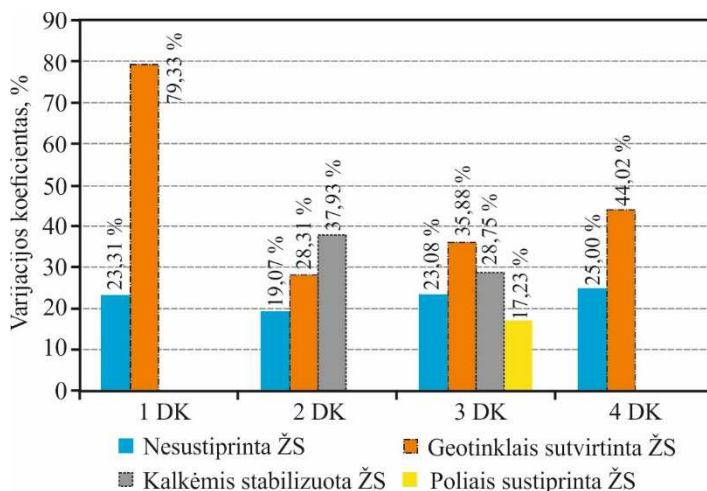
3.14 pav. Skaldos sluoksnio tamprumo modulio variacijos koeficientai visiems dangų konstrukcijų ir žemės sankasos tipams

Fig. 3.14. Coefficient of variation values of crushed stone layer elasticity modulus for all types of pavement structure and subgrade

Pagal variacijos koeficientų reikšmes (3.14 pav.), pirmojo dangų konstrukcijos tipo nesustiprintos žemės sankasos skaldos sluoksnio tamprumo modulio rezultatų variacijos koeficientas yra 0,82 % geresnis už geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ruožo rezultatus. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio

tamprumo modulio variacijos koeficientas (3.15 pav.) nesustiprintos žemės sankasos ruožams yra 23,31 % ir neišsiskiria iš kitų tyrime esančių ruožų. Tačiau geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos žemės sankasos, kuri tarnauja kaip apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis, variacijos koeficientas yra net 79,33 %. Šis rezultatas dar kartą patvirtina, kad geotinklas paklotas po skaldos sluoksniu sugeba kompensuoti didelį žemės sankasos tamprumo modulių netolygumą, išlaikydamas tinkamą dangos lygumą.

Antrajam dangų konstrukcijos tipui variacijos koeficiento reikšmės parodė panašų rezultatą kaip ir imties pločio rezultatai, kur šiuo atveju nesustiprintos žemės sankasos ruožai turi mažiausias variacijos koeficientų reikšmes, tačiau geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožų variacijos koeficientų reikšmės prastesnės tik 1,25 % skaldos sluoksniui ir 9,24 % apsauginiam šalčiui atspariam sluoksniui. Kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožai kuriuose nėra organinių gruntų lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožais yra prastesni 14,13 % skaldos sluoksniui ir net 18,86 % apsauginiam šalčiui atspariam sluoksniui.



3.15 pav. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio variacijos koeficientai visiems dangų konstrukcijų ir žemės sankasos tipams

Fig. 3.15. Coefficient of variation values of frost blanket course elasticity modulus for all types of pavement structure and subgrade

Atsižvelgiant į variacijos koeficientų reikšmes trečiajam dangų konstrukcijos tipui pastebėta kiek kitokia situacija, nei pirmajam ir antrajam dangų konstrukcijos tipams. Šiuo atveju, pagal variacijos koeficiento reikšmes skaldos sluoksniui (3.14 pav.), geriausias rezultatas nustatytas geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams. Vertinant nesustiprintos žemės sankasos ruožus kaip atskaitos tašką,

geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožai pasižymi 4,41 % geresniu rezultatu. Poliais sustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatas yra 0,53 % prastesnis, o kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožų rezultatas yra 4,81 % prastesnis už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatą. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio variacijos koeficiento (3.15 pav.) rezultatas poliais sustiprintos žemės sankasos ruožams yra 5,85 % geresnis, o kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožams 5,67 % bei geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožams 12,8 % prastesnis už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatą. Palyginant pirmojo, antrojo ir trečiojo dangų konstrukcijos tipų dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulio rezultatų variacijos koeficientus, geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožai pasižymi iki 12,8 % variacijos koeficiento skirtumu, lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožais. Kalkėmis stabilizuotos žemės sankasos ruožai pasižymi iki 18,86 % variacijos koeficiento skirtumu, lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožais.

Ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui, pagal variacijos koeficiento reikšmę, geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos skaldos sluoksnio tamprumo modulio rezultatų variacijos koeficientas yra 25,61 % mažesnis už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatus. Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio rezultatų variacijos koeficientas geotinklais (440 kN/m) sutvirtintos žemės sankasos ruožui yra 76,08 % prastesnis už nesustiprintos žemės sankasos ruožų rezultatą, o tai atitinka imties pločio be išskirtinių reikšmių ir imties pločio išreikšto kvartiliais parodytus rezultatus.

Remiantis atlikta statistine analize, skaldos ir apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnių tamprumo modulių duomenų imties pločio ir variacijos koeficiento rezultatais, nustatyta, kad geotinklais sutvirtintos žemės sankasos ruožai turi mažesnę arba labai panašaus lygmens duomenų sklaidą skaldos tamprumo moduliui lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožais. Tačiau apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio duomenų sklaida visuomet yra didesnė. Lyginant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos tamprumo modulio variacijos koeficientus su kalkėmis stabilizuotos ir poliais sustiprintos žemės sankasos ruožų variacijos koeficientais, nustatyta, kad tik trečiosios dangų konstrukcijos apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulio variacijos koeficientas yra didesnis už kalkėmis stabilizuotos ir poliais sustiprintos žemės sankasos ruožus. Tai lemia piltinio grunto sluoksnio storis tarp apatinio geotinklo ir organinio grunto sluoksnio, kuris yra tik 1,0 m ir antro geotinklo sluoksnis, kuris yra papildomai įgilintas per 0,30 m ir nebegali suteikti papildomo teigiamo efekto dangų konstrukcijos sluoksniams.

Vertinant kelio dangos nelygumo variacijos koeficientų rezultatus nėra nustatyta, kad dangų konstrukcijos tamprumo modulių variacijos koeficientų rezultatai būtų kintantys atitinkamai. Dėl šios priežasties geotinklų ilgalaikės įtakos kelio

dangos nelygumui negalima tiesiogiai susieti su kelio dangų konstrukcijų sluoksnių tamprumo moduliais.

3.2. Optimalaus geotinklu sutvirtintos žemės sankasos varianto parinkimas taikant daugiakriterinį SAW metodą

Optimalaus geotinklais sutvirtintos žemės sankasos geotinklo parinkimas iš keleto variantų vertinant daug kriterijų yra sudėtingas uždavinys, todėl tokio uždavinio sprendimui yra taikomas daugiakriterinis sprendimo priėmimo metodas. Daugiakriterinio uždavinio sprendimui yra taikomi keli įvairaus sudėtingumo daugiakriterinio sprendimo priėmimo metodai. Dažniausiai taikomas metodas yra SAW (angl. *Simple Additive Weighting*) vertinantis kriterijų reikšmių ir jų reikšmingumų sandaugų sumas (Ginevičius *et al.* 2008). Būtent šiuo metodu yra nustatomas optimalus geotinklo naudojamo žemės sankasos sustiprinimui variantas.

Taikant SAW metodą, išeities duomenys yra suvedami į sprendimų matricą M , kuri yra sudaryta iš skaitinių reikšmių ir jos rodikliams priskirtų reikšmingumo parametrų $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. Reikšmingumo verčių suma visuomet turi būti lygi vienetui (MacCrimmon 1968) (3.10 formulė):

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1. \quad (3.10)$$

Sprendžiant daugiakriterinį uždavinį šiuo metodu pirmiausia yra normalizuojama sudaryta sprendimų priėmimo matrica. Jos normalizavimas yra matricos perdėbimas siekiant suvienodinti rodiklių dimensijas arba kitaip pakeisti jų reikšmes išlaikant tą patį santykį tarp atskirų rodiklių. Sprendimų priėmimo matricos narių normalizavimui yra taikomos formulės 3.11, 3.12 ir 3.13 (MacCrimmon 1968). Kai matricos nariai yra maksimizuojami:

$$\bar{\chi}_{ij} = \frac{\chi_{ij}}{\chi_{ij}^*}. \quad (3.11)$$

Kai matricos nariai yra minimizuojami:

$$\bar{\chi}_{ij} = \frac{\chi_j^{\min}}{\chi_{ij}}, \quad (3.12)$$

čia $\chi_j^* = \chi_{ij}^{\max}$.

Turint normalizuotą sprendimų priėmimo matricą kiekvienas jos narys dauginamas iš jo reikšmingumo ir sudedamas su kitais taip pat gautais eilutės nariais. Gauta suma yra padalinama iš reikšmingumų sumos kuriai taikoma matematinė variantų racionalumo išraiška (MacCrimmon 1968) (3.13 formulė):

$$A = \left\{ A_i \mid \max_i \sum_{j=1}^n \bar{q}_j \bar{x}_{ij} / \sum_{j=1}^n \bar{q}_j \right\}. \quad (3.13)$$

Optimaliam geotinklams sutvirtintos žemės sankasos geotinklo variantui parinkti yra naudojami šie vertinimo kriterijai:

A1 – kelio dangos vidutinės nelygumo reikšmės padidėjimas po 7 eksploatacijos metų, %;

A2 – išmatuotos ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičius, mln. ciklų;

A3 – kelio dangos vidutinės nelygumo reikšmės variacijos koeficientas, %;

A4 – geotinklų suminis stipris tempiant esant 1 % pailgėjimui, kN/m;

A5 – didžiausias organinio grunto sluoksnio storis, m;

A6 – mažiausias piltinio grunto sluoksnio storis tarp geotinklo ir organinio grunto sluoksnio, m;

A7 – panaudotų geotinklų suminė projektinė kaina, €/m².

Visiems šiems parinktiems vertinimo kriterijams yra priskiriamas vertinimo kriterijaus reikšmingumo koeficientas. Kuo reikšmingesnis yra vertinimo kriterijus, tuo didesnis yra reikšmingumo koeficientas. Sprendimų priėmimo matricą sudaro keturios geotinklų konstrukcijos panaudotos žemės sankasos sutvirtinimui ir joms priskirti vertinimo kriterijai su reikšmingumo rodikliais (3.1 lentelė). Disertacijos autoriaus nuomone, atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus ir teorinius duomenis, svarbiausias vertinimo kriterijus yra ilgalaikio kelio dangos nelygumo prieaugis, kuriam yra suteiktas reikšmingumo koeficientas 0,25. Sekantis labai svarbus kriterijus yra išmatuotos ekvivalentinės 10 t svorio ašies apkrovų skaičius, kuriam yra suteiktas reikšmingumo koeficientas 0,20. Taip pat, svarbus kriterijus yra kelio dangos nelygumo variacijos koeficientas, nes jis geriausiai parodo kelio dangos nelygumo kitimą tiriamuosiuose ruožuose, todėl jam yra suteiktas reikšmingumo koeficientas 0,15. Kitas svarbus kriterijus yra geotinklų stipris tempiant esant 1 % pailgėjimui, kuris apibrėžia gaminio standumą esant mažoms deformacijoms, todėl šiam kriterijui yra suteiktas reikšmingumo koeficientas 0,15. Kitos dvi gana svarbios savybės yra didžiausias organinio grunto sluoksnio storis bei mažiausias piltinio grunto sluoksnio storis tarp geotinklo ir organinio grunto sluoksnio, nuo kurių taip pat priklauso kelio dangos nelygumo kitimas, todėl šiems kriterijams yra suteikti reikšmingumo koeficientai po 0,10. Mažiausiai svarbus kriterijus yra geotinklų kaina, nes ji sudaro labai mažą kaštų dalį, jeigu vertintume silpnos žemės sankasos iškasmą ir pakeitimą drenuojančiu gruntu kai gylis siekia iki 5 m, todėl kainai yra suteiktas reikšmingumo koeficientas 0,05.

3.1 lentelė. Optimalaus geotinklų varianto priėmimo matrica

Table 3.1. Decision making matrix for optimal geogrid structure

Geotinklų konstrukcija	Vertinimo kriterijus						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Pirmoji DK	5,17	0,62	56,67	6,00	2,90	2,30	1,57
Antroji DK	3,53	0,78	23,23	12,00	1,30	1,65	2,90
Trečioji DK	22,11	0,88	45,86	24,00	1,30	1,00	5,80
Ketvirtoji DK	15,83	1,60	27,95	120,00	0,40	1,73	14,00
Rodiklių reikšmingumas q	0,25	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,05
Minimizuojamas ar maksimizuojamas	min	max	min	max	max	min	min

Atliekant daugiakriterinę analizę yra taikomi tam tikri analizuojamo metodo apribojimai pagal turimus duomenis:

- nevertinama įšalo įtaka;
- nevertinama įrengimo darbų kokybės įtaka;
- nevertinamas geotinklu sutvirtinto sluoksnio tamprumo modulio variacijos koeficientas, nes pirmosios dangų konstrukcijos atveju geotinklas yra pačioje dangų konstrukcijoje po skaldos pagrindo sluoksniu, o visais kitais atvejais žemės sankasoje;
- nevertinamas ketvirtojoje dangų konstrukcijoje esantis 40 kN/m stiprio geotinklu sutvirtintas žemės sankasos ruožas, nes dėl archyvinių duomenų trūkumo nėra galimybės tiksliai įvertinti geotinklo paklojimo vietą.

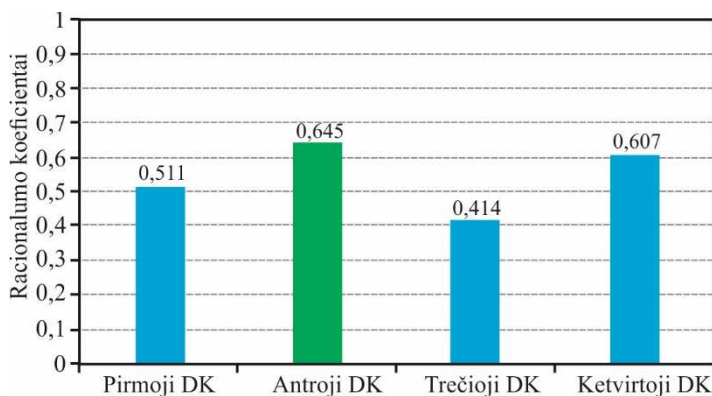
Pagal turimą sprendimų priėmimo matricą su nustatytais rodiklių reikšmingumais sudaroma normalizuota matrica (3.14 formulė).

$$M = \begin{bmatrix} 0,171 & 0,078 & 0,061 & 0,008 & 0,100 & 0,043 & 0,050 \\ 0,250 & 0,097 & 0,150 & 0,015 & 0,045 & 0,061 & 0,027 \\ 0,040 & 0,110 & 0,076 & 0,030 & 0,045 & 0,100 & 0,014 \\ 0,056 & 0,200 & 0,124 & 0,150 & 0,014 & 0,058 & 0,006 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Atlikus skaičiavimus pagal SAW metodą nustatytas geotinklais sutvirtintos žemės sankasos geotinklų konstrukcijų pasiskirstymas pagal gautus racionalumo koeficientus. Rezultatai pateikti 3.16 pav.

Atlikus keturių geotinklų konstrukcijų panaudotų žemės sankasos sutvirtinimui racionalaus sutvirtinimo tipo parinkimo analizę, nustatytas geriausias geotinklo tipas žemės sankasos sutvirtinimui, tai yra vienas sluoksnis 60/60 kN/m stiprio tempiant geotinklo iš polipropileno (PP) (antrasis dangų konstrukcijos tipas). Ketvirtoji dangų konstrukcija turinti du geotinklų sluoksnius (200/40 kN/m

ir 400/40 kN/m) iš poliesterio (PET) nežymiai atsilieka nuo pirmosios. Trečioji dangų konstrukcija pagal racionalumo kriterijus patvirtina, kad naudoti antrą geotinklo sluoksnį, jį įgilinant į žemės sankasą, o ne klojant po apsauginiu šalčiui atspariu ar skaldos sluoksniais yra neracionalu.



3.16 pav. Geotinklų konstrukcijų racionalumo koeficientai

Fig. 3.16. Coefficients of geogrid structure rationality

Vertinant visus rezultatus galima teigti, kad automobilių kelių dangų konstrukcijoms žemesnėms nei II klasės naudoti 2 geotinklų sluoksnius nėra racionalu. Pirmosios dangų konstrukcijos atveju, nors 30 kN/m stiprumo geotinklas netenkina mažiausių MN GEOSINT ŽD 13 reikalavimų, jo panaudojimas po skaldos sluoksniu suteikia nemažą papildomą efektą dangų paviršiaus lygumui, ypač tuo atveju, kai automobilių kelio dangų konstrukcija patiria perkrovas.

3.3. Geotinklų naudojimo tikslingumas ir rekomenduojamos savybės

Eksperimentinių tyrimų ruožai parodė, kad geotinklais sutvirtinta dangų konstrukcija ir žemės sankasa, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai, savo savybėmis yra lygiavertė žemės sankasai nereikalaujančiai papildomo sustiprinimo bei ne prastesnė už kalkėmis stabilizuotą žemės sankasą, kurioje nėra organinių gruntų ar už poliais sustiprintą žemės sankasą. Siekiant užtikrinti kelio dangos paviršiaus lygumą ne tik įrengimo metu ir iš karto po jo, bet ir praėjus garantiniam kelio konstrukcijos laikotarpiui (5 metams) yra tikslinga panaudoti žemės sankasos sutvirtinimą geotinklais, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai.

Pagal pirmame skyriuje atliktą mokslinių tyrimų analizę, nustatyta, kad geotinklo panaudojimas ne tik leidžia pasiekti ant silpnų gruntų supilamo grunto reikiamą laikomąją gebą, tačiau tuo pačiu sumažina silpnam gruntui tenkančias apkrovas. Todėl kelio dangos paviršius išlieka funkcionalus, kai žemės sankasoje yra itin silpnų gruntų sluoksnių. Vollmert *et al.* (2014) atlikti tyrimai parodė, kad panašiomis sąlygomis dirbančiuose geotinkluose jų pailgėjimas yra tik 0,04–0,06 %. 1.3 poskyryje nustatyta, kad pagrindinės tokio geotinklų veikimo savybės yra jų standumas, standus mazgas ir pakankamas projektinis ilgalaikis stipris tempiant. Geotinklo standumą labai gerai apibūdina jo stipris tempiant esant mažiems pailgėjimams (Vollmert *et al.* 2014).

3.2 lentelė. Rekomenduojamos geotinklo savybės kai gaminys naudojamas kelio konstrukcijos funkcionalumui užtikrinti, kai žemės sankasoje yra sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai

Table 3.2. Recommended properties for a geogrid that is used to assure performance of the road structure, when up to 3,0 m thick organic soil layers stratify in the subgrade

Savybės	Armavimo funkcijai virš organinių gruntų
Pagrindinė apkrova	abiejų ašių arba izotropinė (abiem kryptimis vienoda)
Trumpalaikis stipris tempiant išilgai/skersai	$F_{k,5\%} \geq 30 \text{ kN/m}$
Minimalus užtikrintas projektinis ilgalaikis stipris tempiant išilgai/skersai 100-tui metų ($F_d = F_{k,5\%} / A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times \gamma$, kur $\gamma = 1,3$)	$F_d \geq 12 \text{ kN/m}$
Minimalaus stiprio tempiant skaičiuotinė vertė, esant 1 % pailgėjimui išilgai/skersai ($F_{d1,0} = F_{1,0} / A_2$, kur $F_{1,0}$ – geotinklo stipris tempiant esant 1% pailgėjimui)	$F_{d1,0} \geq 8 \text{ kN/m}$
Būdingasis kiaurymės matmuo kai užpilo grunto frakcija ne didesnė kaip 0/32	$7,47 \text{ mm} \leq \text{akutės dydis} \leq 44,8 \text{ mm}$
Ilgamžiškumas	Eksplotacijos laikas yra ne trumpesnis nei 100 metų, natūraliuose gruntuose, kurių aplinkinė terpė $4 \leq \text{pH} \leq 9$ bei grunto temperatūra $< 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Atsižvelgiant į esančių norminių techninių dokumentų reikalavimus ir tyrimų ruožų rezultatus, sudaryta rekomendacinė geotinklo reikalaujamų savybių 3.2 lentelė. Lentelė sudaryta remiantis metodinių nurodymų *MN GEOSINT ŽD 13*

pirmojo skaičiavimo pavyzdžio pateikiamais nurodymais geotinklo parinkimui ir jo mažiausių reikalaujamų savybių nustatymui, kurie taikomi visais atvejais. Dokumentas nurodo, kad turi būti aprašoma geotinklo funkcija, pagrindinė apkrova, mažiausias trumpalaikis stipris tempiant, mažiausias projektinis ilgalaikis stipris tempiant, mažiausia stiprio tempiant skaičiuotinė vertė esant 2 % pailgėjimui. Taip pat, *MN GEOSINT ŽD 13* 1 lentelė nurodo, kad grunto armavimo funkcijai naudojamam gaminiui turi būti nurodytas būdingasis kiaurymės matmuo ir ilgaamžiškumas.

Vertinant eksperimentinių tyrimų rezultatus ir jų statistinės analizės rezultatus numatomas mažiausias trumpalaikis stipris tempiant, kuris turi būti ne mažesnis kaip silpniausio tyrime naudoto geotinklo trumpalaikis stipris tempiant. Reikalavimas yra padidinamas 1,5 karto, nuo 20 kN/m iki 30 kN/m. Tokia pačia tvarka padidinamas reikalavimas ir mažiausiam projektiniam ilgalaikiam stipriui tempiant, nuo 8 kN/m iki 12 kN/m. Numatoma, kad gaminio ilgaamžiškumas ir projektinis ilgalaikis stipris tempiant turi būti nurodomas 100-tui metų, nes pagal naujausių Europos standartų (*LST EN 13249:2016*; *LST EN 13250:2016*; *LST EN 13251:2016*) ir Lietuvos Automobilių Kelių Direkcijos normatyvinio techninio dokumento *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 19* nurodymus, gaminyje naudojamas žemės sankasai ir pati žemės sankasa turi tarnauti ne mažiau kaip 100 metų.

Remiantis mokslinių tyrimų (Vollmert *et al.* 2014) ir atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatais, mažiausio stiprio tempiant skaičiuotinės vertės, esant 2 % pailgėjimui reikalavimas turi būti performuluojamas nurodant tokią pačią vertę esant 1 % pailgėjimui. Būdingasis kiaurymės dydis yra nustatomas pagal naudojamo užpilo grunto granulimetrinę sudėtį ir papildomai nekoreguojamas.

3.4. Geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema

Remiantis 2.1 poskyryje apibrėžtu teoriniu geotinklų taikymu automobilių kelių konstrukcijos funkcionalumui užtikrinti, atliktais eksperimentiniais tyrimais, 3.1 poskyryje nustatyta geotinklų įtakai kelio dangos lygumui eksploatavimo metu ir 3.2 lentelėje apibrėžtomis rekomenduojamomis geotinklo savybėmis sudaroma geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema. Šios schemas taikymas užtikrina ilgalaikį kelio dangų konstrukcijos funkcionalumą išlaikant reikalaujamą automobilių kelių dangos lygumą. Schema taikoma atliekant automobilių kelių arba gatvių rekonstravimo projektą ar naują statybą. Geotinklų parinkimo schema pagal eksperimentinių tyrimų rezultatus parodyta 3.17 paveiksle.

Eksperimentiniais tyrimais paremtą geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą sudaro dvi dalys.

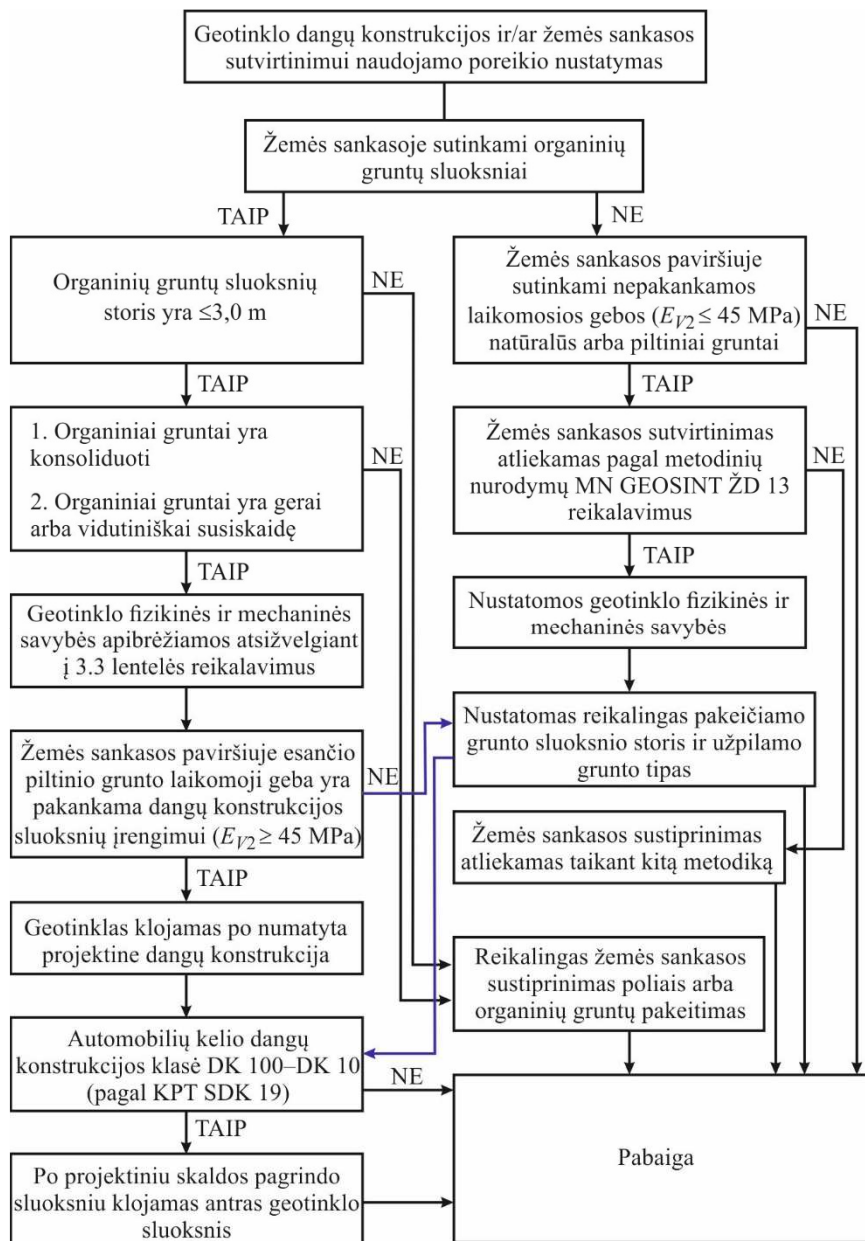


Fig. 3.17. Geogrid usage demand assessment and selection scheme

Pirmoji dalis yra naudojama, kai inžinerinių geologinių tyrinėjimų metu yra nustatomi organinių gruntų sluoksniai žemės sankasoje. Pagrindinės geotinklų konstrukcijos panaudojimo ribinės sąlygos yra organinių gruntų sluoksnio storis sutinkamas žemės sankasoje ir organinių gruntų susiskaidymo laipsnis. Siekiant išvengti organinių gruntų iškasimo ir pakeitimo drenuojančiais gruntais geotinklai be papildomų sustiprinimo priemonių gali būti naudojami dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimui, kai žemės sankasoje yra sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų ir gerai arba vidutiniškai susiskaidžiusių organinių gruntų sluoksniai. Jeigu organinių gruntų sluoksnio storis žemės sankasoje yra didesnis nei 3 m arba organinis gruntas yra mažai susiskaidęs arba nesusiskaidęs, turi būti taikomos papildomos sustiprinimo priemonės (poliai) arba kitos žemės sankasos sustiprinimo priemonės (grunto pakeitimas arba konsolidavimas).

Kai ribinės sąlygos yra tenkinamos yra parenkamos geotinklo savybės nurodytos 3.2 lentelėje ir numatoma geotinklo paklojimo vieta. Jeigu žemės sankasos paviršiaus laikomoji geba yra pakankama, geotinklas turi būti įrengiamas tiesiai po projektine dangų konstrukcija. Jeigu žemės sankasos paviršiaus laikomoji geba yra nepakankama, geotinklas turi būti įrengiamas darant papildomą grunto pakeitimą, kuris nustatomas pagal esamos žemės sankasos laikomąją gebą atsižvelgiant į *MN GEOSINT ŽD 13* reikalavimus.

Atsižvelgiant į 2.5, 2.6, 2.7, 3.1 ir 3.2 poskyriuose pateiktus eksperimentinių tyrimų rezultatus galima teigti, kad pagal *KPT SDK 19*, 9 lentelėje nurodytas standartinių automobilių kelių dangų konstrukcijų klases, DK 100, DK 32 ir DK 10 klasės automobilių kelių dangų konstrukcijoms, tikslinga numatyti antrą geotinklo sluoksnį, dėl automobilių kelių veikiančių apkrovų skaičiaus. Rekomenduojamas antrojo geotinklo sluoksnio paklojimas po dangų konstrukcijoje numatyto skaldos pagrindo sluoksniu. DK 3 ir žemesnės klasės automobilių kelių dangų konstrukcijoms pakanka naudoti vieną geotinklo sluoksnį ant žemės sankasos.

Antroji dalis yra naudojama, kai inžinerinių geologinių tyrinėjimų metu organinių gruntų sluoksniai žemės sankasoje nenustatomi. Toliau geotinklų naudojimo poreikis yra nustatomas įvertinant žemės sankasos laikomąją gebą. Jeigu laikomoji geba tenkina normatyvinių techninių dokumentų keliamus reikalavimus, geotinklai yra nenaudojami. Jeigu yra reikalingas žemės sankasos gruntų laikomosios gebos padidinimas, tada geotinklo parinkimas yra vykdomas pagal *MN GEOSINT ŽD 13* reikalavimus.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Duomenų aibės plotis be išskirtinių reikšmių parodė, kad dangos nelygumo (IRI) duomenų sklaida nesustiprintos (etaloninės) žemės sankasos

ruožams be organinių gruntų yra 1,06–3,45 m/km. Tai rodo didžiausią kelio dangos nelygumo kitimą (2,39 m/km) lyginant su žemės sankasos tipais, kuriems buvo reikalingas sustiprinimas ar sutvirtinimas. Geotinklais sutvirtintų dangų konstrukcijų ir (arba) žemės sankasos ruožų duomenų aibės plotis be išskirtinių reikšmių (0,82–1,96 m/km (1,14 m/km)) yra didesnis lyginant su kalkėmis stabilizuotos (1,29–1,46 m/km (0,17 m/km)) ir poliais sustiprintos (1,49–1,52 m/km (0,03 m/km)) žemės sankasos tipams nustatytais duomenų aibių pločiais.

2. Nustatyti dangos nelygumo (IRI) variacijos koeficientai parodė, kad geotinklais sutvirtinta dangų konstrukcija ir (arba) žemės sankasa (23,23–56,67 %), palyginus su nesustiprinta žemės sankasa (29,38–50,69 %), kalkėmis stabilizuota žemės sankasa (35,77–65,15 %) ir poliais sustiprinta žemės sankasa (29,60–47,56 %) pasiekia labai panašų kelio dangos nelygumą.
3. Atlikta skaldos pagrindo sluoksnių tamprumo modulių E_2 variacijos koeficientų analizė parodė, kad geotinklais sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožai turi tolygesnę arba labai panašaus tolygumo tamprumo modulių kaitą (15,16–36,43 %) lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožuose nustatyta tamprumo modulių kaita (19,55–35,61 %). Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio tamprumo modulių E_3 kaita geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožams yra mažiau tolygi (28,31–44,02 %) lyginant su nesustiprintos žemės sankasos ruožuose nustatyta tamprumo modulių kaita (19,07–25,00 %).
4. Geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožus įvertinus daugiakriterinės analizės SAW metodu nustatyta, kad optimalus žemės sankasos su organiniais gruntais sutvirtinimo tipas yra vienas sluoksnis 60/60 kN/m stiprio tempiant geotinklo iš polipropileno (PP) (antrasis dangų konstrukcijos tipas geotinklais sutvirtintai žemės sankasai). Nustatytas ketvirtojo dangų konstrukcijos tipo geotinklais sutvirtintos žemės sankasos, turinčios du geotinklo sluoksnius, racionalumo koeficientas (0,607) yra nežymiai mažesnis (5,9 %) už optimalaus tipo racionalumo koeficientą (0,645).
5. DK 100, DK 32 ir DK 10 dangų konstrukcijų klasėms pagal *KPT SDK 19* tikslinga naudoti du geotinklo sluoksnius, nes ketvirtajam dangų konstrukcijos tipui (atitinka DK 10) geotinklu sutvirtintos dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos ruožams nustatytas dangos nelygumo (IRI) duomenų aibės plotis be išskirtinių reikšmių (0,82 m/km) ir duomenų variacijos koeficientas (27,95 %) yra mažiausi šiam dangų konstrukcijos tipui.

Bendrosios išvados

1. Atlikus automobilių kelių dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos gruntų sutvirtinimui naudojamų geotinklų tyrimų analizę nustatyta, kad siekiant užtikrinti automobilių kelių konstrukcijos funkcionalumą, žemės sankasos arba dangų konstrukcijos sutvirtinimui turi būti naudojamas bent 30 kN/m stiprio tempiant geotinklas, turintis ne mažesnę kaip 12,6 kN/m mazgo standumą. Geotinklų panaudojimas, kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio organinio grunto sluoksniai, nėra aprašytas automobilių kelių tiesybos normatyviniuose techniniuose dokumentuose.

2. Remiantis tiriamųjų automobilių kelių ruožų dangos paviršiaus nelygumų bei dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių eksperimentinių tyrimų rezultatais įrodyta, kad kelio, kurio dangų konstrukcija ir (arba) žemės sankasa sutvirtinta geotinklu, dangos degradacija neviršija normatyviniuose techniniuose dokumentuose nurodytų reikalavimų.

3. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad naudojant geotinklus dangų konstrukcijos ir (arba) žemės sankasos sutvirtinimui, kai žemės sankasoje yra sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai, sumažėja kelio dangos nelygumo vystymasis. Geotinklu sutvirtintų tiriamųjų dangų konstrukcijų ir (arba) žemės sankasų ruožai pasižymi mažiausiu dangos nelygumo prieaugiu (nuo 3,53 % iki 20,49 % arba nuo 0,03 m/km iki 0,22 m/km), o tai rodo, kad tokiose konstrukcijose dangos nelygumas vystosi lėčiausiai. Geotinklais sutvirtintuose

ruožuose, kuriuose yra nustatytos mažiausios vidutinės dangų konstrukcijos sluoksnių tamprumo modulių reikšmės (451 MPa skaldos pagrindo sluoksnio ir 156 MPa apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio) dangos nelygumo didėjimo sparta yra mažesnė nei 0,22 m/km per 7 eksploatacijos metus, lyginant su etaloninės žemės sankasos nelygumo didėjimo sparta, kuri yra ne didesnė nei 0,44 m/km.

4. Atsižvelgiant į dangos nelygumo analizės rezultatus įrodyta, kad geotinklais sutvirtinta dangų konstrukcija ir (arba) žemės sankasa kelio dangos degradacijos spartos atžvilgiu (ne didesniu nei 0,031 m/km per metus), kai žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai yra lygiavertė teisės aktuose nurodytiems žemės sankasos sprendimams, kurių nustatyta kelio dangos degradacijos sparta buvo ne didesnė nei 0,063 m/km per metus.

5. Pagal eksperimentinio tyrimo rezultatus sudaryta geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schema skirta geotinklų parinkimui nepriklausomai nuo numatytos statybos rūšies (kapitalinis remontas, paprastasis remontas, rekonstravimas ar nauja statyba). Pasiūlyta schema užtikrina kelio konstrukcijos funkcionalumą tuo atveju, kai žemės sankasoje sutinkami organinių gruntų sluoksniai yra konsoliduoti bei gerai arba vidutiniškai susiskaidę ir yra iki 3,0 m storio.

Rekomendacijos

1. Atliekant automobilių kelių ar gatvių rekonstrukciją, kur žemės sankasoje sutinkami iki 3,0 m storio konsoliduotų organinių gruntų sluoksniai, rekomenduojama naudoti geotinklais sutvirtintą žemės sankasą pagal sudarytą geotinklų naudojimo poreikio nustatymo ir parinkimo schemą, leidžiančią išvengti organinių gruntų iškasimo, konsolidavimo ar sustiprinimo poliais.

2. Rekomenduojama įtraukti šią geotinklų pritaikymo sritį su numatytomis geotinklų fizikinių ir mechaninių savybių korekcijomis atliekant „*Geosintetikos naudojimo žemės darbams keliuose metodiniai nurodymai MN GEOSINT ŽD 13*“ dokumento atnaujinimą.

3. Rekomenduojama toliau tęsti ilgalaikius kelio dangų kokybės stebėjimo mokslinius tyrimus ant geotinklais sutvirtintos žemės sankasos virš organinių gruntų sluoksnių taikant geotinklus veikiančių įtempių ir deformacijų stebėjimus, visam projektiniam kelio tarnavimo laikotarpiui (20 metų). Taip pat, rekomenduojama numatyti dangų konstrukcijos sluoksnių laikomosios gebos matavimus visais metų laikais, nes atlikto eksperimentinio tyrimo metu matavimai buvo atlikti tik nepalankiausiu metų laiku, t. y. pavasarį, pasitraukus įšalui. Bei rekomenduojama papildomai ištirti, kaip žemės sankasą veikia įvairaus stiprumo austiniai ir ištemptieji geotinklai.

Literatūra ir šaltiniai

- AASHTO *Guide for Design of Pavement Structures*. 1993. Washington, DC, USA. 319 p.
- Abu-Farsakh, M. Y.; Akond, I.; Chen, Q. 2016. Evaluating the performance of geosynthetic-reinforced unpaved roads using plate load tests, *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 17, No.10: 901–912.
- Al-Qadi, I. L.; Dessouky, S.; Tutumluer, E.; Kwon, J. 2011. Geogrid Mechanism in Low-Volume Flexible Pavements: Accelerated Testing of Full-Scale Heavily Instrumented Pavement Sections, *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 12, No. 2: 121–135.
- Alimohammadi, H.; Abu-Farsakh, M. 2019. Finite Element Parametric Study on Rutting Performance of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements, *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, “TRB”: 19-05396.
- Bertulienė, L.; Laurinavicius, A.; Vaitkus, A. 2010. Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of a base course of road pavement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 5, No. 2. 110–115.
- BS8006-1:2010. *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. 250 p.
- Carlos, D. M.; Pinho-Lopes, M.; Lopes, M. L. 2016. Effect of Geosynthetic Reinforcement Inclusion on the Strength Parameters and Bearing Ratio of a Fine soil, *ELSEVIER Advances in Transportation Geotechnics 3*. Volume 143: 34–41.
- Chandra, S.; Kamel, M. A.; Kumar, P. 2004. Behaviour of Subgrade Soil Reinforced with Geogrid, *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 5, No. 4: 201–209.

Chen, C.; McDowell, G. R.; Thom, N. H. 2012. Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions, *ELSEVIER Geotextiles and Geomembranes*. Volume 35: 76–86.

Chow, R. 2014. Literature review of the current state of the art for designing geosynthetics for sub-base reinforcement for track and tyre loadings, *10th International Conference on Geosynthetics „10ICG“*: 1025–1031.

Christopher, B.; Perkins, S. 2008. Full scale testing of geogrids to evaluate junction strength requirements for reinforced roadway base design, *4th European Geosynthetics Congress “EuroGeo4”*: 229.

Cuelho, E. V.; Perkins, S. W. 2017. Geosynthetic subgrade stabilization – Field testing and design method calibration, *ELSEVIER Transportation Geotechnics*. Volume 10: 22–34.

Cuelho, E.; Perkins, S. 2016. Mechanisms of Reinforced Benefit from Geosynthetics Used as Subgrade Stabilization, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 450–461.

Cuelho, E.; Perkins, S. 2009. *Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization, final report to the Montana Department of Transportation, FHWA/MT-09-003/8193*, 140 p.

Cuelho, E.; Perkins, S.; Morris Z. 2014. *Relative operational performance of geosynthetics used as subgrade stabilization, final report to the Montana Department of Transportation, FHWA/MT-14-002/7712-251*, 328 p.

Duncan-Williams, E.; Attoh-Okine, N. O. 2008. Effect of geogrid in granular base strength – An experimental investigation, *ELSEVIER Construction and Building Materials*. Volume 22: 2180–2184.

Dynatest 8000 FWD Test System. Dynatest Engineering A/S. 1995. 185 p.

EBGEO. 2010. *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements*, Second Edition. 313 p.

Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten Untersuchungen zur Dynamischen Stabilität. Vereinfachte Bewertung der Dynamischen Stabilität von Bestehenden Strecken. 2018. DB Netz AG.

EN 1997-1:2005 Eurocode 7: *Geotechnical design – Part 1: General rules*. 168 p.

FHWA-NHI-16-027 „Ground Modification Methods. Reference Manual – Volume II“. *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*. NHI Course No. 132034. 2017. 550 p.

Fischer, Sz.; Szatmari, T. 2016. Investigation of the geogrid-granular soil combination layer with laboratory multi-level shear box test, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 462–471.

Ginevičius, R.; Podvezko, V. 2008. Daugiakriterinio vertinimo būdų suderinamumas, *Business: Theory and practice*. Volume 9: 73–80.

Gongora I. A. G.; Palmeira E. M. 2012. Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades, *Geosynthetics International*. Volume 19(2): 191–199.

Gökova, S.; Saltan, M.; Terzi, S.; Tutumluer, E.; Emre Uz, V.; Karaşahin, M. 2018. Experimental investigation of the stabilization performance trends of two geogrids constructed on low bearing capacity subgrade, *11th International Conference on Geosynthetics „11ICG”*: S05-06.

Heerten, G.; Klompmaker, J.; Lesny, C. 2010. Innovative geocomposite materials – large-scale laboratory and field test results, *9th International Conference on Geosynthetics „9ICG”*: 1535–1542.

Horgan, G.; Hangen, H.; Durand, R.; Vaniček, M. 2014. European reinforced soil design – The codes, *10th International Conference on Geosynthetics „10ICG”*: 473–480.

IT ASFALTAS 08. *Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2009. 49 p.

IT ŽS 17. *Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklės*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2017. 99 p.

Jenner, C. 2010. British standard code of practice. BS8006, *9th International Conference on Geosynthetics „9ICG”*: 243–248.

Kazimierowicz-Frankowska, K. 2012. Influence of geosynthetic reinforcement on maximum pavement settlements, *5th European Geosynthetics Congress “EuroGeo5”*. Volume 4: 312–316.

Kelių techninis reglamentas. KTR 1.01:2008, Automobilių keliai. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2008. 39 p.

Kelių būklės duomenų rinkimo su mobilia kelių tyrimo laboratorija RST-28 darbo instrukcija. KTS RST 17. Kaunas, 2017. 43 p.

Kim, J. H.; Byun, Y. H.; Qamhia, I. I. A.; Orihuela, M. F.; Tutumluer, E.; Wayne, M. 2019. Investigation of Aggregate Particle and Geogrid Aperture Sizes for Mechanical Stabilization Using Bender Element Shear Wave Transducers, *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, “TRB”*: 19-04913.

Kiptoo, D. K.; Kalumba, D.; Murunga, P. A.; Zannoni, E.; Aschrafi, J. 2016. Quantification of benefits of geosynthetic reinforced flexible pavements, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 485–493.

Koerner, R. M. *Designing with geosynthetics*, 6th edition, Volume 1. 2012. 195 p.

Koivisto, K.; Forsman, J.; Korkiala-Tanttu, L.; Salo, P.; Perttula, T. 2012. Finnish national design guidelines for georeinforcements following Eurocode – “Georeinforced earth structures 2012”, *5th European Geosynthetics Congress “EuroGeo5”*. Volume 4: 322–329.

KPT SDK 07. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2008. 56 p.

KPT SDK 19. *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2019. 75 p.

Lebon, P. 2018. How do certification schemes of geosynthetics make expected benefits of the use of geosynthetics more reliable, *11th International Conference on Geosynthetics „11ICG“*: S36-05.

Lieberenz, K.; Wegener, D. 2009. Abtragung der Lasten im System Oberbau, Unterbau und Untergrund, *Eisenbahn Ingenieur Kompendium „EIK“*: 53–72.

Lieberenz, K.; Wegener, D.; Weisemann, U. 2009. Bewehrte Tragschichten über Weichschichten - Erste Erfahrungen aus Praxiseinsätzen, *Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik*: S5-12.

Lietuvos Respublikos Aplinkos Ministro įsakymas dėl reglamentuojamų statybos produktų sąrašo patvirtinimo, Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, Vilnius, 2018. 23p.

Lenart, S.; Koseki, J. 2018. Deformation properties of geosynthetic reinforced gravel at small strain range, *11th International Conference on Geosynthetics „11ICG“*: S20-05.

LST EN 13249:2017. *Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion)*. 48 p.

LST 1331:2015. *Gruntai, skirti keliams ir jų statiniams. Klasifikacija*. 18 p.

Mehrijardi, T.; Khazaei, M. 2017. Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads, *ELSEVIER Geotextiles and Geomembranes*. Volume 45: 603–615.

Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues, M-Geok E 05, FGSV 535, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Ausgabe 2005. 79 p.

Meyer, N.; Elias, J. M. 1999. Design methods for roads reinforced with multifunctional geogrid composites for subbase stabilization, *Kunststoffe in der Geotechnik*. Munich. 8 p.

Minažek, K.; Mulabdić, M. 2014. Determination of reinforced soil stiffness by static plate load test, *10th International Conference on Geosynthetics „10ICG“*: 315–323.

MN GEOSINT ŽD 13. 2013. *Geosintetikos naudojimo žemės darbams keliuose metodiniai nurodymai*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2013. 130 p.

Psiorz, C.; Klompmaker, J. 2014. Minimum requirements on tensile strength and robustness for stabilisation with geogrids, *10th International Conference on Geosynthetics „10ICG“*: 983–990.

R IGGT 15. 2015. *Automobilių kelių inžinerinių geologinių ir geotechninių bei statinių tyrimų rekomendacijos*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2015. 96 p.

Ril 836.0501. 2008. *Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Erdkörper - Grundsätze*, DB Netz AG.

Ril 821.2001. 2007. *Oberbau inspizieren, Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleismessfahrzeugen*, DB Netz AG.

Rimoldi, P.; Scotto, M. 2012. Design method for geogrid reinforcement of road bases, *5th European Geosynthetics Congress "EuroGeo5"*. Volume 1: 144–149.

Ruiken, A.; Jacobs, F.; Ziegler, M. 2012. Large scale biaxial compression testing of geogrid reinforced soil, *5th European Geosynthetics Congress "EuroGeo5"*. Volume 4: 301–306.

Rüegger, R.; Hufenus, R. 2003. *Building with Geosynthetics*, SVG. 194 p.

Safadoust, J.; Amiri, S. N.; Esmaeily, A. 2013. Numerical analysis of reinforced embankment over soft foundation, *Journal of Engineering Science and Technology*. Volume 6, No. 3: 153–159.

Sakleshpur, V. A.; Prezzi, M.; Salgado, R.; Siddiki, N. Z.; Choi, Y. S. 2019. Large-scale direct shear testing of geogrid-reinforced aggregate base over weak subgrade, *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 20, No. 6: 649–658.

Skrinskas S. 2012. International and scientific activities of the Lithuanian Road Administration are the source of experience, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 7, No. 3: 169–172.

Statybos techninis reglamentas STR 1.04.02:2011, Inžineriniai geologiniai ir geotechniniai tyrimai. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, Vilnius, 2011. 33 p.

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.21:2016, Geotechninis projektavimas. Bendrieji reikalavimai. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, Vilnius, 2016. 159 p.

Stolyarov, O.; Baranov, A.; Deviatilov, A. 2014. A comparative study of the structure and the installation damage of geosynthetics, *10th International Conference on Geosynthetics „10ICG“*: 420–428.

Šiaudinis G. 2006. Relationship of Road Pavement Deformation Moduli, Determined by Different Methods. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 1, No. 2: 77–81.

Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaus, TL Geok E-StB 05, FGSV 549, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Ausgabe 2005. 44 p.

TRA GEOSINT ŽD 13. 2013. *Geosintetikos, naudojamų žemės darbams keliuose, techninių reikalavimų aprašas*. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, Vilnius, 2013. 28 p.

Vaitkus, A. 2010. Geotextile Selection Methods for the Lithuanian Road and Street Structures, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 5, No. 4: 246–253.

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Motiejūnas, A.; Pakalnis, A.; Miškinis, D. 2016. Improvement of road pavement maintenance models and technologies, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 11, No. 3: 242–249.

Vaitkus, A.; Paliukaitė, M. 2013. Evaluation of time loading influence on asphalt pavement rutting, *11th international conference on modern building materials, structures and techniques (MBMST)*: 1205–1212.

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Žiliūtė, L.; Kleizienė, R.; Ratkevičius, T. 2012. Optimal selection of soils and aggregates mixtures for a frost blanket course of road pavement structure, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Volume 7, No. 2: 154–159.

Valero, S.; Sprague, J.; Wrigley, N. 2014. Full scale trafficking of geogrid reinforced sections under realistic service conditions, *10th International Conference on Geosynthetics “10ICG”*: 2587–2594.

Vogt, S.; Bräu, G.; Blume, U. 2010. The influence of soil and type of geosynthetics on the bearing capacity of roads, *9th International Conference on Geosynthetics „9ICG”*: 1515–1520.

Vollmert, L.; Beuße, M.; Emerslen, A.; Lhotzky, K.; Milatz, M. 2014. Setup of unique full scale trafficking trials of reinforced unbound pavements – motivation and first results, *10th International Conference on Geosynthetics “10ICG”*: 1040–1049.

Vollmert, L.; Bräu, G. 2018. Performance of geogrid reinforced and stabilized base courses, *11th International Conference on Geosynthetics „11ICG”*: IGS TC3-02.

Vollmert, L.; Emersleben, A. & Meyer, N.; Beuße, M. 2016. Execution and evaluation of large-scale trafficking trials with geogrid-reinforced base courses, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 472–484.

Vollmert, L.; Emerslen, A.; Retzlaff, J. 2014. Cyclic stressing of geogrids in the working-load range of bound road constructions, *10th International Conference on Geosynthetics “10ICG”*: 2578–2586.

Vollmert, L.; Quirk, C.; Klompmaker, J. 2018. Small strain effects – geogrids contributions to serviceability, *11th International Conference on Geosynthetics „11ICG”*: SS2-06.

Wallbaum, H.; Busser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R. 2014. Environmental benefits by using construction methods with geosynthetics, *10th International Conference on Geosynthetics “10ICG”*: 50–63.

Watn, A.; Hoff, I.; Recker, C. 2016. Geosynthetic reinforcement for road pavements in cold climate, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 915–926.

Wegener, D.; Herle, I. 2013. Akkumulation bleibender Verformungen infolge dynmischer Belastung mittels numerischer Verfahren, 9. *Hans Lorenz Symposium*, Heft Nr. 63.

Wilmers, W. 2002. The Revised German Regulations for the Use of Geosynthetics in Road Construction. In: *7th International Conference on Geosynthetics*. France. 1401–1404.

Ziegler, M. 2016. Geosynthetic reinforcement applications, *6th European Geosynthetics Congress “EuroGeo6”*: 173–207.

Zornberg, J. 2017. Functions and applications of geosynthetics in roadways, *Transport Geotechnics and Geology, “TGG”*: 298–306.

Zornberg, J.G.; Gupta, R. 2010. Geosynthetics in pavements: North American contributions, *9th International Conference on Geosynthetics „9ICG”*: 379–398.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitkus, A.; Šiukščius, A.; Ramūnas, V. 2014. Regulations for use of geosynthetics for road embankments and subgrades, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 9(2): 88–93. ISSN 1822-427X (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,766).

Ramūnas, V.; Vaitkus, A.; Laurinavičius, A.; Čygas, D.; Šiukščius A. 2017. Prediction of lifespan of railway ballast aggregate according to it's mechanical properties, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 12(3): 203–209. ISSN 1822-427X (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,622).

Šiukščius, A.; Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Mikaliūnas, Š. 2019. Long term behaviour of an asphalt pavement structure constructed on a geogrid-reinforced subgrade over soft soils, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 14(3): 384–404. ISSN 1822-427X (Clarivate Analytics Web of Science; IF: 0,620).

Straipsniai kituose leidiniuose

Šiukščius, A.; Sližytė, D.; Vorobjovas, V. 2015. Embankment reinforcement to ensure proper road construction function, *The 18th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania”*, Vilnius, Lithuania. p. 1254–1260. ISBN 978-609-457-821-2.

Šiukščius, A.; Vorobjovas, V.; Vaitkus A. 2017. Geogrid reinforced subgrade influence to ensure paved road durability, *10th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius, Lithuania. p. 1–7. ISBN 978-609-476-044-0.

Šiukščius, A.; Vorobjovas, V.; Vaitkus A. 2018. Geogrid reinforced road subgrade influence on the pavement evenness, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering "Resilient and Safe Road Infrastructure"*, Kielce, Poland. IOP Volume 356. p. 1–9. 012020. doi:10.1088/1757-899X/356/1/012020.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

New construction and reconstruction of roads and streets often has to deal with the problems of a weak earth subgrade soil. Road construction normative technical documents state that in case earth subgrade soil is with organic soil layers it needs to be strengthened by soil replacement, consolidation or installing piles with geogrid reinforced soil platform, but do not specifically define the solution of this type of problem according to geological structure.

A common geological structure is when weak organic soils layers founded in the subgrade are up to 3.0 m thick. When the decay of organics or impurities thereof no longer occurs and the major settlements of the earth subgrade have already occurred due to previous transport loads, there are doubts which method of the earth subgrade strengthening should be applied. Especially in cases where there is a layer of bulk or natural soil with sufficient bearing capacity above the organic soil and the reduction of the settlement of the earth subgrade by additional technical measures is not necessary. However, due to the changes in the behavior of the earth subgrade due to variations in groundwater levels in organic soil layers, the changes in the dynamic effects of transport loads and the changes in creep deformations in fine soil layers, there is a risk that weak organic soil layers in the earth subgrade structure may deform. Due to these long-term deformations, potholes, localized cavities and (or) transverse cracks, may occur on the pavement surface. The roughness of the pavement is one of the main properties of the road pavement and the parameters that define the quality of operation (driving). Therefore, the unwarranted load-

bearing capacity of the earth subgrade and subsequently the bearing-capacity stability of the basis of the road pavement structure may affect the unevenness of the pavement throughout the road section. Geogrids are increasingly used to solve this problem, as the additional reinforcement of the road structure ensures better load distribution in the subgrade and more uniform deformations.

In order to assess the suitability of the use of geogrids for the reinforcement of pavement structures and (or) earth subgrade, it is necessary to provide the geogrid usage demand assessment and selection scheme, indicating the adaptation of geogrids according to geological structure.

Relevance of the thesis

The soil reinforcement with geogrids has been increasingly used over the last 10 years in terms of ensuring the evenness of the road surface. However, the selection, installation and operation of geogrids for such applications are not clearly regulated in the normative technical documents. Therefore, in engineering practice, this is done based on general theoretical knowledge.

Due to the different physical and mechanical properties of the earth subgrade, the bearing capacity of the road structure may vary depending on the variation of the groundwater and subsoil water level due to the seasonality of the climate and the depth of the frost. During the road operation, this affects the roughness of the road surface, sometimes even the formation of ruts. Local deformations of the road pavement due to insufficient and (or) uneven bearing capacity of the earth subgrade and changes in the behavior of the organic soil due to structural changes in the soil leading to the degradation of the mechanical properties may lead to the formation of uneven surface. Geogrids are used to ensure the functionality of the road structure when weak layers of up to 3.0 m, including organic soil layers, are found in the earth subgrade. the mechanical properties of which do not change substantially during the service life. The justification for their selection and the definition of geological structure are not yet specified in universally applicable selection systems. It is therefore necessary to specify the limits for the use of geogrids according to geological structure.

Object of the thesis

The object of the research of the thesis is the influence of mechanical and physical properties of geogrids on the roughness of the road pavement and on the resilient moduli of the layers of the pavement structures. Four road structures installed and in operation for more than 7 years, strengthened by different techniques, were selected for the research. Pavement structures were installed on bases with weak soils, including layers of organic soils present at various depths of the base.

Aim of the thesis

To develop the geogrid usage demand assessment and selection scheme by determining the effect of pavement structure and (or) earth subgrade reinforcement with geogrids on the degradation of a road structure through the experimental investigations.

Tasks of the thesis

To achieve the aim of the thesis, the following tasks need to be addressed:

1. To perform the analysis of the principles and methods for the selection of geogrids applied to the reinforcement of the road pavement structure and (or) the earth subgrade and determine the requirements for geogrids when they are used to reinforce the weak soil and to ensure the road structure functionality.
2. To determine the surface roughness of the road sections under investigation and the resilient modulus of the pavement structure layers taking to account the measured total sum of equivalent standard (10 t) axle loads (ESA) during the road use period.
3. To determine the impact of the use of geogrids on the road pavement roughness and pavement structure resilient moduli in the presence of different pavement structures and earth subgrade types.
4. When layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade, to determine the suitability of the pavement structures and (or) the earth subgrade reinforced by geogrids in comparison with the solutions defined in legislations.
5. To provide the geogrid usage demand assessment and selection scheme when layers of organic soil up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade.

Research methodology

The following methods were used to achieve the objective of the thesis: analysis of archival documentation of structure construction, planning of experimental investigation, experimental measurements of road pavement roughness and pavement surface deflections under dynamic load. Mathematical statistics and multicriteria methods were also used.

Scientific novelty of the thesis

During the preparation of the thesis, the following new results for civil engineering science were obtained:

1. A comparative analysis of road pavement roughness and pavement structure resilient moduli was performed to determine the impact of different pavement strengthening techniques on the road degradation, however when the layers of organic soils found in the earth subgrade are up to 3.0 m thick, geogrids are used to ensure the quality of pavement structure thus eliminating the occurrence of local road pavement deformations.

2. The geogrid usage demand assessment and selection scheme has been developed in order to ensure the functionality of the road structure, when layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade.

Practical value of the research findings

The geogrid usage demand assessment and selection scheme has been developed to ensure the functionality of the road structure, which can be applied in engineering practice when designing new and (or) reconstructing existing road structures when layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade. The results of the research can be used to supplement the existing normative technical documents.

Defended statements

1. With regard to the rate of the road degradation, a geogrid-reinforced pavement structure and (or) earth subgrade, where organic soil layers up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade, is equivalent to the earth subgrade defined in normative technical documents. This allows to ensure required functionality of the road structure while maintaining the evenness of the road pavement as defined in normative technical documents, where the limit value depends on the road category.
2. The use of a geogrid demand assessment and selection scheme when layers of organic soil up to 3.0 m thick are found in the subgrade, avoids earth subgrade strengthening using soil replacement, consolidation or installing piles with geogrid reinforced soil platform.

Approval of the research findings

Six scientific articles are published on the topic of the thesis: three in scientific journals included in the database of *Clarivate Analytics Web of Science*, and three in peer-reviewed publications of international conferences.

The results of the research carried out in the thesis were published in three scientific conferences in Lithuania and abroad:

- Conference of Young Scientists “*Science is the Future of Lithuania*” in Vilnius in 2015;
- International Conference “*Environmental Engineering*” in Vilnius in 2017;
- International Conference “*Resilient and Safe Road Infrastructure*” in Kielce, Poland, in 2018.

Structure of the thesis

The thesis consists of an introduction, three chapters and general conclusions, recommendations, literature and sources, a list of the author’s scientific publications on the topic of the thesis and a summary in English. Six annexes are provided at the end.

The volume of the thesis is 139 pages, excluding annexes; 23 numbered formulas, 67 figures and 14 tables were used in the text. 85 literature sources were used when writing the thesis.

Acknowledgement

The author of the thesis thanks the scientific supervisor doc. Dr. Viktoras Vorobjovas for valuable scientific consultations, comments and advice, all the help and patience. Also thanks to prof. Dr. Audrius Vaitkus, for scientific insights, ideas and remarks during the preparation of the thesis. The author is also grateful to the thesis experts for their valuable remarks and comments and understanding. The author is grateful to UAB “ViaCon Baltic” for the provided development opportunities and financial support for doctoral studies and experimental research and equally grateful to the family for all the support and understanding.

1. Analysis of research on the use of geogrids for the reinforcement of the road earth subgrade

When the pavement structure is installed on the earth subgrade with weak cohesive (silt and clay) and organic soils (peat, sapropel), deformations occur in the pavement structure due to shear stresses in the soil, which the weak soil cannot fully absorb. The vehicle loads on the road pavement lead to horizontal displacements in the soil layer. Horizontal tensile stresses are formed in the ground, below the load level, when the ground particles slide downwards and to the sides under the impact of loads. Horizontal soil displacements allow the formation of vertical stresses, which allows the formation of constant ruts in the line of movement of the wheel.

The reinforcement of the soil is widely used for the interception of shear stresses. Today, geosynthetic materials are used for soil reinforcement, mostly using geogrids. Geogrids are used as a means of soil reinforcement. The operation of a geogrid in the soil is defined as the use of geosynthetic products of a stressed condition to reinforce the soil. Well-bounded geogrids absorb shear stresses and at the same time increase the internal friction angle of the back-filled soil (Cheng Chen *et al.* 2012), thus allowing the load pressure to be distributed over weak soils of earth subgrade over a larger area or reducing the back-fill height while maintaining the same stress as for the structure without a geogrid.

Unbound mixture aggregate particles of the road pavement structure exposed to traffic loads are loaded and they transmit stresses to the earth subgrade or to the geogrid laid on it. When the earth subgrade does not have sufficient bearing capacity and the geogrid is not used, significant deformations occur in the pavement structure, so the use of the geogrid allows them to be significantly reduced (Chandra *et al.* 2006). For the interception of the stresses caused by the forces acting on the soil, the tensile strength of the geogrid must be activated (L. Vollmert *et al.* 2014) and this always leads to the constraint of displacements (Safadoust *et al.* 2013). Being exposed to normal and shear stresses in the geogrid-reinforced soil, the geogrid stretches and thus tensile forces are generated in the geogrid layer at very low deformations. Due to its rigidity, the geogrid is significantly more resistant to tensile forces than the soil, so the shear stresses are neutralized in the geogrid-

reinforced layer (Alimahammadi *et al.* 2019). Based on the research results for soil layers reinforced by means of biaxial pressure device (Ruiken *et al.* 2012), where a very clear effect on the soil layer is observed, the dependence of the increase of the bearing capacity of the reinforced soil layer on the increase of geogrid stiffness is presented. This results in smaller vertical deflections on the surface of the pavement structure. The higher the reinforcement effect is achieved in the soil, the more the progressive wear of the soil layer is reduced (Psiorz *et al.* 2014). The geogrid can reduce the shear deformations in the soil more than twice, especially on roads where deformations of the pavement structure are likely due to weak soils of earth subgrade or significantly increased loads due to the flow of overloaded trucks or traffic (Vollmert *et al.* 2018). Due to all these functions, the geogrid-reinforced soil layer increases the service life of the pavement structure at all stages of its operation (Kazimierwicz-Francowska 2012).

The sustainable functioning of roads with asphalt pavement is defined by the following qualitative indicators: impairments and their extent, the strength of the structure, the roughness of the pavement and the surface resistance to slipping. Impairments forming on the asphalt pavement are usually the result of changes in the properties of the asphalt layers and the materials used to install it. However, the impairments such as depressions, the inclination of the pavement transverse profile and mesh cracks are caused by insufficient strength of the bases and the earth subgrade. The roughness of the pavement depends on the strength of the road structure and the properties of the asphalt pavement and the asphalt mixtures used for its installation. Thus, depending on the roughness of the road pavement and the strength of the road structure (and its layers), it can be possible to determine their causes, one of which is the condition of the earth subgrade and its soils. Therefore, when designing the road, and its structure, it is important to properly assess the soil subgrade, its soils and, if necessary, to select appropriate means and technologies for strengthening.

A weak earth subgrade is when the bearing capacity and (or) compaction of the earth subgrade is insufficient. According to the rules for the performance of road earthworks and the installation of earth subgrade *IT ŽS 17*, the earth subgrade is weak when the deformation modulus E_{v2} on the top of the frost-sensitive earth subgrade is less than 45 MPa. Excavation of weak soil and replacement with strong soil, stabilization of the soil with hydraulic binders, reinforcement with geogrids or installation of piles with geogrid-reinforced soil platform are used to strengthen the weak earth subgrade.

Replacement of weak soil used for reinforcement of weak soil with a new, well-draining (water permeability coefficient $k_{10} \geq 10^{-5}$ m/s) and well-compacting soil layer (uniformity coefficient $C_u \geq 15$; the mass of particles with a diameter not exceeding 0.063 mm does not exceed 5%) can be linked to a partial soil replacement using geogrids. In the general case, during the soil replacement, the geogrid mechanically reinforces the newly back-filled soil and allows the use of a thinner layer thereof. In any other case, i. e. when replacing the soil or reinforcing it with geogrids, or stabilizing it with hydraulic binders, the bearing capacity of the earth subgrade is increased by reducing the shear stresses in the soil. The safest solution is a complete replacement of the soil, as the structure is also protected against adverse effects of cold by ensuring the required bearing capacity. However, this is the most resource-demanding solution. For this reason, the most commonly used methods of reinforcing a weak earth subgrade are the stabilization with hydraulic

binders and the reinforcement with geogrids. Both methods of the earth subgrade reinforcement have their advantages and disadvantages, so their use depends on the existing geological situation and the projected construction technology. In the experimental research sections, these techniques of the earth subgrade strengthening were used most often.

When the earth subgrade is installed in swampy areas, then the techniques of soil replacement, consolidation or the earth subgrade reinforcement by means of the piles with a geogrid-reinforced soil platform is used. These techniques are also applied when organic soils are found in the earth subgrade. The disadvantage of all these techniques is the very high installation cost and (or) the long installation time. For these reasons, this leads to discussions as to when it may be possible not to use the earth subgrade strengthening by soil replacement, consolidation or the piles with geogrid-reinforced soil platform. Road normative technical documents do not clearly define the limits of the use of earth subgrade strengthening techniques. One of the limiting conditions is, during the design of roads, when the organic soils found in the earth subgrade are consolidated (peat and (or) sapropel are preloaded) or partially consolidated (peat and (or) sapropel are partially preloaded). This shows that sudden settlements and settlements due to consolidation have already taken place in the earth subgrade, thus leading to a debate on which technique of strengthening to use and what impact this may have on the functionality of the road pavement structure during the operation. This is relevant in cases where the layers of organic soil are found in the deeper layers of the earth subgrade and the layers of organic soil are of small thickness. Especially when the peat is well decomposed and the sapropel is rigidly plastic because the decomposition process of the organic soil layers has been complete or in the final stage of decomposition. For these reasons, traffic loads acting after the road reconstruction due to the increased traffic flow or the geometry of the replaced earth subgrade can only affect local and long-term deformations of the pavement structure. The normative technical documents valid in Lithuania do not define the maximum permissible settlement or settlement difference of the road earth subgrade, while one of the main indicators of the road pavement structure on the basis of which road pavement reconstruction projects are carried out is pavement roughness (IRI).

2. Methodology and results of experimental research of road pavement structures

When carrying out road reconstruction projects, one of the techniques used to strengthen the weak subgrade must be applied to ensure the functionality of the road structure above the organic soils located in the deeper layers of the earth subgrade: excavation of weak soil and replacement with strong soil, soil stabilization with hydraulic binders, reinforcement with geogrids, consolidation or installation of piles with a geogrid-reinforced soil platform. The case under consideration does not include the installation of an earth subgrade in swamps, where excavation of weak soil and replacement thereof with strong soil, consolidation or installation of piles with a geogrid-reinforced soil platform must be applied. In this case, layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade of the road sections under investigation at a depth of ≥ 1.0 m from the top of the earth

subgrade. The peat found according to the recommendations of road engineering geological and geotechnical and building research *R IGGT 15* are assigned to the category of organic soils, which according to the degree of decomposition *R* depend on the medium to highly decomposed ones, and the type of sapropel is classified as mineral sapropel. These layers of organic soils have already been consolidated or partially consolidated and, as a result, sudden and consolidation settlements of earth subgrade have already occurred. In this case, stabilization of the top layer of the earth subgrade with hydraulic binders or reinforcement with geogrids must be used. Due to the organic soil layers in the earth subgrade, stabilization of the earth subgrade with hydraulic binders is limited or impossible. In this case, the only suitable technique of strengthening of the top layer of the earth subgrade is using geogrids. Based on this principle, geogrids have been used in Lithuanian and global practice for more than 10 years to solve this type of problem.

The aim of the experimental research is to provide the scheme for the selection of geogrids ensuring the functionality of road structure, when layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade, after investigating the performance of the roads where geogrids of different stiffness are installed. For the performance of the experiment, four stages of the research are distinguished, the scheme of which is presented in Figure S.2.1. The following tests and measurements were performed during the experimental research:

- Measurements of traffic intensity and ESA calculations of the road sections under investigation.
- Measurements of pavement roughness of road sections under investigation using mobile road research laboratory RST-28.
- Measurements of the resilient moduli of the layers of the road pavement structure under investigation using the Dynatest 8000 FWD falling weight deflectometer.

The road pavement structure is affected by many negative factors during the design period; therefore, the following assumptions were considered during the experimental research:

- The factors influencing the evenness of the road pavement sections under investigation, according to the types of the pavement structure (such as climatic weather conditions, properties of pavement structure layers and their materials, the dynamics of affecting loads, the quality of road construction works, and the operation of road drainage) are the same.
- To ensure the deformability requirements for the upper part of the road pavement structure, the deformability of the earth subgrade is naturally sufficient or the means of the reinforcement or the amplification of the earth subgrade (compaction, reinforcement, stabilization, installation of piles) have been used.
- Long-term settlements of the earth subgrade due to weathering of organic soils and (or) creep of fine soils, fluctuations of groundwater level in organic soil layers, as well as changes in transport load parameters and dynamic effects do not significantly affect long-term deformations of the road pavement structure.
- After calculating the impact of traffic loads (according to *KTR 1.01: 2008 "Roads"*) on the earth subgrade using the software package *GEO5 Settlement*, it is assessed that in all investigated cases, the impact zone of the loads from the pavement surface is at least 6.0 m deep.

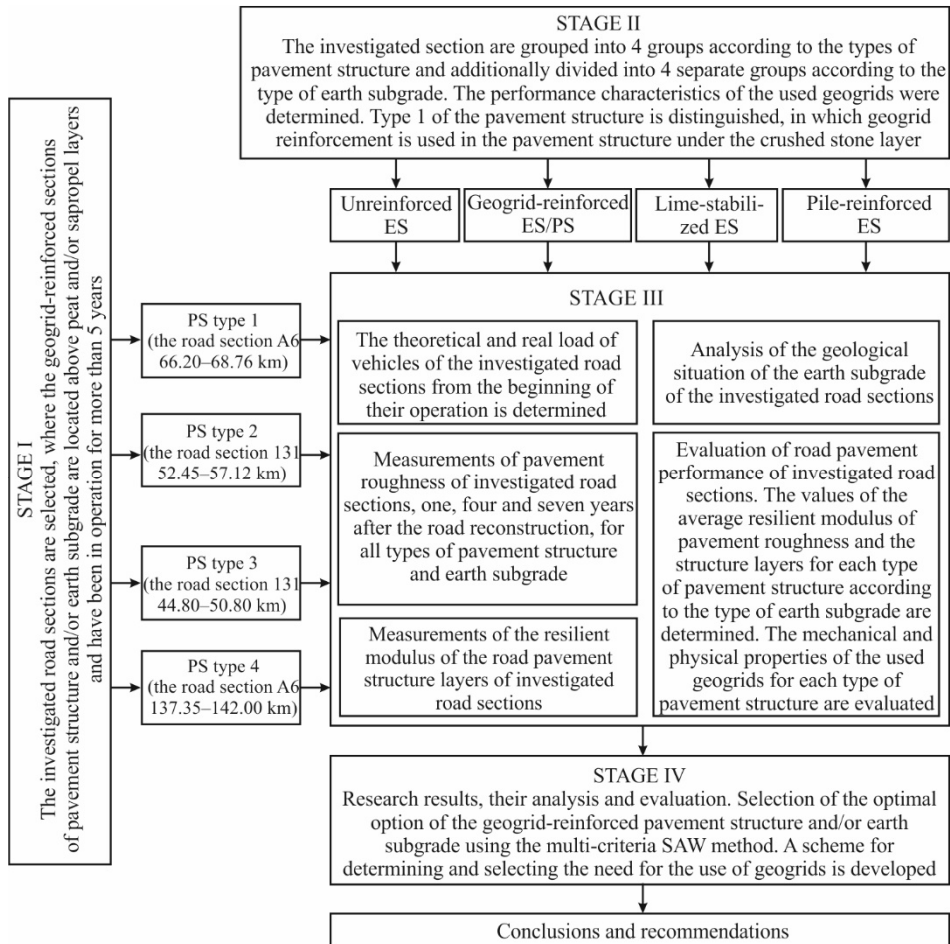


Fig. S.2.1. Scheme of the experimental research

The geogrid usage demand assessment and selection scheme is based on the rate of the road pavement degradation compared to the reference tests. The scheme ensures the functionality of the road structure when layers of organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade.

Road surface roughness (IRI) was measured under the left and right wheels of the car. Roughness measurements were determined every 20 m in both directions, on each lane of the road. A total of 3,446 points were measured in each measurement year and 10,338 measurement data units were collected for the data analysis. These data were classified according to the investigated types of pavement structure and each of them was classified according to the type of the earth subgrade.

Measurements of the roughness of the investigated road sections were performed in stages. The first stage of measurements was performed after one year from the completion of the construction of the reconstructed section. The second stage of the measurements was performed after four years. The third stage was performed after seven years. The results of the pavement roughness values were obtained by calculating the average IRI values for the investigated section. In addition, the maximum and minimum values, the standard deviation and the width of the sample are determined.

It was impossible to directly determine the deformations of geogrids in the investigated sections because displacement sensors were not installed during the construction of the investigated sections. In this context, the measurement technique for the pavement surface deflections was chosen as a control test along with the determination of the pavement roughness.

Measurements of pavement structures with a falling weight deflectometer are used to compare the condition of the pavement layers according to the measured deflection and (or) the shape of the settlement bowl on the pavement surface. This comparison can be used for research purposes. The deflection measurement data alone are not sufficient to determine and assess the condition of road pavement structures, so the data from these measurements must be considered together with measurements of pavement roughness. Due to the poor correlation results between the falling weight deflectometer and the static beam (Bertulienė *et al.* 2010), the recalculation of the resilient moduli to the values of deformation moduli E_{V2} is not performed.

During the FWD tests, the pavement surface temperature of the asphalt pavement ranged from +13 °C to +22 °C. The measurements were performed at the beginning of April 2018, as soon as information from meteorological stations that the frost had already got off the soil was received. The measurements were performed when dry air prevailed for at least one week. The measurements were made at three points at the geogrid-reinforced sections of the earth subgrade and at the additional three points at the sections adjacent to the sections of the reinforced earth subgrade not closer than 15 m to the beginning or end of the section. The measuring points are in the wheel trace of the traffic lane on the right roadside. A total of 189 points were measured. These data were classified according to the investigated types of the pavement structure and each of them was classified according to the type of the earth subgrade. The results of the values of the resilient moduli of the layers of the road pavement structure were obtained by calculating the average values of the resilient moduli for the investigated section. In addition, the maximum and minimum values, the standard deviation and the width of the sample are determined.

3. Geogrid reinforced road structure assessment and selection scheme formation

Based on the research data obtained at least seven years of operation following the reconstruction of the investigated road sections, an assessment of the roughness of the geogrid-reinforced pavement structure and the roughness of the pavement of the earth subgrade sections for the service life was developed and a comparative statistical analysis was performed. For the comparison of pavement surface roughness in the sections on different

types of earth subgrades, it is assumed for each type of the pavement structure that the deformation limits of the top part of the road pavement structure are ensured by means of strengthening of the earth subgrade below the road pavement structure.

After determining the coefficients of variation, it is possible to assess the stability of pavement roughness data and to compare whether the geogrid-reinforced pavement structure and earth subgrade sections above the organic soil layers retain similar qualitative road characteristics during the operation with unreinforced earth subgrade sections that are reference points. A lower coefficient of variation indicates that the result obtained is better. According to the results presented in the chart (see Fig. S.3.1), the coefficient of variation of the pavement roughness of the first and third pavement structure types for the geogrid-reinforced earth subgrade is worse than for the unreinforced earth subgrade.

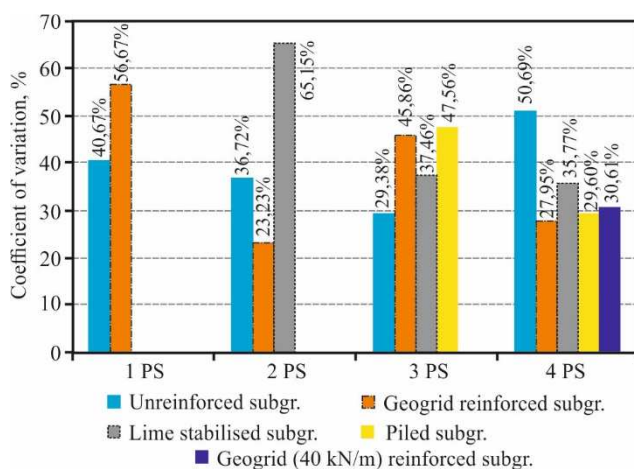


Fig. S.3.1. Coefficients of variation for all types of the pavement structure according to pavement roughness

The coefficient of variation of the pavement roughness of the second and fourth pavement structure types is better for geogrid-reinforced earth subgrade than for unreinforced earth subgrade or other earth subgrade types. The lowest coefficient of variation of the pavement roughness is shown by the geogrid-reinforced earth subgrade of the second pavement structure type, and the highest one is shown by the lime-stabilized earth subgrade of the same structure type.

The highest coefficient of variation of pavement roughness was observed for the geogrid-reinforced pavement structure and the earth subgrade that the first and third pavement structures have. This result for the first pavement structure type is based on the fact that the measured load A has already reached 77.90% of the maximum permissible design load ($A_i = 0.80$ million) for a period of 20 years for pavement structure class IV after half period of the service life of the design road, the geogrid is the weakest and does not meet the minimum requirements for the geogrid according to the requirements of *MN GEOSINT ŽD 13*. The thickness of the layer of bulk soil (clay with organic impurity)

of the third pavement structure between the lower geogrid and the layer of peat is only 1.0 m and this is the smallest thickness of the layer of bulk soil from all evaluated sections.

Taking into account the values of the coefficients of variation (Fig. S.3.2), the coefficient of variation of the results of the resilient modulus of the crushed stone of the unreinforced earth subgrade for the first pavement type is 0.82% better than the results of the geogrid-reinforced pavement section. The resilient modulus of the protective frost-resistant layer for sections of unreinforced earth subgrade is 23.31% and does not differ from other sections in the research, but the coefficient of variation of earth subgrade of the geogrid-reinforced pavement structure, which serves as a protective frost-resistant layer, is as high as 79.33%. This reaffirms that the geogrid laid under the crushed stone layer is able to compensate for the high variation of the resilient modulus values of the earth subgrade while maintaining the proper evenness of the pavement.

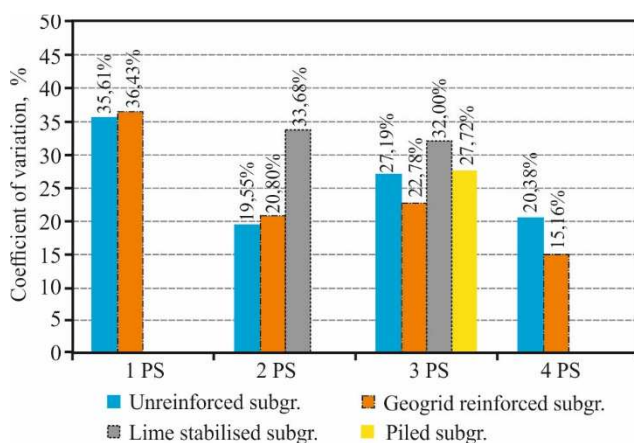


Fig. S.3.2. Values of the coefficient of variation of crushed stone layer resilient modulus for all types of the pavement structure and subgrade

For the second type of the pavement structure, the unreinforced earth subgrade sections show the lowest values of the coefficient of variation, but the values of the coefficient of variation of the geogrid-reinforced earth subgrade sections are worse only by 1.25% for the crushed stone layer and 9.24% for the protective frost-resistant layer. The sections of a lime-stabilized earth subgrade without organic soils are worse by 14.13% for the crushed stone layer and even 18.86% for the protective frost-resistant layer compared to the sections of the unreinforced earth subgrade. Taking into account the values of the coefficient of variation for the third type of pavement structure, according to the values of the coefficient of variation for the crushed stone layer (Fig. S.3.2.), the best result was determined for the sections of the geogrid-reinforced earth subgrade. Considering the sections of the unreinforced earth subgrade as a reference point, the sections of geogrid-reinforced earth subgrades are characterized by 4.41% better result. The result of the earth subgrade sections reinforced with piles is 0.53% worse, and the result of the earth subgrade sections of lime stabilized soil is 4.81% worse than the results of the sections of the unreinforced earth subgrade. The result of the coefficient of variation of the resilient modulus of the protective frost-resistant layer

(Fig. S.3.3) is 5.85% better for the earth subgrade sections reinforced with piles, 5.67% worse for sections with a lime-stabilized earth subgrade and, for a geogrid-reinforced earth subgrade, it is 12.8% worse than the result for unreinforced earth subgrade sections. Comparing the coefficients of variation of the results of the resilient modulus of the layers of the pavement structure of the first, second and third pavement structure types, the sections of geogrid-reinforced earth subgrade have a difference of up to 12.8% in the coefficient of variation compared to the sections of unreinforced earth subgrades. The sections of the lime-stabilized earth subgrade have a difference of up to 18.86% in the coefficient of variation compared to the sections of the unreinforced earth subgrade.

For the fourth type of the pavement structure, according to the value of the coefficient of variation, the coefficient of variation of the results of the resilient modulus of the crushed stone layer for the geogrid-reinforced earth subgrade (440 kN/m) is 25.61% lower than the results of unreinforced earth subgrade sections. The coefficient of variation of the results of the resilient modulus of the protective frost-resistant layer for the geogrid-reinforced earth subgrade section (440 kN/m) is 76.08% worse than the results of unreinforced earth subgrade sections.

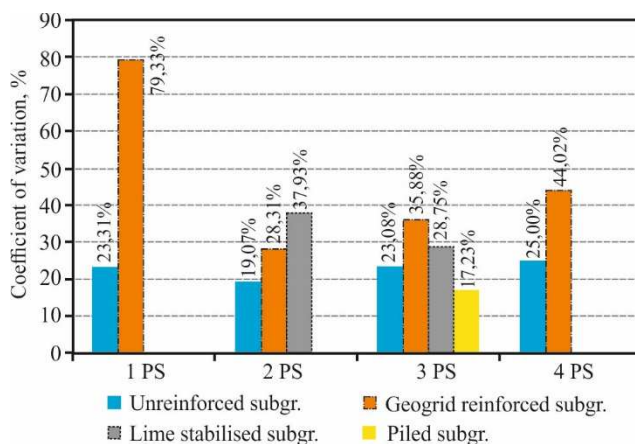


Fig. S.3.3. Values of the coefficient of variation of frost blanket course resilient modulus for all types of pavement structure and subgrade

Based on the theoretical application of geogrids to ensure the functionality of road structure defined in Chapters 1 and 2, the experimental research performed and the influence of geogrids on the evenness of the road pavement during operation, the geogrid usage demand assessment and selection scheme is developed. The application of this scheme ensures the long-term functionality of the road pavement structure while maintaining the required evenness of the road pavement. The scheme is applied in order to prevent excavation and replacement of organic soil with draining soils when, during a road or street reconstruction project or the design of a new road, in areas where the consolidated organic soil layers up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade. The scheme for the selection of the geogrid based on the results of the experimental research is shown in Figure S.3.4.

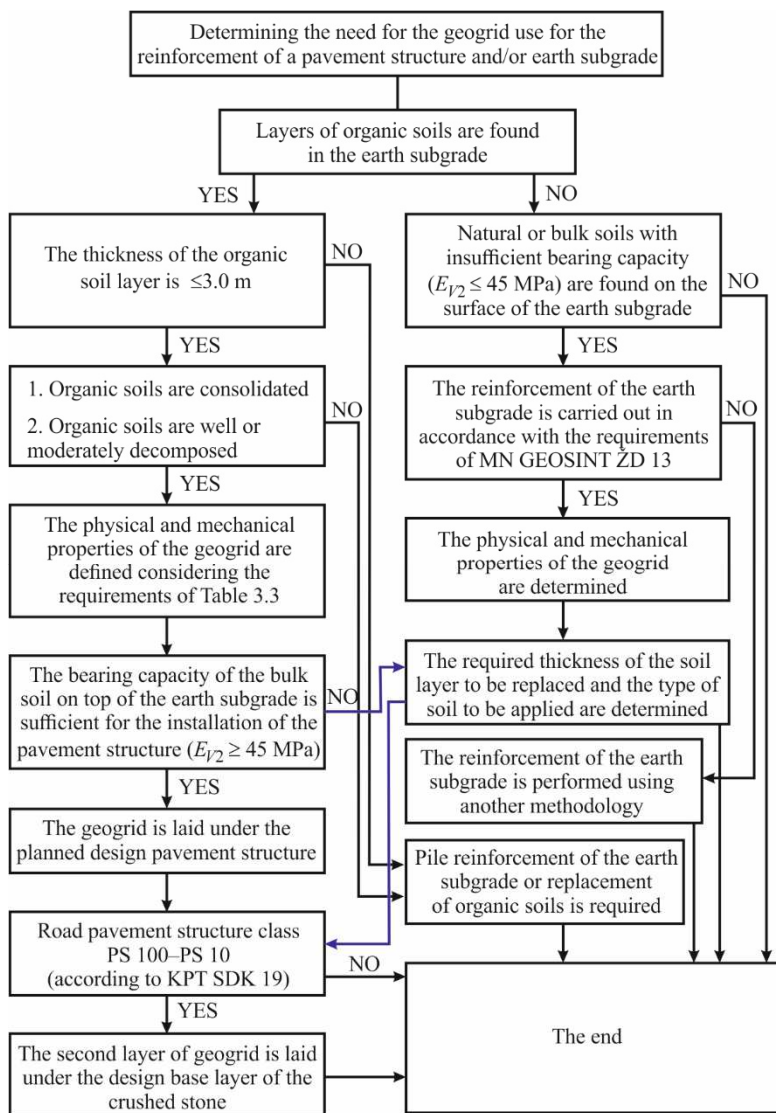


Fig. S.3.4. Geogrid usage demand assessment and selection scheme

Geogrid usage demand assessment and selection scheme consists of two parts. The first part is used when engineering geological investigations identify layers of organic soils in the subgrade. The main boundary conditions for the use of geogrid construction are the thickness of the organic soil layer found in the subgrade and the degree of decomposition of the organic soil. If the thickness of the organic soil layer in the subgrade is more than 3 m or the organic soil is poorly or not decomposed, additional strengthening (piles, soil replacement or consolidation) must be applied.

When the boundary conditions are met, the properties of the geogrid and the intended location of the geogrid are selected. If the bearing capacity of the earth subgrade is sufficient, the geogrid must be installed directly under the designed pavement structure. If the bearing capacity of the earth subgrade is insufficient, the geogrid shall be installed with an additional soil exchange according to the requirements of *MN GEOSINT ŽD 13*.

According to the experimental research presented in Chapters 2 and 3, it can be stated that using the *KPT SDK 19* table 9, indicating standard road pavement structure classes, it is expedient to provide a second layer of the geogrid for DK 100, DK 32 and DK 10 typical road structures, due to the number of loads acting on the road. It is recommended to lay the second layer of geogrid under the crushed stone base layer provided in the pavement structure. For road pavement structure class DK 3 and lower, it is sufficient to use one layer of geogrid on the earth subgrade.

The second part is used when engineering geological investigations do not identify organic soil layers in the subgrade. Then the need for the use of geogrid is determined by assessing the bearing capacity of the subgrade. If the bearing capacity meets the requirements of normative technical documents, geogrids are not used. If an increase of the bearing capacity of the earth subgrade is required, then the selection of the geogrid is carried out in accordance with the requirements of *MN GEOSINT ŽD 13*.

General conclusions

1. The analysis of the investigations of road pavement structure and (or) earth subgrade soil reinforcement revealed that at least 30 kN/m tensile strength with the minimum 12.6 kN/m node rigidity geogrid has to be used to ensure the functionality of the road structure. The use of geogrids, where layers of organic soil up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade, has not been described in the normative technical documents of roads.
2. Experimental research results of the road surface roughness of the investigated road pavement sections and the resilient modulus of the investigated pavement structure layers proved that the degradation of the road pavement for all road structures with geogrid-reinforced pavement structure and (or) the earth subgrade does not exceed the requirements set out in the normative technical documents.
3. Experimental research has shown that the use of geogrids for the reinforcement of pavement structures and (or) earth subgrade when layers of consolidated organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade limits the development of the roughness of the road pavement. During the research, sections of geogrid-reinforced pavement structures and (or) earth subgrades were found to have the lowest increase in pavement roughness (from 3.53 % to 20.49 % or from 0.03 m/km to 0.22 m/km), which means that they maintain the evenness of the pavement the best. Geogrid-reinforced sections with the lowest average values of the resilient modulus of pavement layers (451 MPa for the crushed stone base layer and 156 MPa for the protective frost-resistant layer) are not characterized by the pavement roughness increase rate higher than 0.22 m/km during seven years of operation compared to the earth subgrade considered to be a reference one, which had the pavement roughness increase rate not higher than 0.44 m/km.

4. Taking into account the results of pavement roughness analysis, it has been proved that in terms of pavement degradation rate (not more than 0.031 m/km per year) geogrid-reinforced pavement structure and (or) earth subgrade, where layers of consolidated organic soils up to 3.0 m thick are equivalent to soil subgrade types defined in the legislation, which had the rate of road surface degradation not higher than 0.063 m/km per year.
5. Based on the results of experimental research, the application of the geogrid usage demand assessment and selection scheme has been developed for the selection of geogrids regardless of the type of construction envisaged (repair, rehabilitation, reconstruction or new construction). The suggested scheme ensures the functionality of the road structure in case the layers of organic soils found in the earth subgrade are well or moderately decomposed and are up to 3.0 m thick.

Recommendations

1. During the reconstruction of existing roads or streets, where layers of consolidated organic soils up to 3.0 m thick are found in the earth subgrade, it is recommended to use geogrid-reinforced earth subgrade structure according to the established geogrid usage demand assessment and selection scheme allowing to avoid organic soil replacement, consolidation or strengthening with piles.
2. It is recommended to include this area of application of geogrids with the planned corrections of physical and mechanical properties of geogrids when updating the document “*Guidelines for the Use of Geosynthetics for Earthworks on Roads MN GEOSINT ŽD 13*”.
3. It is recommended to continue the long-term research on the road pavement quality monitoring on the geogrid-reinforced earth subgrade above organic soil layers by applying observations of the stresses and strains acting on the geogrids for the whole design life of the road (20 years). Also, it is recommended to provide measurements of the bearing capacity of the pavement structure layers at all seasons of the year, because in the experimental study the measurements were performed only at the most unfavorable time of the year, i.e. in the spring after the defrost of subgrade and additionally to test how woven and extruded geogrid types affect the earth subgrade.

Priedai³

- A priedas.** Geotinklams taikomi saugos koeficientai
- B priedas.** Tiriamųjų kelių ruožų dangų detalės
- C priedas.** Tiriamųjų kelių ruožų projektinės apkrovos nustatymas
- D priedas.** Autoriaus sąžiningumo deklaracija
- E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- F priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Aurimas ŠIUKŠČIUS

KELIO KONSTRUKCIJOS SUTVIRTINIMO GEOTINKLU VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (T 002)

ASSESSMENT OF ROAD STRUCTURE STRENGTHENING WITH GEOGRID

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2020.10.26. 13,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius